

УДК 669.184.001.57

О НЕПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И ДУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Банникова А.В.¹, аспирант
Корнет М.Е.², соискатель (maria4business@mail.ru)

¹ Сибирский Федеральный Университет
(660041, Россия, г. Красноярск, пр. Свободный, 79)

² Сибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М.Ф. Решетнева
(660014, Россия, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31)

Аннотация. Рассмотрена проблема моделирования дискретно-непрерывного динамического процесса при отсутствии данных о текущих управляющих воздействиях, поставлена задача идентификации. Предложена непараметрическая модель динамического объекта и проанализированы результаты вычислительного эксперимента моделирования при неполной информации об управляющих воздействиях. Для учета в модели неконтролируемых входных воздействий предложена двухконтурная система управления динамическим объектом. Внутренний контур управления включает управляющее устройство, которое реализует типовой закон регулирования. Внешний контур включает непараметрический регулятор, несущий в себе черты обучаемости и дуализма. Описан непараметрический алгоритм дуального управления и проанализирован его двойственный характер. Приведен сравнительный анализ численного исследования алгоритма управления динамическим объектом, реализованного в двухконтурной системе и в системе управления с типовым ПИ-регулятором.

Ключевые слова: дискретно-непрерывный динамический процесс, непараметрическая идентификация, непараметрический регулятор, непараметрическое дуальное управление.

Проблемы идентификации и управления сложными промышленными объектами традиционно имеют высокую практическую значимость. Зачастую исследователю приходится решать эти задачи в условиях малой априорной информации об исследуемом процессе. Одной из характерных ситуаций является недостаток текущей информации из-за отсутствия соответствующих средств контроля.

Целью настоящей работы является рассмотрение и численное исследование непараметрических алгоритмов идентификации и управления применительно к динамическим процессам.

Непараметрическая идентификация в условиях неполной текущей информации. При изучении дискретно-непрерывных технологических процессов исследователь сталкивается с неполной информацией о текущих входных данных, которые могут существенно отличаться от реальности. В частности, может возникнуть ситуация, когда процесс управляется человеком-оператором. В процессе работы оператор вносит коррекции по ходу технологического процесса на основании имеющегося опыта и технологической карты. Во многих случаях значения управляющих воздействий (то есть действий оператора) из-за недостатка средств контроля остаются неизвестными. Это накладывает свой отпечаток при моделировании и обуславливает проблему построения модели при недостатке текущей информации [1].

Пусть объект описывается уравнением

$$x_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_{t-k}, u_t, \mu_t),$$

где $f(\cdot)$ – неизвестная функция; k определяется на основании имеющейся априорной информации.

Блок-схема рассматриваемого динамического процесса представлена на рис. 1, где x_t – выходная переменная процесса; u_t – входное управляемое воздействие; μ_t – вектор входных неуправляемых воздействий; (t) – непрерывное время; индекс t – дискретное время; \bar{u}_t – неизвестное входное воздействие; Δu_t – входное воздействие, поступающее на вход системы от оператора, остающееся неизвестным из-за недостатка средств контроля; x_t^* – задающее воздействие; \hat{x}_t – выход модели объекта; УУ – устройство управления; блок Н – выполняет роль сумматора входных воздействий u_t и Δu_t ; h_t^x , h_t^u – случайные помехи измерений, соответствующие переменным процесса с нулевыми математическими ожиданиями и ограниченной дисперсией; $\xi(t)$ – векторная случайная помеха; Δt – интервал времени, через который осуществляется контроль переменных.

Таким образом, имеется выборка «входных-выходных» переменных $\{x_i, \mu_i, u_i, i = 1, s\}$, где s – объем выборки (индекс h у переменных объекта из соображения простоты опущен). Задача идентификации состоит в построении модели объекта на основе выборки $\{x_i, \mu_i, u_i, i = 1, s\}$. Синтез непараметрической модели

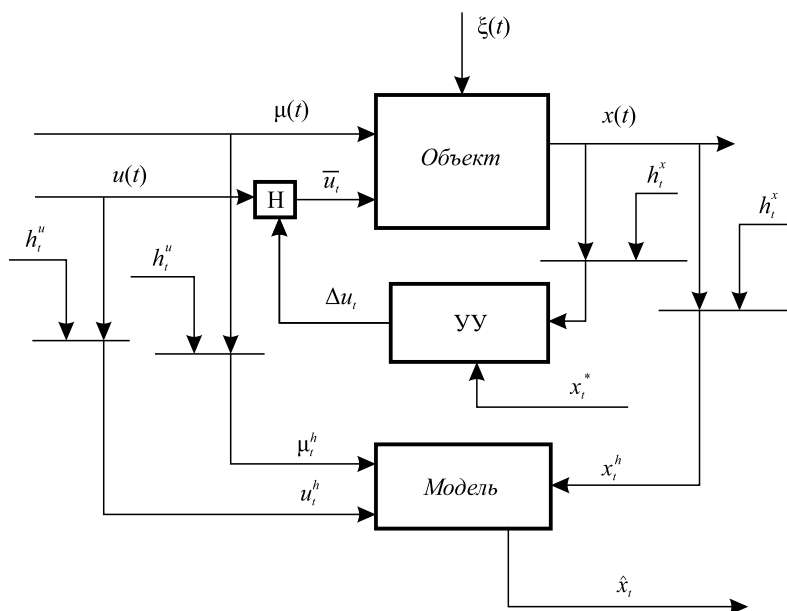


Рис. 1. Блок-схема моделирования динамического процесса

Fig. 1. The flowchart of the dynamic process modeling

описан в работе [2]. Непараметрическая модель подобного объекта для случая $k = 2$ может быть принята в следующем виде [3]:

$$\hat{x}_i(u, \mu) = \left[\sum_{i=1}^s x_i \Phi \left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u} \right) \Phi \left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^x} \right) \times \right. \\ \times \Phi \left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s^x} \right) \Phi \left(\frac{\mu_s - \mu_i}{c_s^\mu} \right) \left. \right] / \left[\sum_{i=1}^s \Phi \left(\frac{u_s - u_i}{c_s^u} \right) \times \right. \\ \times \Phi \left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s^x} \right) \Phi \left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s^x} \right) \Phi \left(\frac{\mu_s - \mu_i}{c_s^\mu} \right) \left. \right],$$

где $\Phi(\cdot)$ – ядерная колоколообразная функция; c_s – коэффициент размытости ядра (значения $\Phi(\cdot)$ и c_s удовлетворяют условиям работы [3]).

Для оценки непараметрической модели использована квадратичная ошибка $R_s = s^{-1} \sum_{i=1}^s (x_i - x_i^s)^2$, где x_i –

измеренное значение выходной переменной; x_i^s – полученная оценка; R_s – относительная ошибка; $W_s = R_s / D_s$; D_s – дисперсия выхода объекта.

Численное исследование непараметрического алгоритма идентификации. Рассмотрим следующий вычислительный эксперимент. Для имитации реального объекта принято уравнение вида $x(t) = 0,1x(t-1) + 0,2x(t-2) + 3u(t) + \mu_1(t) + \mu_2(t) + 2\mu_3(t)$. Входное воздействие примем в виде $u(t) = 2 + 2\sin(0,2t)$. После прохождения канала Н значение \bar{u}_i определим следующим образом: $\bar{u}_i = 2 + 1,8\sin(1,8t)$. Неуправляемые входные воздействия возьмем в виде $\mu_1(t) = 0,5\cos(0,5t)$, $\mu_2(t) = 0,35\cos(0,4t)$, $\mu_3(t) = 0,2\cos(0,6t)$. Примем $\Delta t = 0,2$, $s = 150$, помехи отсутствуют. Результаты моделирования

приведены на рис. 2 в случае, когда действия оператора по корректировке входного управляемого воздействия не фиксируются ($R_s = 1,54$, $W_s = 0,36$) (а) и в случае ситуации, когда действия оператора известны ($R_s = 0,16$, $W_s = 0,03$) (б). В первом случае модель динамического объекта оказалась более грубой, чем во втором.

Непараметрическое дуальное управление динамическим процессом. В настоящее время при управлении динамическими процессами в черной металлургии часто используют стандартные типовые законы регулирования (П, ПИ, ПИД) [4]. Функции управления, как было отмечено ранее, может выполнять человек-оператор. Следует отметить, что качество регулирования в ряде случаев оказывается недостаточно эффективным. Для повышения эффективности управления в рассмотренную блок-схему (рис. 1) предлагается добавить внешний контур управления (рис. 3), где НР – непараметрический регулятор; x_i^* – задающее воздействие для непараметрического регулятора, x_i^{**} – задающее воздействие для УУ.

Примечательно, что контур управления, включающий в себя управляющее устройство, сохранен, но добавлен внешний контур управления, включающий в себя непараметрический регулятор [5]. Управляющее устройство реализует какой-либо типовой закон регулирования [6, 7]. Непараметрический регулятор несет в себе черты обучаемости и дуализма, он позволяет улучшить качество управления объекта за счет учета неуправляемой входной переменной μ_i .

Непараметрический алгоритм дуального управления [8, 9] имеет вид

$$u_{s+1} = u_s^* + \Delta u_{s+1},$$

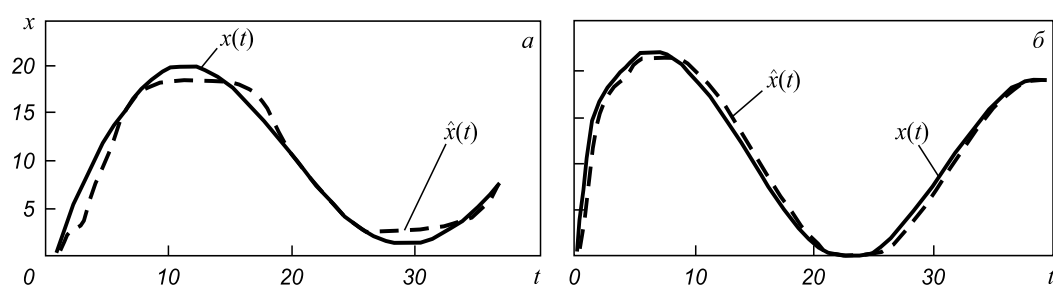


Рис. 2. Результаты моделирования объекта

Fig. 2. Results of the object modelling

где

$$u_s^* = \left[\sum_{i=1}^s u_i \Phi \left(\frac{x^* - x_i}{c_s} \right) \Phi \left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s} \right) \Phi \left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s} \right) \times \right. \\ \left. \times \Phi \left(\frac{\mu_s - \mu_i}{c_s} \right) \right] \left[\sum_{i=1}^s \Phi \left(\frac{x^* - x_i}{c_s} \right) \Phi \left(\frac{x_{s-1} - x_{i-1}}{c_s} \right) \times \right. \\ \left. \times \Phi \left(\frac{x_{s-2} - x_{i-2}}{c_s} \right) \Phi \left(\frac{\mu_s - \mu_i}{c_s} \right) \right],$$

сосредоточены «знания» об объекте; $\Delta u_{s+1} = \varepsilon(x_{s+1}^* - x_s) -$ «изучающие» поисковые шаги; x^* – задающее воздействие.

Проанализируем характер дуализма рассмотренного алгоритма. На начальной стадии управления из-за недостатка информации основная роль принадлежит слагаемому Δu_{s+1} . По мере процесса обучения (накопления информации) все возрастающую роль при формировании управляющего воздействия начинает играть слагаемое u_s^* . Таким образом, в процессе дуального

управления объектом фигурируют как этап изучения объекта, так и этап приведения его к цели.

Численное исследование непараметрического алгоритма дуального управления. Приведем некоторые результаты вычислительного эксперимента. Пусть исследуемый объект является динамическим и описывается выражением: $x(t) = x(t-1) + 2x(t-2) + 3x(t-3) + u(t) + \mu_1(t) + \mu_2(t) + 2\mu_3(t)$ (входные воздействия описаны такие же, как в предыдущем вычислительном эксперименте). В качестве устройства управления выбран ПИ-регулятор. На рис. 4 представлена работа системы управления при ступенчатом задающем воздействии, когда на объект действует помеха 7 % (приняты следующие обозначения: $x(t)$ – выход объекта при двухконтурной схеме управления; $\bar{x}(t)$ – выход объекта при управлении ПИ-регулятором; $x^*(t)$ – задание).

Двухконтурная схема управления значительно качественнее справляется с задачей управления по сравнению с типовым регулятором. Необходимо также отметить, что предложенный алгоритм управления является наиболее устойчивым к помехе, и даже при достаточно

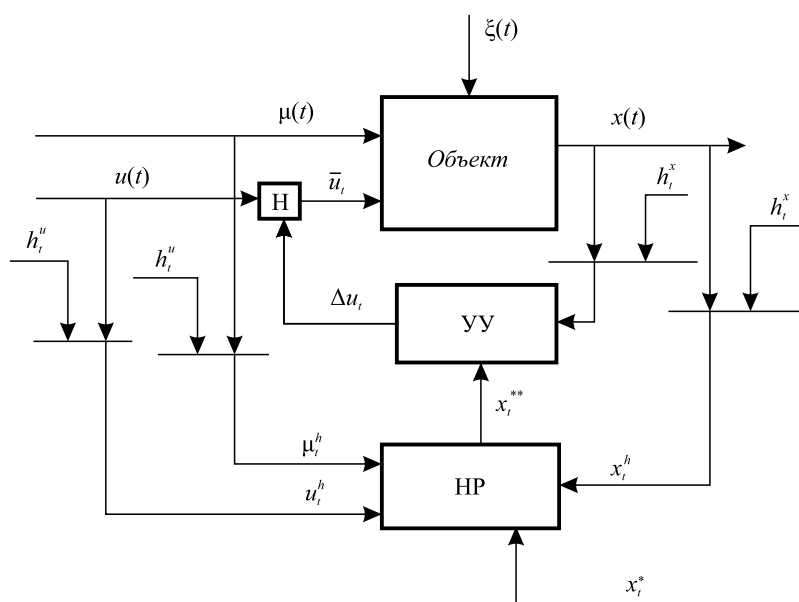


Рис. 3. Двухконтурная схема управления динамическим процессом

Fig. 3. The dual-circuit control scheme of the dynamic process

высоком (7 %) уровне позволяет получить удовлетворительный результат.

Непараметрическая идентификация на примере процесса выплавки стали. Для проведения кислородно-конвертерной плавки в рациональном режиме необходимо использование модели расчета основных параметров плавки. Трудности идентификации процесса, как правило, связаны с большим количеством взаимодействующих параметров и наличием трудно формализуемых факторов [10]. Кроме того, плавкой управляет машинист дистрибутора и из-за недостатка соответствующих средств контроля некоторые воздействия им не фиксируются. В рамках современных АСУ ТП плавкой реализованы математические модели тепловых и физико-химических процессов, протекающих в конвертере, в виде уравнений термодинамики, гидродинамики, массопереноса и т.д., а оптимизация процесса требует увеличения объема контролируемых и расчетных параметров процесса. Возможным решением является непараметрическая идентификация искомых зависимостей [1].

Контролируемыми управляемыми переменными кислородно-конвертерной плавки являются: u_1 – расход кислорода на продувку, м³; u_2 – расход кислорода на прогрев, м³; $u_3 - u_8$ – расход извести, электродного боя, флюса ФОМИ, флюса ФМ-1, агломерата офлюсованного, угля ССО, т; u_9 – продолжительность продувки, мин.; u_{10} – расстояние между кислородной фурмой и уровнем ванны конвертера. В качестве контролируемых неуправляемых по ходу плавки переменных выступают μ_1 – расход чугуна, т; химический состав заливаемого чугуна, а именно $\mu_2 - \mu_5$ – содержания кремния, марганца, серы, фосфора, %; μ_6 – температура чугуна, °С; μ_7 – расход лома, т. К помехам $\xi(t)$, действующим на процесс, относят различные, как правило, неконтролируемые факторы. Векторная выходная переменная $x(t)$ характеризует параметры конечного продукта плавки, а именно, химический состав металла на повалке ($x_1 - x_4$ – содержание углерода, марганца, серы, фосфора, %), химический состав конечного шлака на повалке ($x_5 - x_{15}$ – содержания CaO, SiO₂, FeO, MgO, Al₂O₃, S, MnO, P₂O₅, TiO₂, V₂O₅), температуру металла на повалке, °С.

Для вычислительного эксперимента использовали выборку реальных данных плавов, проведенных в кислородно-конвертерном цехе № 2 «ЕВРАЗ – объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». Выборка включала в себя следующие переменные: $u_1 - u_8$, $\mu_1 - \mu_7$, $x_1 - x_{15}$. Объем выборки $s = 35$. Для вычислительного эксперимента было построено четыре непараметрические модели вида:

$$x_s^l(u) = \frac{\sum_{i=1}^{35} x_i \prod_{j=1}^{15} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))}{\sum_{i=1}^{35} \prod_{j=1}^{15} \Phi(c_s^{-1}(u^j - u_i^j))},$$

где $l = \overline{1, 4}$; $s = 35$.

Полученные зависимости имеют нелинейный характер, хорошо согласуются с функциональными и физико-химическими представлениями о кислородно-конвертерном процессе выплавки стали.

Выводы. Рассмотрены адаптивные модели дискретно-непрерывных процессов в условиях непараметрической неопределенности. Приведены непараметрические алгоритмы управления для внешнего контура управления объектом. Некоторые фрагменты работы моделей и алгоритмов управления иллюстрируются вычислительными экспериментами. Применение непараметрического алгоритма во внешнем контуре управления позволяет улучшить ведение технологического процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Моделирование // Вестник СибГАУ. 2010. № 4(30). С. 4 – 9.
2. Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Общий подход // Вестник СибГАУ. 2008. № 2(20). С. 65 – 68.
3. Медведев А.В. Непараметрические системы адаптации. – Новосибирск: Наука, 1983. – 174 с.
4. Автоматическое управление металлургическими процессами / А.М. Беленький, В.Ф. Бердышев, О.М. Блинов, В.Ю. Каганов. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
5. Банникова А.В., Корнеева А.А., Корнет М.Е., Сергеева Н.А. О непараметрическом моделировании стохастическим объектом с памятью // Вестник СибГАУ. 2014. № 2(54). С. 6 – 11.

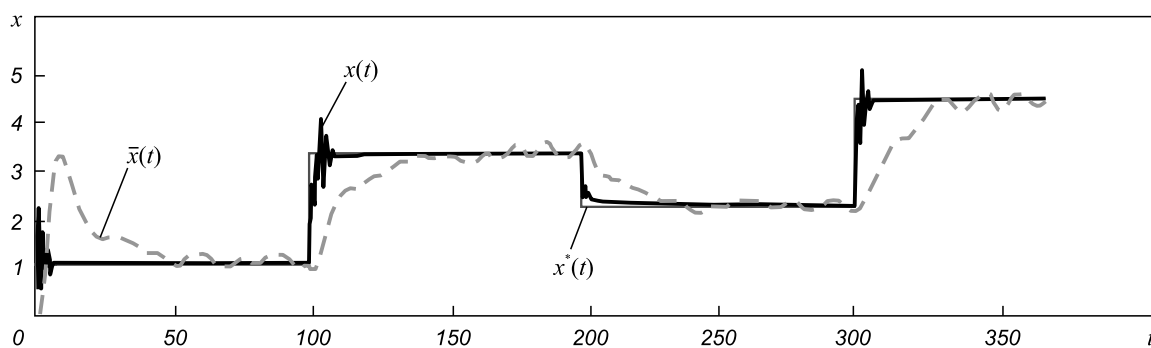


Рис. 4. Работа системы управления при помехе 7 %

Fig. 4. The work of the control system with interference of 7 %

6. Методы классической и современной теории автоматического управления. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. Т. 2. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
7. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. Т. 3. – М.: изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
8. Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Управление I // Вестник СибГАУ. 2013. № 2(48). С. 57 – 63.
9. Медведев А.В. Теория непараметрических систем. Управление II // Вестник СибГАУ. 2013. № 3(49). С. 85 – 90.
10. Корнеева А.А., Корнет М.Е. Непараметрическое моделирование конвертерной плавки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 10. С. 24 – 28.

Поступила 30 декабря 2014 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA – FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 4, pp. 277–281.

NONPARAMETRIC IDENTIFICATION AND DUAL CONTROL OF DYNAMIC PROCESSES

Bannikova A.V.¹, *Postgraduate*

Kornet M.E.², *Candidates for a degree of Cand. Sci. (Eng.)*
(maria4business@mail.ru)

¹ **Siberian Federal University** (79, Svobodnyi ave., Krasnoyarsk, 660041, Russia)

² **Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev** (31, imeni gazety «Krasnoyarskii rabochii» ave., Krasnoyarsk, 660014, Russia)

Abstract. The problem of modelling of a discrete-continuous dynamic process with lack of current control values is discussed with the formulation of identification problem. A nonparametric model of dynamic object and nonparametric identification calculation results are given due to incomplete information about control actions. A dual scheme of dynamic object control system is submitted in order to include uncontrolled inputs. The internal control frame includes the unit with a typical control mode. The upper control frame involves a nonparametric regulator which has self-training and dual sense properties. A nonparametric algorithm of dual control is described and its dual nature is analyzed. Comparative calculation results of the dynamic object control system with dual scheme and with PI-controller are submitted.

Keywords: discrete and continuous dynamic process, nonparametric identification, nonparametric regulator, nonparametric dual control.

REFERENCES

1. Medvedev A.V. Theory of nonparametric systems. Modelling. *Vestnik SibGAU*. 2010, no. 4(30), pp. 4–9. (In Russ.).
2. Medvedev A.V. Theory of nonparametric systems. General approach. *Vestnik SibGAU*. 2008, no. 2(20), pp. 65–68. (In Russ.).
3. Medvedev A.V. *Neparametricheskie sistemy adaptatsii* [Nonparametric systems of adaptation]. Novosibirsk: Nauka, 1983. 174 p. (In Russ.).
4. Belen'kii A.M., Berdyshev V.F., Blinov O.M., Kaganov V.Yu. *Avtomaticheskoe upravlenie metallurgicheskimi protsessami* [Automatic control of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1989. 384 p. (In Russ.).
5. Bannikova A.V., Korneeva A.A., Kornet M.E., Sergeeva N.A. On a nonparametric modelling with the stochastic object with memory. *Vestnik SibGAU*. 2014, no. 2(54), pp. 6–11. (In Russ.).
6. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control. Statistical dynamics and the identification of automatic control systems]. Pupkov K.A., Egupov N. D. eds. Vol. 2. Moscow: izd. MGTU im. Bauman N.E., 2004. (In Russ.).
7. *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. Sintez regulyatorov sistem avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern theory of automatic control. Synthesis of regulators of automatic control systems]. Pupkov K.A., Egupov N.D. eds. Vol. 3. Moscow: izd. MGTU im. Bauman N.E., 2004. (In Russ.).
8. Medvedev A.V. Theory of nonparametric systems. Control I. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 2(48), pp. 57–63. (In Russ.).
9. Medvedev A.V. Theory of nonparametric systems. Control II. *Vestnik SibGAU*. 2013, no. 3(49), pp. 85–90. (In Russ.).
10. Korneeva A.A., Kornet M.E. Nonparametric modelling of converter melting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 10, pp. 24–28. (In Russ.).

Received December 30, 2014