



УДК 004.5:621.365

Г. С. Сошкин, С. В. Сошкин, А. Л. Рутковский, Г. Г. Арунянц

## ПРИМЕНЕНИЕ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ СРЕДЫ SIMULINK В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Представлены результаты синтеза и анализа системы управления температурой для камеры обжиговой печи электродной продукции. С помощью среды Simulink проведено имитационное моделирование систем управления человеком-оператором, с параметрически оптимизируемым регулятором и нейросетевым прогнозирующим контроллером. Определены показатели качества переходных процессов камеры обжиговой печи для различных вариантов функционирования системы. Показано преимущество применения нейросетевого прогнозирующего контроллера для управления тепловыми процессами.

24

Presented the results of the synthesis and analysis of the system of temperature control for the camera kiln electrode products. By using Simulink held simulation of control systems with man – operator, with a parametrically optimizable regulator and neuron network predictor controller. Defined indicators of the quality of the transient processes camera kiln for different variants of functioning of the system. Shows the advantage of using neural networks predictive controller for control of thermal processes.

**Ключевые слова:** система регулирования, обжиговая печь, качество управления, математическая модель, динамическое звено, контур слежения, имитационная модель, передаточная функция, переходный процесс, идентификация, возмущение, критерий оценки, нейронная сеть, оптимизация.

**Key words:** regulatory system, kiln, quality control, a mathematical model, the dynamic element, circuit tracking, simulation model, the transfer function, the transition process, identification, disturbance, evaluation criteria, the neural network, optimization.

В ряде работ, посвященных вопросам управления многокамерными кольцевыми печами обжига электродов [6; 7], обоснована задача строгого поддержания температурного графика обжига. Особенностью управления тепловым объектом является соблюдение минимального перегрева изделий (т.е. перерегулирования). Из требований максимального соответствия температуры обжига заданному временному графику обжига и одновременно минимального перерегулирования формируется стратегия «безопасного» управления тепловым объектом.

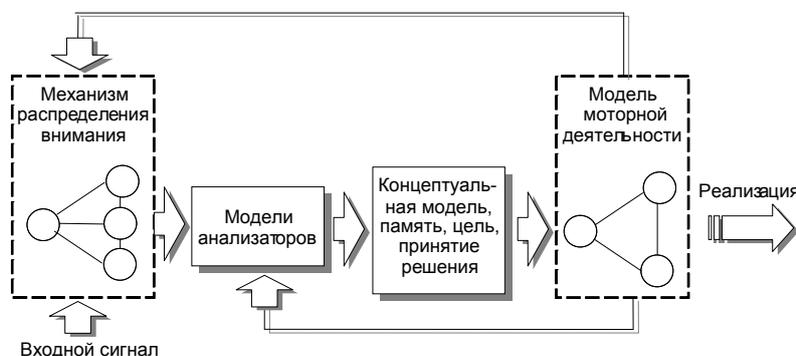
Для решения поставленной задачи проведен синтез и анализ систем регулирования температурного режима обжига для камер печи с управлением (воздействием) по расходу газа и воздуха на горелочные устройства, расположенные на переносных рампах.

### Дистанционное управление режимом обжига

Имитационная модель профессиональной деятельности оператора при решении задач управления включает в себя модели анализаторов (зрительного, слухового, тактильного), модель моторной деятельности,



механизм распределения внимания и др. [4]. Центральными составляющими имитационной модели являются информационная и концептуальная модели. Общая структура модели показана на рисунке 1.



25

Рис. 1. Общая структура модели деятельности человека-оператора

В настоящее время для линейной непрерывной математической модели человека-оператора как звена цепи управления при слежении за технологическим процессом по показаниям приборов предложено несколько вариантов представления передаточной функции.

В работе [2] выражение передаточной функции цепи прямого воздействия следящей системы при спектре входного сигнала, охватывающего частоты до 1,2 Гц, имеет вид

$$W_{on}(p) = K \frac{e^{-0,2p}}{p}. \quad (1)$$

Оператор ведет себя как интегрирующее звено при запаздывании, равном 0,2 с. Коэффициент усиления оператора в режиме слежения для объекта, представляющего собой усилительное звено, достаточно хорошо отвечает величине  $5-9/K_{yоб}$ . Передаточная функция оператора меняется в зависимости от характера управляемой системы и для объекта с самовыравниванием соответствует

$$W_{on}(p) = K \frac{e^{-0,2p}}{p+1}. \quad (2)$$

Аналогичные характеристики для передаточной функции оператора радиолокационной станции (РЛС) приведены в работе [4]: оператор представляется интегрирующим звеном и звеном запаздывания, а система с оператором является астатической, т.е. содержит интегрирующее звено

$$W_{on}(p) = K \frac{e^{-\tau}}{p}. \quad (3)$$

Метод описания динамических свойств человека-оператора как нелинейного звена был предложен и разработан К.А. Пупковым [3]. Он



основан на использовании экспериментальных данных. В работе в результате эксперимента были получены передаточные функции оператора (летчика) в виде

$$W_{on}(p) = \frac{K(T_y p + 1)}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1} e^{-\tau}, \quad (4)$$

где  $K = 0,33$  – коэффициент усиления;  $\tau = 0,16$  – время запаздывания оператора, характеризующее способность человека воспринимать скорость изменения регулируемой величины;  $T = 0,4$  – постоянная времени, отражающая инерционность нервно-мышечной системы и адаптивные свойства человека;  $\xi = 0,6$  – параметр, отражающий коэффициент внутренней обратной связи (ОС) человека (цепь анализатора);  $T_y = 0,36$  – время упреждения оператора.

Представленные модели человека-оператора можно привести к выражениям (3) и (5). С учетом предложенных моделей человека-оператора рассмотрим работу системы управления объектом по отклонению с человеком-оператором в цепи обратной связи. В качестве объекта исследования авторы использовали модель второго порядка с самовыравниванием, полученную путем обработки экспериментальных данных, снятых на печи обжига электродов [5]. Входной сигнал – расход природного газа, а выходной – температура газовой фазы в камере обжиговой печи. Идентификация параметров передаточной функции проведена методом нейросетевого моделирования. Передаточная функция объекта имеет вид

$$W_{об}(p) = \frac{1,867}{19,21p^2 + 7,89p + 1} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}^3. \quad (5)$$

Анализ качества управления объектом (5) определим путем имитационного моделирования системы управления процесса человеком-оператором в системе *Simulink* пакета *Matlab 7.0*.

Структурная схема модели системы управления с человеком-оператором в цепи обратной связи для двух вариантов рассматриваемых передаточных функций представлена на рисунке 2. В первом контуре модель человека-оператора реализует передаточную функцию (3) и включает блок звена запаздывания *FF Delay1* и инерционное звено первого порядка (ОБ-Т7). Во втором контуре модель человека реализует передаточную функцию (4) с помощью блоков *Proportional1*, звена запаздывания *FF Delay2* и апериодического звена второго порядка (ОБ-Т2).

Для автоматического определения интегрального критерия качества управления объектом создаем структуру системы в *Simulink*, позволяющую оценивать сумму квадратов ошибки  $S1$  и сумму абсолютных значений ошибки  $S2$  [6]:

$$S1 = \sum_{k=1}^{\infty} e^2[k], \quad S2 = \sum_{k=0}^{\infty} e[k], \quad (6)$$

где  $e[k]$  – ошибка управления;  $k$  – временной интервал регулирования.

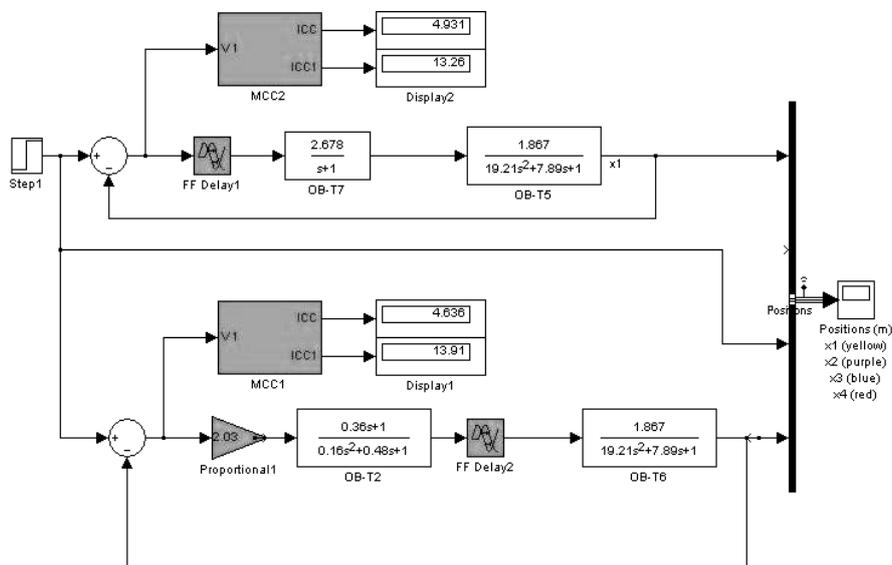


Рис. 2. Структура системы управления температурой в камере обжиговой печи человеком-оператором

Переходный процесс в системе управления с моделью человека-оператора с передаточной функцией (3) представлен на рисунке 3.

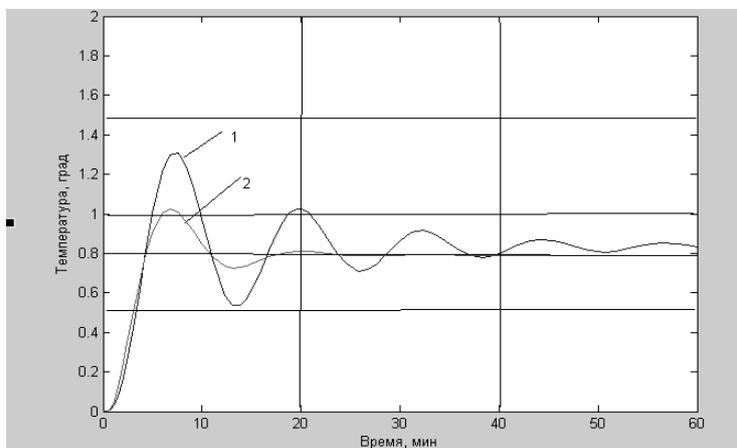


Рис. 3. Переходные процессы в системе управления с моделью человека-оператора при компенсации единичного ступенчатого воздействия:

- 1 — переходный процесс с моделью человека-оператора с передаточной функцией (3);
- 2 — переходный процесс с моделью человека оператора с передаточной функцией (4)

Основные показатели качества регулирования объекта приведены в таблице 1.



Таблица 1

Основные показатели качества регулирования объекта

Показатель	Оператор с передаточной функцией (3)	Оператор с передаточной функцией (4)
Максимальное динамическое отклонение	$y_{\ddot{a}}^{\max} = y_1 = 0,5$	$y_{\ddot{a}}^{\max} = 0,21$
Быстродействие, время регулирования	$t = 60$	$t = 50$
Степень затухания	$\psi = \frac{y_1 - y_3}{y_1} = 0,56$	$\psi = 0,98$
Величина перерегулирования, %	$\lambda = \frac{y_2}{y_1} \cdot 100 = 48$	$\lambda = 29$
Критерий суммы квадратов ошибки	4,93	14,63
Критерий суммы абсолютных значений ошибок	13,26	13,91

28

Рассмотрим систему управления при подаче на вход объекта низкочастотной помехи с частотой 0,2 Гц, амплитудой 0 – 1. Структура системы представлена на рисунке 4. Блоки *Random Reference* генерируют последовательность единичных возмущающих воздействий на входе объекта.

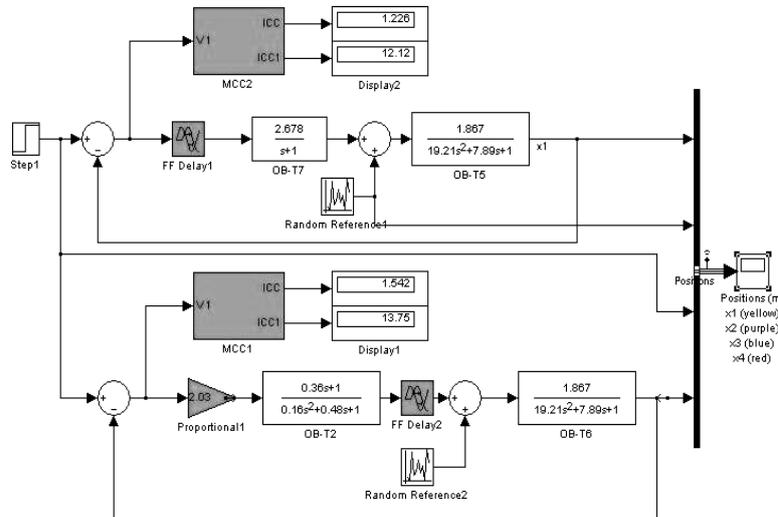


Рис. 4. Структура системы управления температурой в камере обжиговой печи человеком-оператором при воздействии возмущающей помехи

Автоматическое управление режимом обжига ПИД-регулятором с оптимальными настройками

Рассмотрим управление представленным технологическим объектом с параметрически оптимальным ПИД-регулятором. Схема одноконтурной системы автоматического регулирования (САР) темпера-



турным режимом камеры обжига с ПИД-регулятором в цепи обратной связи в среде *Simulink* представлена на рисунке 5.

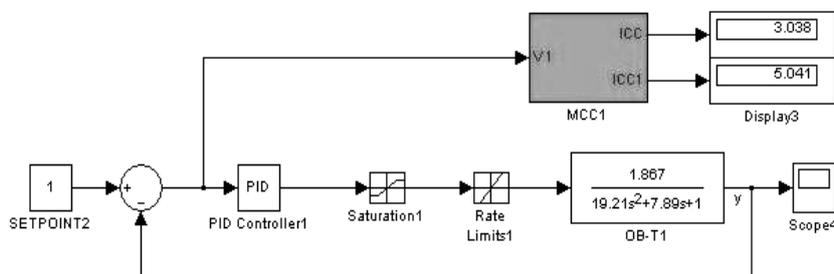


Рис. 5. Структура системы автоматического регулирования для камеры обжиговой печи

Первоначальные настройки коэффициентов регулятора определены методом Зинглера – Николса [1] для апериодического переходного процесса (без перерегулирования):  $K_p = 2,27$ ,  $T_u = 0,219$ ,  $T_d = 0,115$ . Переходный процесс для объекта управления при единичном ступенчатом воздействии по каналу задания имеет следующие характеристики: время регулирования – 25 мин, максимальное динамическое отклонение – 0,24, перерегулирование – 48 %, статическая ошибка отсутствует. Значение суммы квадратов ошибки управления при настройках ПИД-регулятора методом Зинглера – Николса составляет 2,264, а значение суммы абсолютных значений ошибки – 4,346.

Для расчета оптимальных параметров ПИД-регулятора по критерию минимизации среднеквадратичного отклонения ошибки системы от заданного значения проведем оптимизацию системы средствами *Simulink*, используя блок *Output Constraint*. Структура системы оптимизации регулятора представлена на рисунке 6.

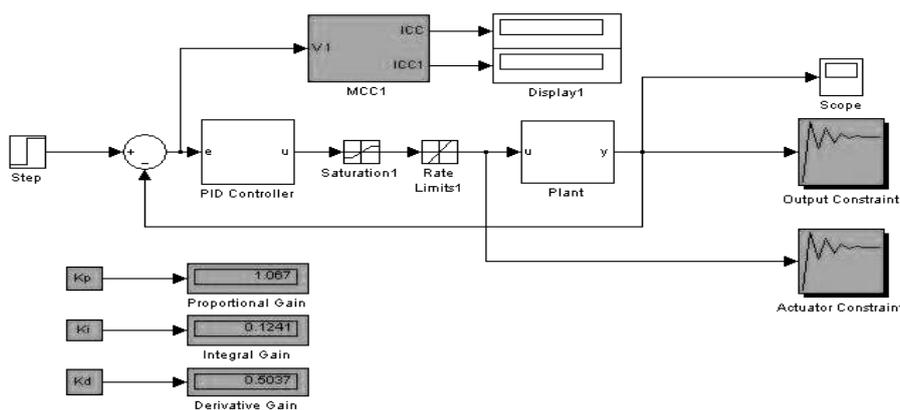


Рис. 6. Структура системы оптимизации коэффициентов ПИД-регулятора



В блоке оптимизации использовался градиентный метод Розенброка [9]. Количество итераций составило 47, время расчета — не более 7 мин (IBM PC с тактовой частотой 1,2 ГГц). При расчете оптимальных настроек ПИД-регулятора методом Розенброка получены следующие значения коэффициентов регулятора:  $K_p = 1,066$ ;  $T_i = 0,1241$ ;  $T_d = 0,5037$ .

Значения характеристик переходного процесса для объекта управления с параметрически оптимальными методами настройки существенно превосходят результаты, полученные методом Зинглера — Николса. Так, время регулирования равно 35 минутам, максимальное динамическое отклонение — 0,105, перерегулирование — 48 %, статическая ошибка отсутствует.

Значения интегральных оценок качества превышают аналогичные значения, полученные в результате инженерного метода расчета настроек регулятора, что свидетельствует о более демпфированном переходном процессе для оптимального ПИД-регулятора и сопоставимости результатов по значениям показателя колебательности полученных процессов. Классический ПИД-регулятор с параметрически оптимальными настройками применим для управления процессом обжига. Вместе с тем наличие значительного времени регулирования и перерегулирования объекта, составляющего 33 %, предопределяет возможность поиска альтернативных решений по синтезу САР процесса обжига.

### Управление режимом обжига нейросетевым прогнозирующим контроллером

Одним из наиболее перспективных подходов к повышению показателей качества регулирования технологических процессов является переход от традиционных систем к использованию нейросетевых САР. В настоящее время распространение получил метод прогнозирующего управления на основе модели объекта (NN Predictive Control — NN PC), охватывающий широкий диапазон алгоритмов управления [10]. Возможность улучшения качества управления температурным режимом обжига была оценена путем синтеза и имитационного моделирования системы управления с применением нейросетевого прогнозирующего контроллера. Нейросетевой прогнозирующий контроллер (входящий в состав пакета *Simulink*) использует модель нейронной сети нелинейного объекта для предсказания реакции объекта.

Средой для разработки и обучения нейронных сетей, имитационного моделирования системы управления послужил программный продукт фирмы *MathWorks, Inc.* — *Matlab 7,01* с расширением *Neural Networks Toolbox* [8]. Блок NN PC содержит две нейросети: нейроконтроллеры — *Optim* и *NN Model*, последний нужен для предсказания реакции на поступающее воздействие. Полученная идентификационная модель малопригодна для дальнейшего анализа с целью выяснить суть происходящих внутри объекта процессов. Это связано с распределенностью проводимого ею преобразования вход-выход по всем нейронам сети. Структурная схема системы управления с применением NN PC представлена на рисунке 7.

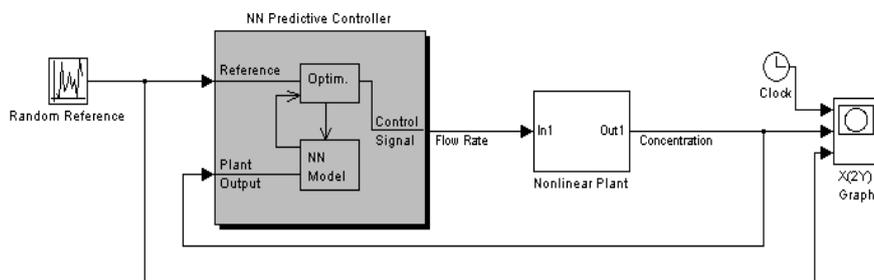


Рис. 7. Структурная схема системы с NN PC-контроллером

Первая стадия прогнозирующего управления – это обучение нейронной сети для описания динамики объекта. Ошибка предсказания между выходом объекта и выходом нейронной сети используется как сигнал обучения нейронной сети.

31

Параметры обучения нейросетевой модели объекта: число скрытых слоев в нейросети – 9; интервал выборки – 0,05; число примеров обучения – 8 тыс. Ограничение выходных данных: максимальный выход модели – 2; минимальный выход модели – 0. Для оценки и сравнения качества управления температурным режимом обжига электродов в камере печи с применением NNPC и ПИД-регулятора с оптимальными настройками синтезирована структура Simulink-модели, которая представлена на рисунке 8. Она позволяет наглядно сравнить переходные процессы в объекте при единичном ступенчатом воздействии для синтезированных систем управления [5].

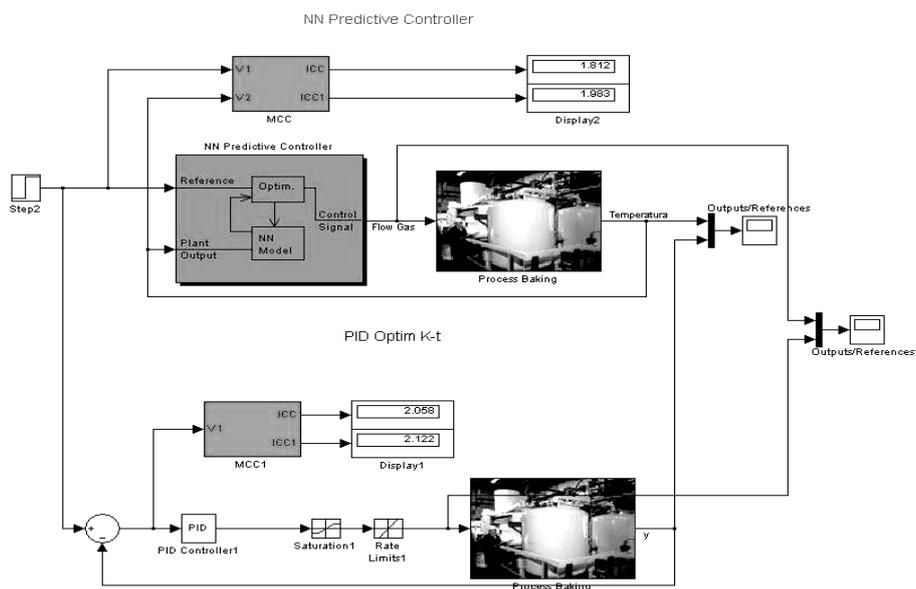


Рис. 8. Структура системы управления для двух типов регуляторов

В таблице 2 представлены полученные путем моделирования оценки показателей качества управления объектом (1) при единичном ступенчатом воздействии для двух вариантов настроек параметров ПИД-регулятора и обученного NN PC-контроллера.



Таблица 2

Оценки показателей качества управления объектом

Звено обратной связи	Динамическая ошибка	Величина		Время регулирования, мин	Квадратичный интегральный критерий качества
		перерегулирования, %	статической ошибки		
Человек-оператор	0,21	29	0,22	20	14,63
ПИД-регулятор (Зинглер – Николс)	0,24	48	0	25	2,919
ПИД-регулятор (Розенброк)	0,105	33	0	27	5,454
NN PC-контроллер	0,08	0	0	12	3,121

32

Анализ результатов имитационного моделирования систем управления с человеком-оператором в цепи обратной связи на примере камеры обжиговой печи показывает, что человек-оператор способен с определенной (достаточно большой) погрешностью как компенсировать возмущения, поступающие на вход объекта, так и отслеживать изменяющиеся задающие воздействия. Существуют общие характерные свойства, позволяющие формализовать действия оператора: 1) наличие чистого запаздывания, равного времени реакции человека-оператора; 2) фильтрация низких частот; 3) способность оператора изменять свою передаточную функцию с изменением задачи управления и в процессе его обучения; 4) способность человека-оператора предвидеть будущие значения по предыдущим (способность экстраполяции) при отслеживании; 5) относительная стабильность характеристик оператора при достаточном времени его обучения и работы и при решении простых задач.

В результате синтеза и имитационного моделирования систем автоматического регулирования камеры обжиговой печи как емкостного объекта с самовыравниванием установлено, что необходимое качество регулирования температурного режима обеспечивают САР как с оптимальным ПИД-регулятором, так и с нейросетевым прогнозирующим контроллером. Однако наилучшие показатели качества параметров регулирования достигнуты в САР с прогнозирующим нейроконтроллером. Несмотря на достаточную сложность технической реализации NN PC-контроллера, разработка и применение его для обжиговых печей электродов является разумной и окупаемой альтернативой традиционному регулятору, поскольку процесс характеризуется высокой экономической эффективностью, сниженной ценой продукции и меньшей энергозатратностью.

Список литературы

1. Денисенко В.А. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // Современные технологии автоматизации. 2008. № 1. С. 86 – 98.
2. Наслен Ж.С.Р. Непрерывные и импульсные модели человека-оператора как звена цепи управления // Труды II Междунар. конгресса Междунар. федер. по автоматическому управлению. М., 1965. С. 78 – 91.



3. Путьков К.А., Устюжанин А.Д. Идентификация и оценка обученности в динамических человеко-машинных системах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2003. № 4. С. 95–103.
4. Симонов С.Н., Частихин А.А. Особенности образовательного процесса в инженерных вузах ВВС и роль психофизической подготовки курсантов // Образование в регионе. 2006. Вып. 18. С. 34–38.
5. Сошкин Г.С., Рутковский А.Л., Хадзарагова Е.А., Сошкин С.В. Синтез и сравнительный анализ систем автоматического регулирования температурным режимом процесса обжига электродов на базе оптимального ПИД-регулятора и нейросетевого прогнозирующего контроллера // Кибернетика и высокие технологии XXI века: тр. XII Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2011. Т. 2. С. 715–720.
6. Сошкин С.В. Проектирование оптимальной системы управления обжигом электродных изделий в камерных печах // Цветная металлургия. №3. 1998. С. 68–71.
7. Сошкин С.В. Системы оптимального управления обжигом электродных заготовок // Там же. 1998. № 3. С. 66–70.
8. Черных И.В. Simulink. Среда создания инженерных приложений. М., 2003.
9. Эйкхоф П. Основы идентификации. М., 1978.
10. Draeger A., Engel S., Ranke H. Model predictive control using neural networks // IEEE Control System Magazine. 1995. Vol. 15, № 5. P. 61–66.

#### Об авторах

Григорий Станиславович Сошкин — асп., Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ.

E-mail: rio@bief.ru

Станислав Валентинович Сошкин — д-р техн. наук, зам. директора по научной работе НПК «Югцветметавтоматика», Владикавказ.

E-mail: rio@bief.ru

Александр Леонидович Рутковский — д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт, Владикавказ.

E-mail: rio@bief.ru

Геннадий Георгиевич Арунц — д-р техн. наук, проф., Калининградский государственный технический университет.

E-mail: suro99@mail.ru

#### About authors

Grigory Soshkin — PhD student, North-Caucasian College of mines-metallurgical, Vladikavkaz.

E-mail: rio@bief.ru

Dr Stanislav Soshkin — deputy director on scientific work NPK «Ugtsvetavtomatika», Vladikavkaz.

E-mail: rio@bief.ru

Dr Aleksander Rutkovskij — prof., North-Caucasian College of mines-metallurgical, Vladikavkaz.

E-mail: rio@bief.ru

Dr Gennady Arutunjants — prof., Kaliningrad State Technical University.

E-mail: suro99@mail.ru