

К ВОПРОСУ О РАЗРАБОТКЕ БАЗЫ ПРАВИЛ НАСТРОЙКИ ПАРАМЕТРОВ ПИ-РЕГУЛЯТОРА ПРИ УПРАВЛЕНИИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ*

*Еременко Ю.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автоматизированные
и информационные системы управления»*

*Полещенко Д.А., к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные и информационные
системы управления»*

*Глуценко А.И., к.т.н., доцент кафедры «Автоматизированные
и информационные системы управления» (strondutt@mail.ru)*

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал НИТУ «МИСиС»
(309516, Россия, Белгородская обл., Старый Оскол, микрорайон Макаренко, 42)

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки базы правил, содержащей опыт оператора по настройке параметров ПИ-регулятора при управлении нагревательной печью. В рамках исследования выделены блоки правил по настройке П-, И-составляющей в условиях нагревания и остывания печи, определены условия активации правил в зависимости от текущей ситуации на объекте управления. Проверка полученной базы правил проведена на моделях двух нагревательных печей с различной динамикой. Использование подхода позволило снизить перерегулирование, возникающее в результате смены динамики объекта, что привело к экономии до 24 % времени на отслеживание графика уставок. Таким образом, использование оптимизатора параметров ПИ-регулятора, построенного на основе данной базы правил для учета нелинейных свойств объектов управления, позволит интенсифицировать производство и снизить себестоимость продукции.

Ключевые слова: ПИ-регулятор, база правил, настройка параметров регулятора, нагревательные печи, математическое моделирование, адаптивное управление, энергоэффективность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-846-850

В настоящее время подавляющее большинство контуров управления технологическими процессами построены на основе ПИД-регуляторов. Обладая рядом преимуществ, такой регулятор остается линейным, в то время как большинство реальных объектов управления (ОУ) обладают нелинейными характеристиками. Примером таких объектов являются нагревательные ОУ – печи нагрева литой заготовки, дуговые печи и пр. Изменение задания, степени загрузки печи при постоянных коэффициентах ПИД-регулятора зачастую приводят к снижению качества регулирования и росту энергозатрат [1 – 3].

Для решения указанной проблемы необходимо построение адаптивной системы управления. С целью создания таких систем разработано достаточно большое число классических методов, таких как метод Циглера-Никольса [4] и методы, основанные на построении модели ОУ с помощью испытательного сигнала [5, 6]. Моменты времени, когда необходимо применять такие методы, определяются человеком. Кроме того, результаты идентификации ОУ, как показали эксперименты, могут существенно отличаться даже при сходных начальных условиях.

Фактически, широкое участие человека даже в работе упомянутых методов позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на большое число разработок в данной области, только опытный настройщик, опираясь на свои знания и опыт, способен эффективно решать такую задачу. Это приводит к заключению о целесообразности применения интеллектуальных методов для решения рассматриваемой задачи [7 – 15]. Среди них можно выделить подходы, в рамках которых настройка ПИД-регулятора осуществляется с помощью нечеткой логики [8, 11, 13, 15], экспертных систем [9, 14] и пр. Среди перечисленных методов непосредственно со знаниями работают экспертные системы. Подход, описанный в работе [9], демонстрирует эффективность данного метода, однако база знаний не учитывает специфики нагревательных ОУ.

Целью данного исследования является разработка базы правил настройки параметров ПИ-регулятора, отражающей опыт настройщика, а кроме того, ее проверка на моделях реальных нагревательных печей. ПИ-регулятор был выбран, поскольку для нагревательных объектов Д-канал используется редко.

В пакете Matlab реализована схема управления объектом, представленным блоком Subsys2 с ПИ-регулятором (Subsystem) и базой правил коррекции

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 13-08-00532-а, 15-07-0609215) и фонда Президента РФ (грант № 14.Y30.15.4865-МК).

его параметров (S-function *rb_PI*) (рис. 1), где U_i , U_p , U_{pi} – сигналы управления на выходе i -, p -каналов и всего ПИ-регулятора соответственно, e – текущее рассогласование. Блок *Saturation* использован для ограничения сигнала управления с ПИ-регулятора в диапазон $[0; 100]$, U – управляющее воздействие.

Для моделирования в качестве объекта использовались математические модели незагруженных и загруженных металлической заготовкой муфельных электропечей СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И4 и СНОЛ 40/1200, полученные путем идентификации.

Параметры для моделей печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И4:

- пустая печь: $K = 21$, $T_1 = 1636$ с, $T_2 = 69,4$ с, $\tau = 64$ с;
- загруженная печь: $K = 21$, $T_1 = 2683$ с, $T_2 = 35$ с, $\tau = 90$ с.

Параметры для моделей печи СНОЛ 40/1200:

- пустая печь: $K = 34,2$, $T_1 = 9000$ с, $T_2 = 100$ с, $\tau = 12$ с;
- загруженная печь: $K = 34,2$, $T_1 = 22\,000$ с, $T_2 = 100$ с, $\tau = 20$ с.

Для проведения опытов использован следующий график уставок: $300\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 330\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 240\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow 300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для смены уставки температура должна удерживаться 30 мин в окрестности задания, равной 5 % разности текущей и предыдущей уставки. Для модели незагруженной печи СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И4 были подобраны значения коэффициентов ПИ-регулятора: $K_p = 0,2422$, $K_i = 1,504 \cdot 10^{-4}$. Для модели пустой печи СНОЛ 40/1200: $K_p = 1$, $K_i = 1,504 \cdot 10^{-4}$.

База правил реализована при помощи средств пакета Matlab – это S-функция *rb_PI* (см. рис. 1). Она имеет шесть входов: текущее задание по температуре; задержанный на 1 с, на Z с и на $2Z$ с сигнал по выходу ОУ; задержанный на 1 с сигнал управления до и после ограничителя управляющего воздействия. Первые пять входов формируют вектор X , используемый в дальнейшем

для вычисления значений коэффициентов регулятора. Вызов базы правил происходит раз в Z с.

Каждое правило представляет собой условие, отражающее конкретную ситуацию на ОУ, и следствие, представляющее собой величину шага α для метода градиентного спуска. С помощью этого метода производится настройка коэффициентов $\omega_{ij}^{(q)}$ и $b_j^{(q)}$ полинома, применяемого для вычисления параметров ПИ-регулятора с целью минимизации текущего рассогласования между заданием и выходом ОУ (\tanh – гиперболический тангенс):

$$K_p = \sum_{i=1}^{15} w_{1i}^{(2)} \tanh \left(\sum_{j=1}^5 w_{ij}^{(1)} x_j + b_i^{(1)} \right) + b_1^{(2)};$$

$$K_i = \sum_{i=1}^{15} w_{2i}^{(2)} \tanh \left(\sum_{j=1}^5 w_{ij}^{(1)} x_j + b_i^{(1)} \right) + b_2^{(2)}.$$

В результате экспериментов выявлено, что для корректной работы надстройки необходимо, чтобы в течение конкретного переходного процесса в период до входа контролируемой величины в 10 % окрестность новой уставки, было проведено минимум 15 измерений температуры через промежутки времени Z с. Поэтому при работе с моделями печей СНОЛ-1,6.2,5.1/11-И4 использовалось Z , равное 20 с, а для СНОЛ 40/1200 – 10 с.

В структуре базы правил можно выделить общее правило для определения допустимости настройки регулятора, а также блоки правил для коррекции его параметров в условиях управления нагревом и остыванием печи.

Корректировать K_p , K_i следует, если сигнал управления, формируемый ПИ-регулятором, находится в допустимых пределах $[0; 100]$. Иначе коэффициенты регулятора приобретут излишне высокое (или низкое) значение.

Если идет процесс нагрева и рассогласование находится в пределах от 10 до 80 % разницы между текущим заданием и предыдущим и:

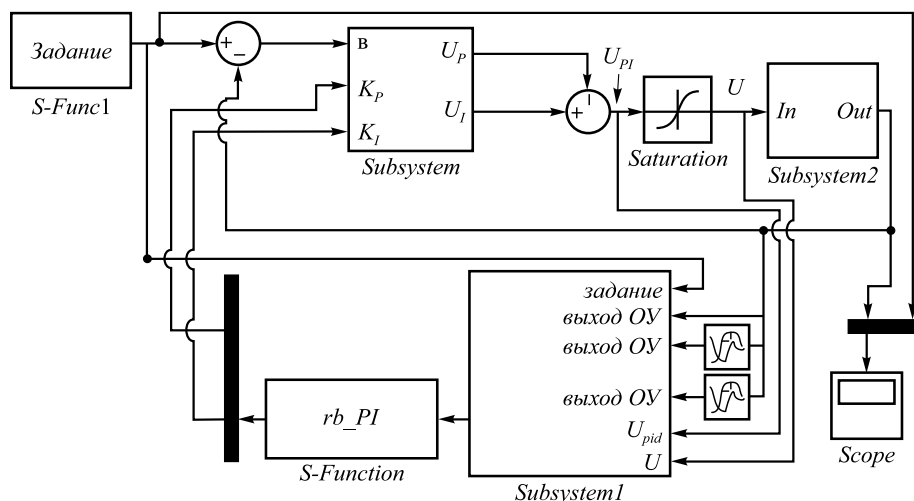


Рис. 1 Реализация схемы управления с базой правил

Fig. 1. Control scheme implementation based on the rule base

- скорость нарастания сигнала температуры менее амплитуды шума N в установившемся режиме, определяемой при первичном запуске системы за Z с, то переходный процесс достиг своего пика раньше необходимого и следует корректировать коэффициент K_p в сторону увеличения. Величина α в данном случае должна быть на три порядка меньше текущего значения K_p ;
- скорость нарастания сигнала температуры более допустимой по технологической инструкции, то K_p корректируется в сторону уменьшения. Величина α должна быть на четыре порядка меньше текущего значения K_p .

Если предыдущий блок условий не был вызван и рассогласование составляет менее 20 % разницы текущего задания и предыдущего, то:

- при очередной смене задания определялось, составляет ли рассогласование e менее 3 % разницы между текущим заданием и предыдущим в течение не менее Z^2 с. Если система стабильна, то текущее задание и сигнал управления сохранялись в специальный массив. Такие воздействия принимались как эталонные для соответствующих заданий. В течение любого переходного процесса при первом пересечении задания фиксировалось значение сигнала управления в i -канале. Если это значение меньше эталонного, K_I следует увеличивать, а если больше – уменьшать. Величина α должна быть на семь порядков меньше текущего значения K_I ;
- если принято решение об увеличении K_I и перерегулирование при этом оказалось более 5 % разницы между текущим заданием и предыдущим, то принимается решение об уменьшении K_p . Величина α в данном случае должна быть на четыре порядка меньше значения K_p ;

- если переходный процесс уже достиг своего первого максимума после пересечения задания, скорость изменения температуры за последние $2Z$ с менее N град., а текущее рассогласование больше 5 % разницы между текущим заданием и предыдущим, то K_I следует уменьшать. В противном случае K_I следует увеличивать. Величина α должна быть на семь порядков меньше текущего значения K_I .

В случае остывания печи предложен следующий набор правил:

- если скорость убывания температуры оказалась менее N град. за $2Z$ с, а ошибка – более 10 % разницы между текущим заданием и предыдущим и график температуры в течение текущего переходного процесса еще не пересекал задание, то K_I следует увеличивать. Величина α должна быть на семь порядков меньше текущего значения K_I ;
- если график температуры пересекал задание, температура в текущий момент больше задания, а ошибка составляет более 5 % разницы между текущим заданием и предыдущим, то принималось решение об уменьшении K_p . Величина α должна быть на четыре порядка меньше текущего значения K_p ;
- такое же решение принималось, если график температуры пересек задание один раз, а ошибка в текущий момент более 5 % разницы между текущим заданием и предыдущим. Величина α в данном случае должна быть на четыре порядка меньше текущего значения K_p .

Каждый из экспериментов для каждой из печей имел следующую структуру: 12 смен задания для модели пустой печи → 12 смен задания для модели загруженной печи → 12 смен задания для модели пустой печи.

Результаты моделирования для схем управления с базой правил и обычным ПИ-регулятором с использованием моделей печи СНОЛ-1,6,2,5,1/11-И4 приведены на рис. 2, 3 (1 – момент начала использования модели

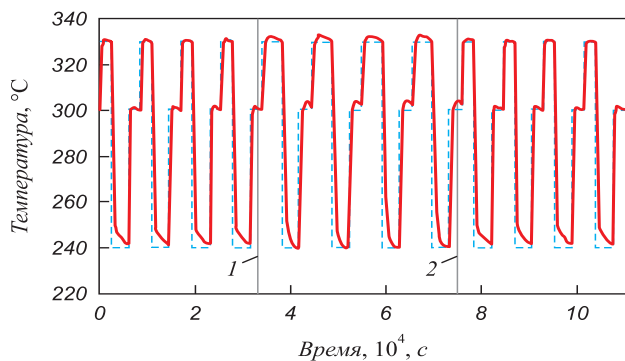


Рис. 2. Результаты для моделей печи СНОЛ-1,6,2,5,1/11-И4 (ПИ-регулятор):
— выход ОУ; --- задание

Fig. 2. Obtained experimental results from control system with PI-controller for SNOL-1,6,2,5,1/11-И4 furnace models:

— exit of control objects OY; --- task

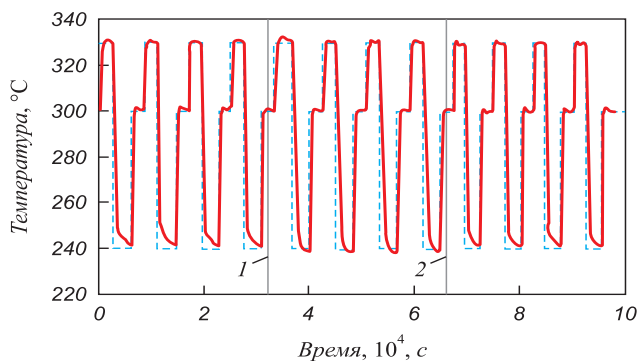


Рис. 3. Результаты для моделей печи СНОЛ-1,6,2,5,1/11-И4 (база правил):
— выход ОУ; --- задание

Fig. 3. Obtained experimental results from control system with PI-controller with self-adjustment for SNOL-1,6,2,5,1/11-И4 furnace models:

— exit of control objects OY; --- task

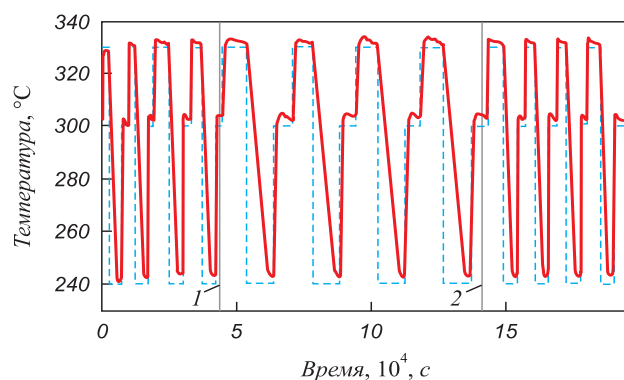


Рис. 4. Результаты для моделей печи СНОЛ 40/1200 (ПИ-регулятор):
— выход ОУ; --- задание

Fig. 4. Obtained experimental results from control system with PI-controller for SNOL 40/1200 furnace models:
— exit of control objects OY; --- task

загруженной печи, 2 – момент возврата к модели пустой печи).

Перерегулирование при использовании модели загруженной печи для обычного ПИ-регулятора составило 8,3 % для процессов нагрева и 2 % для процессов охлаждения, для системы с базой правил – 2,5 % для нагрева и 2,2 % для охлаждения. Общее время опыта для системы с базой правил составило 27,21 ч, а для обычного ПИ-регулятора – 30,5 ч (экономию по времени на выполнение графика задания 10,8 %).

Результаты моделирования для схем управления с базой правил и обычным ПИ-регулятором с использованием моделей печи СНОЛ 40/1200 приведены на рис. 4, 5 (1 – момент начала использования модели загруженной печи, 2 – момент возврата к модели пустой печи).

Перерегулирование для переходных процессов при использовании модели загруженной печи для обычного ПИ-регулятора составило 11 % для процессов нагрева, для системы с базой правил – 4 % для процессов нагрева. Общее время опыта для системы с базой правил составило 40,56 ч, а для обычного ПИ-регулятора – 53,49 ч (экономию по времени на выполнение графика задания 24,1 %).

Выводы. Предложенная база правил настройки параметров ПИ-регулятора проверена на моделях нагревательных объектов с различной динамикой.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование оптимизатора параметров ПИ-регулятора, построенного на основе данной базы правил для учета нелинейных свойств ОУ, позволило сократить перерегулирование и время, требуемое на выполнение графика заданий. Таким образом, в условиях реального производства на данном агрегате может быть интенсифицирован выпуск продукции и сокращено удельное энергопотребление.

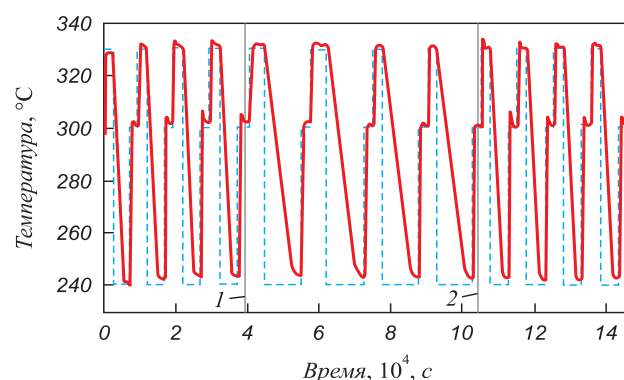


Рис. 5. Результаты для моделей печи СНОЛ 40/1200 (база правил):
— выход ОУ; --- задание

Fig. 5. Obtained experimental results from control system with PI-controller with self-adjustment for SNOL 40/1200 furnace models:
— exit of control objects OY; --- task

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Vilanova R., Visioli A. PID Control in the Third Millennium. Lessons Learned and New Approaches. – London: Springer, 2012. – 602 p.
2. Astrom K. J., Hagglund T., Hang C. C., Ho W. K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers – A survey // Control Engineering Practice. 1993. Vol. 1. No. 4. P. 699 – 714.
3. Pfeiffer B.-M. Towards “plug and control”: self-tuning temperature controller for PLC // International journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2000. No. 14. P. 519 – 532.
4. Ziegler J., Nichols N. Optimum settings for automatic controllers. 1942. No. 65. P. 759 – 768.
5. Alexandrov A.G., Palenov M.V. Self-tuning PID-I controller. Preprints of the 18th IFAC World Congress. 2 Sept. 2011. P. 3635 – 3640.
6. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // Control Systems Magazine. 2006. No. 26(1). P. 42 – 54.
7. Еременко Ю.И., Глушенко А.И. О решении неформализуемых и плохоформализуемых задач методами иммунных алгоритмов // Информационные технологии. 2011. № 7. С. 2 – 7.
8. Zhao Z.Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy gain scheduling of PID controllers // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. 1993. Vol. 23. No. 5. P. 1392 – 1398.
9. Anderson K.L., Blankenship G.I., Lebow L.G. A rule-based adaptive PID controller : Proc. 27th IEEE Conf. Decision. Control, 1988. P. 564 – 569.
10. Gaing Z. L. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system // Energy Conversion, IEEE Transactions on. 2004. Vol. 19. No. 2. P. 384 – 391.
11. Кудинов Ю.И., Келина А.Ю. Упрощенный метод определения параметров нечетких ПИД-регуляторов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 1. С. 12 – 22.
12. Unal M., Ak A., Topuz V., Erdal H. Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms. – London: Springer, 2013. – 85 p.
13. Интеллектуальные системы автоматического управления / Под. ред. И.В. Макарова, В.М. Лохина. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 576 с.
14. Nesler C.G. Experiences in applying adaptive control to thermal processes in buildings : Proc. Amer. Control Conf., Boston, MA, 1985. P. 1535 – 1540.
15. Tan S.-H., Hang C.-C., Chai J.-S. Gain scheduling: from conventional to neuro-fuzzy // Automatica. 1997. Vol. 33. No. 3. P. 411 – 419.

Поступила 3 декабря 2014 г.

DEVELOPMENT OF THE DATABASE SETTINGS RULES OF PI-REGULATORS AT CONTROL OF HEATING METALLURGICAL PLANTS

Yu.I. Eremenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair
“Automation and Information Systems”

D.A. Poleshchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of
the Chair “Automation and Information Systems”

A.I. Glushchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of
the Chair “Automation and Information Systems”

(strondutt@mail.ru)

Sary Oskol Technological Institute of National University of Science and Technology “MISiS” (42, Makarenko, Sary Oskol, Belgorod Region, 309516, Russia)

Abstract. The problem of a rule base development containing PI-controller setter’s experience is considered. As a result, it is decided to divide such base into several blocks, which are responsible for P-component and I-component parameters adjustment for cooling and heating processes respectively. The conditions when rules should be activated were determined. They depend on the plant parameters at the moment. Proposed rule base is a part of PI-controller parameters tuner. It was tested on models of two real heating furnaces with different parameters. According to the conducted experiments, a conclusion could be made that overshoot caused by plant nonlinearity is lower for the control system with a proposed tuner in comparison with the system with a conventional PI-controller. That leads to saving of about 24 % of time needed to follow a setpoint schedule. So PI-controller parameters tuner usage based on developed rule base allows to take into consideration plant nonlinearity, to intensify production and to reduce production costs.

Keywords: PI-controller, rule base, controller parameters tuning, heating furnace, mathematical modeling, adaptive control, energy efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-11-846-850

REFERENCES

1. Vilanova R., Visioli A. PID Control in the Third Millennium. *Lessons Learned and New Approaches*. London: Springer, 2012, 602 p.
2. Astrom K. J., Hagglund T., Hang C. C., Ho W. K. Automatic tuning and adaptation for PID controllers – A survey. *Control Engineering Practice*. 1993, vol. 1, no. 4, pp. 699–714.
3. Pfeiffer B.-M. Towards “plug and control”: self-tuning temperature controller for PLC. *International journal of Adaptive Control and Signal Processing*. 2000, no. 14, pp. 519–532.
4. Ziegler J., Nichols N. *Optimum settings for automatic controllers*. 1942, no. 65, pp. 759–768.
5. Alexandrov A.G., Palenov M.V. Self-tuning PID-I controller. *Preprints of the 18th IFAC World Congress*. 2 Sept. 2011, pp. 3635–3640.
6. Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art. *Control Systems Magazine*. 2006, no. 26(1), pp. 42–54.
7. Eremenko Yu.I., Glushchenko A.I. On the solution of non-formalizable and badly formalized problems by immune algorithms. *Informatsionnye tekhnologii*. 2011, no. 7, pp. 2–7. (In Russ.).
8. Zhao Z.Y., Tomizuka M., Isaka S. Fuzzy gain scheduling of PID controllers. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*. 1993, vol. 23, no. 5, pp. 1392–1398.
9. Anderson K.L., Blankenship G.I., Lebow L.G. A rule-based adaptive PID controller: *Proc. 27th IEEE Conf. Decision. Control*, 1988, pp. 564–569.
10. Gaing Z. L. A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*. 2004, vol. 19, no. 2, pp. 384–391.
11. Kudinov Yu.I., Kelina A.Yu. Simplified method of determining the parameters of indistinct PID controllers. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2013, no. 1, pp. 12–22. (In Russ.).
12. Unal M., Ak A., Topuz V., Erdal H. *Optimization of PID Controllers Using Ant Colony and Genetic Algorithms*. London: Springer, 2013. 85 p.
13. *Intellektual’nye sistemy avtomaticheskogo upravleniya* [Intelligent automatic control systems]. Makarov I.V., Lokhin V.M. eds. Moscow: FIZMATLIT, 2001. 576 p. (In Russ.).
14. Nesler C.G. *Experiences in applying adaptive control to thermal processes in buildings: Proc. Amer. Control Conf., Boston, MA*, 1985, pp. 1535–1540.
15. Tan S.-H., Hang C.-C., Chai J.-S. Gain scheduling: from conventional to neuro-fuzzy. *Automatica*. 1997, vol. 33, no. 3, pp. 411–419.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Researches (grant no.13-08-00532-a, 15-07-0609215) and the Fund of the President of the Russian Federation (grant no. 14.Y30.15.4865-MK).

Received December 3, 2014