

УДК 681.516.52

Синтез системы управления многосвязным объектом с помощью генетического алгоритма на примере проточного котла^{*}

Н.Н. КУЦЫЙ¹, Н.Д. ЛУКЬЯНОВ²

¹ 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский государственный технический университет,
д. т. н., профессор, e-mail: kucynnp@mail.ru

² 664074, РФ, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Иркутский государственный технический университет,
аспирант, e-mail: lukyanov.n@gmail.com

Представлен синтез трех вариантов системы управления фактической мощностью и температурой среды многосвязного объекта на примере проточного пылеугольного котла П-50. Каждая из исследуемых схем управления построена на использовании трех взаимосвязанных ПИ-регуляторов. Первая схема построена без использования дополнительных звеньев, вторая – на применении корректирующих звеньев, для обеспечения полной автономности выходных сигналов, третья – одного корректирующего звена для обеспечения статической автономности. Для каждой из сформированных схем решена задача параметрической оптимизации с помощью классического генетического алгоритма, использующего в качестве оператора отбора родителей рулеточный метод, а для перехода особей между поколениями – элитарный отбор. В качестве критерия настройки использованы такие прямые показатели качества переходного процесса, как время регулирования, характеризующее быстродействие системы, и перерегулирование, по величине которого можно оценить запас устойчивости системы. Представлены переходные процессы, полученные в результате оптимизации, проведен их сравнительный анализ и сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: многосвязная система, ПИ-регулятор, генетические алгоритмы, классический генетический алгоритм, прямые показатели качества, проточный котел, автономные системы, неавтономные системы

ВВЕДЕНИЕ

Развитие инструментов искусственного интеллекта позволяет все шире применять их для решения различных оптимизационных задач, возникающих при проектировании систем автоматического управления [1–3]. Усложнение же самих объектов управления вынуждает исследователей прибегать к все более громоздким схемам регулирования. Вместе с тем, одной из тенденций современной теории синтеза регуляторов является стремление улучшить качество переходного процесса, используя при этом проверенные и хорошо зарекомендовавшие себя устройства (ПИ-, ПИД-регуляторы) [4]. В данной статье предлагается использование генетического алгоритма для решения задачи параметрической оптимизации многосвязного объекта по прямым показателям качества, используя в качестве устройства управления несколько ПИ-регуляторов. Для структурного синтеза применяется подход, широко используемый для многосвязных систем – развязка собственных движений системы с помощью корректирующих звеньев и в противовес к нему – неавтономная система, настройка которой традиционными методами наталкивается на некоторые трудности [5].

^{*} Статья получена 20 января 2014 г.

1. ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Наличие внутренних взаимосвязей в объекте управления характерно для многих технических системах, к числу которых, несомненно, относятся прямоточные котлы. Рассмотрим более подробно многосвязную систему регулирования мощности энергоблока и температуры среды в поперечном сечении тракта котла применительно к дубль-блоку пылеугольного котла П-50 мощностью 300 МВт, на энергоблоке № 3 Каширской ГРЭС.

Выходными величинами в данном случае выступают приведенная фактическая мощность P_Φ и фактическая температура среды в поперечном сечении котла Θ_Φ . Входами объекта управления здесь являются расход топлива B и расход питательной воды Y . Также имеется вспомогательный параметр – излучение факела Φ , инерционность которого существенно ниже по сравнению с каналами $B-\Theta$ и $Y-\Theta$, что позволяет быстрее обрабатывать «топливные» возмущения f_B .

Структурная схема исследуемой системы представлена на рис. 1:

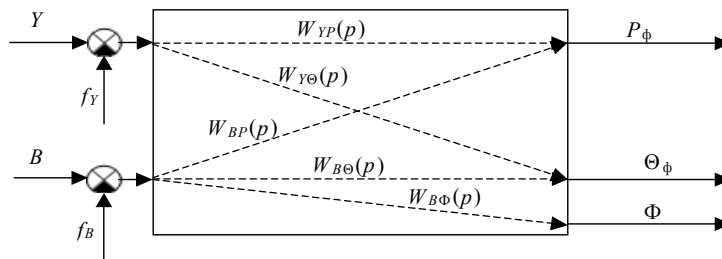


Рис. 1. Структурная схема прямоточного котла П-50

На данной схеме f_Y – возмущение по каналу питательной воды, $W_{YP}(p)$ – передаточная функция объекта управления по каналу $Y-P$, $W_{Y\Theta}(p)$ – передаточная функция по каналу $Y-\Theta$, $W_{BP}(p)$ – передаточная функция по каналу $B-P$, $W_{B\Theta}(p)$ – передаточная функция по каналу $B-\Theta$ и $W_{B\Phi}(p)$ – передаточная функция по каналу $B-\Phi$.

Процессы, происходящие в системе, можно описать с помощью следующих выражений:

$$\begin{aligned} P(t) &= W_{YP}(p) \cdot (Y(t) - f_Y(t)) + W_{BP}(p) \cdot (B(t) - f_B(t)); \\ \Theta(t) &= W_{Y\Theta}(p) \cdot (Y(t) - f_Y(t)) + W_{B\Theta}(p) \cdot (B(t) - f_B(t)); \\ \Phi(t) &= W_{B\Phi}(p) \cdot (B(t) - f_B(t)). \end{aligned}$$

Передаточные функции объекта управления, полученные в результате обработки экспериментальных кривых разгона, имеют следующие параметры [6]:

$$\begin{aligned} W_{YP}(p) &= \frac{729,6p}{(1+240p)^2}, \quad W_{Y\Theta}(p) = \frac{-2,97}{(1+98,5p)^2}, \quad W_{BP}(p) = \frac{2,46(1+33,48p)}{(1+35,64p)^4}, \\ W_{B\Theta}(p) &= \frac{2,89(1+46,2p)}{(1+37,8p)^3(1+74,2p)}, \quad W_{B\Phi}(p) = \frac{12,88p+1}{(11,76p+1)^3(1+5,88p)}. \end{aligned}$$

Так как в данных передаточных функциях отсутствует «чистое» запаздывание, а также в связи с большой инерционностью передаточных функций, здесь вполне оправдано применение ПИ-регуляторов. Исходя из типовых решений для такого типа котлов, принято [7] применение трех регуляторов – регулятора мощности $W_P(p)$, регулятора расхода топлива $W_B(p)$ и корректора температуры $W_{кор}(p)$. Таким образом, задача синтеза системы управления данной системой сводится к определению настроек регуляторов по отношению к принятому критерию качества.

Для определения качества переходных процессов сформируем критерий, учитывающий как быстродействие системы, оцениваемое с помощью времени регулирования, так и запас устойчивости системы, определяемый по величине перерегулирования для обеих выходных координат [8]:

$$D = (\alpha_1 t_p^P + \alpha_2 \sigma_P) + (\beta_1 t_p^\Theta + \beta_2 \sigma_\Theta), \quad (1)$$

где t_p^P – время регулирования, σ_P – перерегулирование для переходного процесса по мощности; t_p^Θ – время регулирования, σ_Θ – перерегулирование для переходного процесса по температуре; α_k и β_k , $k = 1, 2$ – весовые коэффициенты, причем $\sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1$ и $\sum_{k=1}^2 \beta_k = 1$.

2. СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для эффективного управления такого рода системами возможно применение нескольких различного рода подходов [6], а именно:

- настройка связанной системы, когда каждый из каналов управляется своим регулятором, причем регулятор расхода и корректор температуры соединены последовательно, и управляющий сигнал регулятора мощности также поступает на вход регулятора расхода (рис. 2, а).
- обеспечение полной автономности выходных координат по входным воздействиям (рис. 2, б);
- обеспечение статической автономности по входным воздействиям с помощью введения жестких корректирующих звеньев (рис. 2, в).

На рис. 2 представлены три рассматриваемых структурных схемы системы управления данным объектом, обозначенным как $W_{об}(p)$.

Для расчета передаточных функций корректирующих звеньев на рис. 2, б и в воспользуемся следующими соотношениями [9]:

$$K_1(p) = -W_P(p)W_{Y\Theta}(p).$$

Для определения передаточной функции корректирующего звена $K_2(p)$ необходимо найти передаточную функцию системы для сигнала u_B относительно задающего сигнала $\Delta\Theta(t)$. После несложных преобразований получим

$$\frac{u_B(t)}{\Delta\Theta(t)} = \frac{W_B(p)W_{кор}(p)}{1 + W_{B\Phi}(p)W_B(p)},$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования. И, далее, применяя подход, изложенный в [9],

получим передаточную функцию корректирующего звена $K_2(p)$:

$$K_2(p) = -\frac{W_B(p)W_{кор}(p)W_{BP}(p)}{1 + W_{B\Phi}(p)W_B(p)}.$$

Отметим, что обеспечение двусторонней статической автономности для данной системы невозможно ввиду того, что $W_{YP}(0) = 0$. Коэффициент усиления корректирующего звена (рис. 2, в) определен следующим образом [9]:

$$K = -\frac{W_{Y\Theta}(0)}{W_{B\Theta}(0)} = -\frac{2,46}{2,89} = -0,851.$$

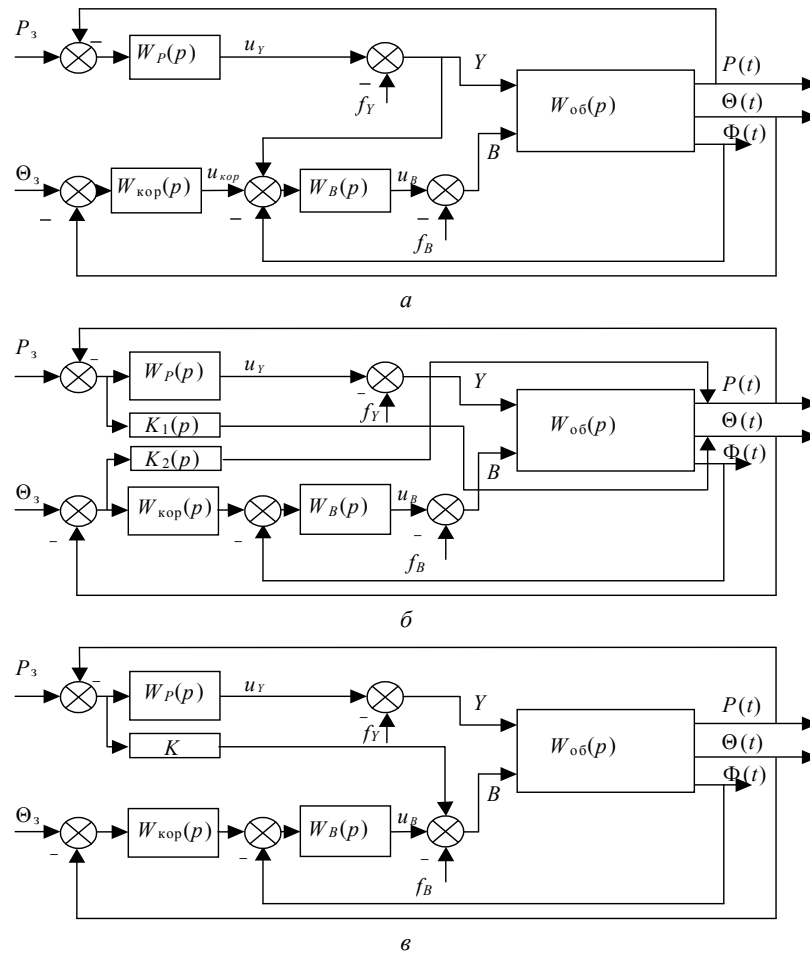


Рис. 2. Варианты структурных схем систем управления

Далее для каждой из сформированных систем управления необходимо решить задачу параметрической оптимизации. Для этого воспользуемся классическим генетическим алгоритмом [10], использующим в качестве метода отбора – рулеточный метод, а в качестве способа перехода между поколениями – элитарный способ. Параметры генетического алгоритма, исходя из предварительных исследований, приняли следующие значения: количество особей в популяции $N = 100$; вероятность скрещивания $p_c = 0,6$; вероятность мутации $p_m = 0,5$.

Примем для определенности следующие границы изменения параметров: верхняя граница $h_j = 300$; нижняя граница $d_j = 0$; шаг изменения параметра $\delta_j = 0,0001$; $j = 1(1)6$. Таким образом, длина каждой из хромосом, равна [11]:

$$L_j = \left\lceil \log_2 \left(\frac{h_j - d_j}{\delta_j} \right) \right\rceil = \left\lceil \log_2 \left(\frac{300 - 0}{0,0001} + 1 \right) \right\rceil = 22 \text{ бита; } j = 1(1)6.$$

Входные воздействия в данном случае представлены во всех случаях единичной ступенчатой функцией, т. е. $P_3 = \Theta_3 = f_Y = f_B = 1(t)$. Так как весовые коэффициенты в данном критерии назначаются исходя из реальных требований к переходным процессам, а для систем такого типа приоритетным является обеспечение запаса устойчивости, следовательно, значения коэффициентов α_k и β_k , $k = 1, 2$, с учетом масштаба, назначены следующим образом: $\alpha_1 = 0,001$; $\alpha_2 = 0,999$; $\beta_1 = 0,001$; $\beta_2 = 0,999$.

На рис. 3 представлены переходные процессы выходных координат $P(t)$ и $\Theta(t)$, полученные в результате настройки каждой из описанных выше схем по критерию (1). На данном рис. 2, а соответствуют графики под цифрой 1, рис. 2, б – 2 и рис. 2, в – 3.

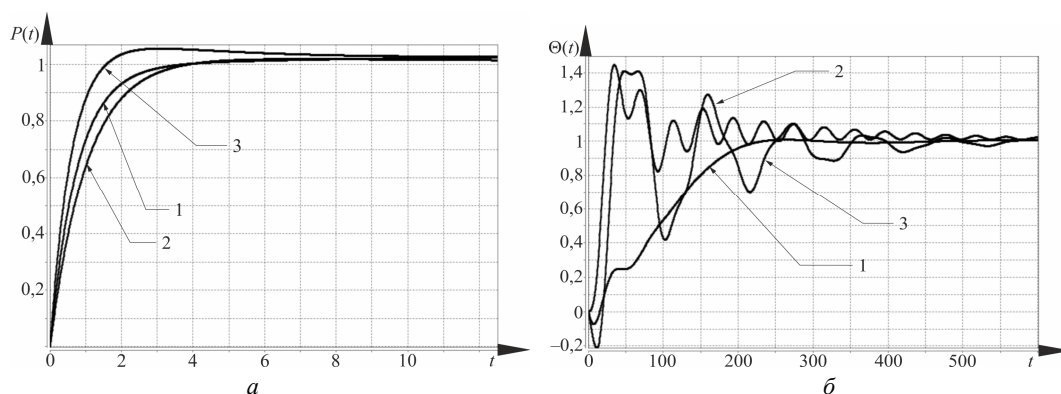


Рис. 3. Переходные процессы выходных координат $P(t)$ и $\Theta(t)$

В таблице представлены прямые показатели качества переходных процессов, включая декремент затухания χ для каждой из выходных координат.

Прямые показатели качества

Схема	Значение критерия	Прямые показатели					
		t_p^P	σ_P	χ_P	t_p^Θ	σ_Θ	χ_Θ
2а	$D = 0,276$	3,98 с	2,3 %	2,3	377,4	1 %	2
2б	$D = 0,845$	2,3 с	0 %	1	483,2	39,9 %	1
2в	$D = 1,133$	10,86 с	6,5 %	16,25	552,1	41 %	1,52

Из рис. 3 и данных таблицы следует, что лучшие результаты как по абсолютному значению критерия, так и по совокупности прямых показателей качества обеспечила схема (рис. 2, а), настройка которой возможна лишь с помощью алгоритмов, не использующих градиент целевого функционала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлено три варианта системы управления прямоточным котлом П-50, построенных на применении трех взаимосвязанных ПИ-регуляторов. Для каждой из схем решена задача параметрической оптимизации по прямым показателям качества. Установлено, что подходы, основанные на обеспечении автономности сигналов, ухудшают качество переходных процессов, тогда как неавтономная система обеспечивает приемлемое качество регулирования не только по мощности $P(t)$, но и по температуре $\Theta(t)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ауман А. PID Parameters optimization using genetic algorithm technique for electro hydraulic servo control system // Intelligent Control and Automation. – 2011. – №2. – Р. 69–76.
- [2] Труханов К.А., Попов Д.Н. Выбор оптимальных параметров гидропривода вентилятора для системы охлаждения двигателя транспортного средства [Электронный ресурс] // Наука и образование. – М., 2013. – № 7. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/590873.html> (дата обращения: 14.01.2014).

- [3] Slavov T., Roeva O. Application of genetic algorithm to tuning a PID controller for glucose concentration control [Электронный ресурс] // WSEAS Transaction on Systems. – 2012. – Vol. 11, № 7. – P. 223–233. – URL: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf> (дата обращения: 10.01.2014).
- [4] Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 86–97.
- [5] Адаптивные системы идентификации / А.Г. Кику, В.И. Костюк, В.Е. Краскевич, А.И. Сильверстов, С.В. Шпит; под ред. В.И. Костюка. – Киев: Техника, 1975. – 288 с.
- [6] Анализ многосвязной системы регулирования мощности и температуры энергоблока с прямоточным котлом / В.А. Биленко, Н.И. Давыдов, В.З. Чесноковский, Н.П. Росич // Теплоэнергетика. – 1987. – № 10. – С. 11–17.
- [7] Рекомендации по модернизации систем автоматического регулирования прямоточных котлов действующих энергоблоков с целью обеспечения их работы в широком диапазоне режимов / Давыдов Н.И. и др. – М.: Союзтехэнерго, 1978.
- [8] Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 5 т.: т. 3: Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Ергупова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 616 с.
- [9] Морозовский В.Т. Многосвязные системы автоматического регулирования. – М.: Энергия, 1970. – 288 с.
- [10] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с пол. И.Д. Рудинского. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 452 с.
- [11] Грэхем Р., Кнут Д., Паташник О. Конкретная математика. Основание информатики: пер. с англ. – М.: Мир, 1998. – 703 с.

Куцый Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор Иркутского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – теория автоматического управления, теория оптимального управления, системы искусственного интеллекта. Имеет более 150 публикаций. E-mail: kucyinn@mail.ru

Лукьянов Никита Дмитриевич, аспирант кафедры автоматизированных систем Иркутского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – генетические алгоритмы. Имеет более 10 публикаций. E-mail: lukyanov.n@gmail.com

Control system synthesis by a multivariable object using the genetic algorithm (on the example of the once-through boiler)*

N.N. KUTSYI¹, N.D. LUKYANOV²

¹ Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, D.Sc.(Eng.), professor, e-mail: kucyinn@mail.ru

² Irkutsk State Technical University, 83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation, post-graduate student, e-mail: lukyanov.n@gmail.com

This article presents a synthesis of three versions of a system to control the actual power and the temperature of the multivariable object environment on the example of the once-through boiler P -50. To construct each of the control schemes three related PI controllers are used. The first scheme is constructed without the use of additional units, the second scheme uses correcting units to provide full autonomy of output signals, and the third scheme includes one correcting unit to provide static autonomy. The problem of parametric optimization is solved for each of the proposed schemes by means of a classical genetic algorithm using the roulette method as an operator of parent selection and the elite selection as an operator of transition of individuals between generations. Such direct measures of transition quality as the regulation time characterizing the system performance and the overshoot by the value of which the stability margin of the system can be estimated are used as a criterion of adjustment. Transients resulting from optimization are presented, their comparative analysis is made and conclusions are drawn.

Keywords: multiply connected system, PI controller, genetic algorithms, classical genetic algorithm, direct measures of quality, once-through boiler, autonomous systems, non-autonomous system

REFERENCES

- [1] Ayman A. PID parameters optimization using genetic algorithm technique for electro hydraulic servo control system. *Intelligent Control and Automation*, 2011, no. 2, pp. 69–76.
- [2] Truhanov K.A., Popov D.N. Vybor optimal'nyh parametrov gidroprivoda ventiljatora dlja sistemy ohlazhdenija dvigatelja transportnogo sredstva [Selection of optimum parameters for the hydraulic drive of a fan of a vehicle's engine cooling

* Manuscript received on January 20, 2014.

- system]. *Nauka i obrazovanie – Science and Education*, 2013, no. 7. Available at: <http://technomag.edu.ru/doc/590873.html> (Accessed 14 January 2013). doi: 10.7463/0713.0590873
- [3] Slavov T., Roeva O. Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control. *WSEAS Transaction on Systems*, 2012, Vol. 11, no. 7, pp. 223-233. Available at: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf> (Accessed 10 January 2013).
- [4] Denisenko V. PID-regulatory: voprosy realizatsii. Chast 1 [PID controllers: implementation issues. Pt. 1]. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii – Modern Automation Technology*, 2007, no. 4, pp. 86-97.
- [5] Kiku A.G., Kostiuk V.I., Kraskevich V.E., Silverstov A.I., Shpit S.V. *Adaptivnye sistemy identifikatsii* [Adaptive system identification]. Kiev, Tehnika Publ., 1975. 288 p.
- [6] Bilenko V.A., Davydov N.I., Chesnokovsky V.Z., Rosich N.P. Analiz mnogovsviaznoi sistemy regulirovaniia moshchnosti i temperatury energobloka s priamotocnym kotlom [Analysis of multiply connected power and temperature control power generating units with once-through boiler]. *Teploenagretika – Thermal Engineering*, 1987, no. 10, pp. 11-17.
- [7] Davydov N.I. et al. *Rekomendatsii po modernizatsii sistem avtomaticheskogo regulirovaniia priamotocnykh kotlov deistvuiushchikh energoblokov s tsel'iu obespecheniia ikh raboty v shirokom diapazone rezhimov* [Recommendations on the modernization systems of automatic control ramjet boilers operating power units to ensure that they work in a wide range of conditions]. Moscow, Soiuztekhnenergo Publ., 1978.
- [8] Pupkov K.A., Ergupov N.D. (Eds.) *Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniia: uchebnik v 5-tt.; 2-e izd., pererab. i dop.: t. 3: Sintez regulatorov sistem avtomaticheskogo upravleniia* [Methods of classical and modern control theory: Tutorial in 5 vols, vol. 3: Synthesis of regulators of automatic control systems]. Moscow, MSTU Bauman Publ., 2004. 616 p.
- [9] Morozovskii V.T. *Mnogovsviaznye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniia* [Multiply the automatic control system]. Moscow, Energiya Publ., 1970. 288 p.
- [10] Rutkovskaja D., Pilin'skij M., Rutkovskij L. *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy* [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]. Moscow, Gorjachaja linija – Telekom Publ., 2006. 452 p.
- [11] Graham R.L., Knuth D.E., Patashnik O. *Concrete Mathematics: a foundation for computer science*. Addison-Wesley Publ. Company, 1990. 625 p. (Russ. ed.: Grekhem R., Knut D., Patashnik O. *Konkretnaia matematika. Osnovanie informatiki*. Moscow, Mir Publ., 1998. 703 p.).