НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. ISSN 1994-0408

Параметрическая оптимизация системы управления насосной станцией с помощью генетического алгоритма

08, август 2014

DOI: 10.7463/0814.0721172

Дунаев М. П.[1], Куцый Н. Н.[1], Лукьянов Н. Д.[1,a]

УДК 681.515.8

[1]Россия, Иркутский Государственный технический университет

[a]lukyanov.n@gmail.com

В статье рассматривается система автоматического управления насосной станцией второго подъема на основе весьма распространенного ПИД-регулятора. Представлена задача параметрической оптимизации данной системы по квадратичному критерию, а также по критерию, содержащему прямые показатели качества (время регулирования и перерегулирование). Поставленные задачи решены с помощью классического генетического алгоритма, и проведен сравнительный анализ полученных решений. В заключение приведены переходные процессы, полученные в результате работы алгоритма, а также представлены доказательства оптимальности полученного решения.

Ключевые слова: генетические алгоритмы, ПИД-регулятор, прямые показатели качества, насосная станция.

Введение

В последнее время развитие мировой экономики связано со значительным расходом энергоресурсов, что вынуждает проектировщиков систем автоматического регулирования (САР) прибегать к созданию все более высокотехнологичных САР. Настоящая работа посвящена решению задачи параметрической оптимизации для автоматической системы стабилизации расхода жидкости насосной станции второго подъема с помощью генетического алгоритма (ГА), что позволяет расширить класс применяемых критериев качества.

Решению задачи параметрической оптимизации различных технических систем, включающих в себя в качестве управляющего элемента ПИД-регулятор, посвящены работы как отечественных, так и зарубежных авторов [1-7]. Основное внимание зарубежных исследователей сосредоточено либо на сравнительном анализе различных реализаций генетического алгоритма [1, 2], либо на применении известных вариантов генетического алгоритма для оптимизации вполне конкретных технических систем [3-5]. Статьи отечественных авторов по данной тематике также исследуют эффективность применения генетического алгоритма по сравнению с традиционными методами оптимизации [6], либо направлены на улучшение поисковых свойств генетического алгоритма [7]. Отличие данной

статьи от вышеперечисленных работ заключается в использовании в качестве объекта управления насосной станции второго подъема, а также в применении критерия оптимизации, основанного на прямых показателях качества.

Функциональная схема насосной станции второго подъема с автоматической стабилизацией расхода жидкости, представлена на рисунке 1 [8].

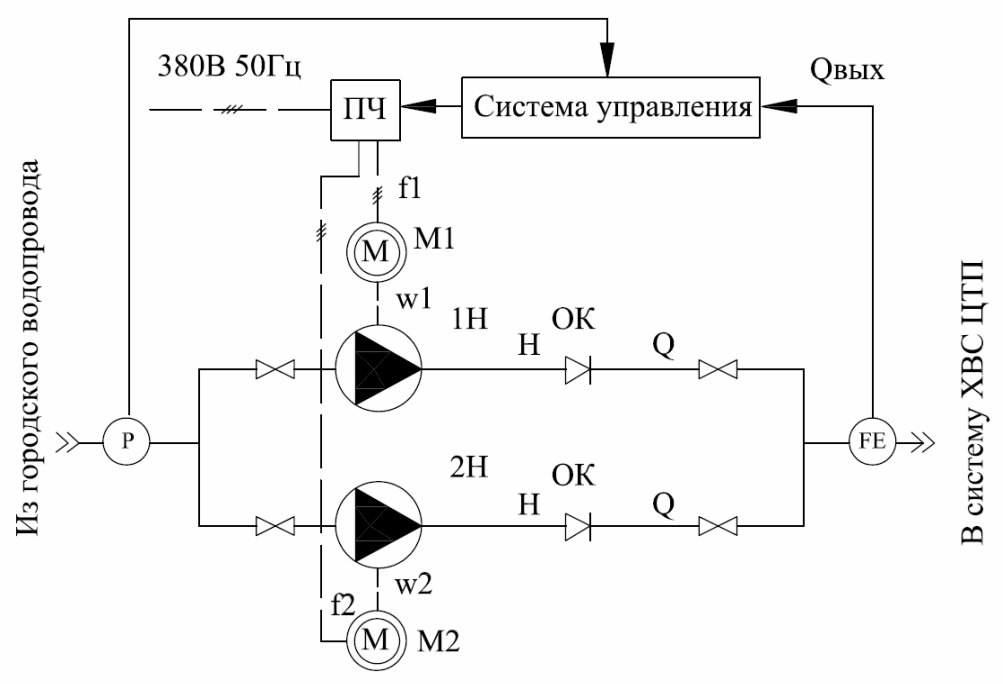


Рис. 1

Вода, под давлением, измеряемым датчиком P, из городского водопровода попадает в насосные агрегаты 1H и 2H, приобретая напор H. Далее, проходя через обратные клапаны ОК, вода поступает в систему холодного водоснабжения (ХВС) центрального теплового пункта (ЦТП), причем расход Qвых измеряется датчиком расхода FE. Управление угловой скоростью (w1 и w2) рабочего колеса каждого из насосных агрегатов осуществляется путем изменения частоты питающего тока (f1 и f2) приводных двигателей M1 и M2. Изменение частоты питающего тока (f1 и f2) осуществляется с помощью преобразователя частоты ПЧ, построенного на основе силовых полупроводниковых приборов.

1. Математическая модель

В работе [8] представлены передаточные функции рассматриваемой системы, полученные в результате исследования насосной станции второго подъема г. Братска. Структурная схема такой системы, включая систему управления, представлена на рисунке 2.

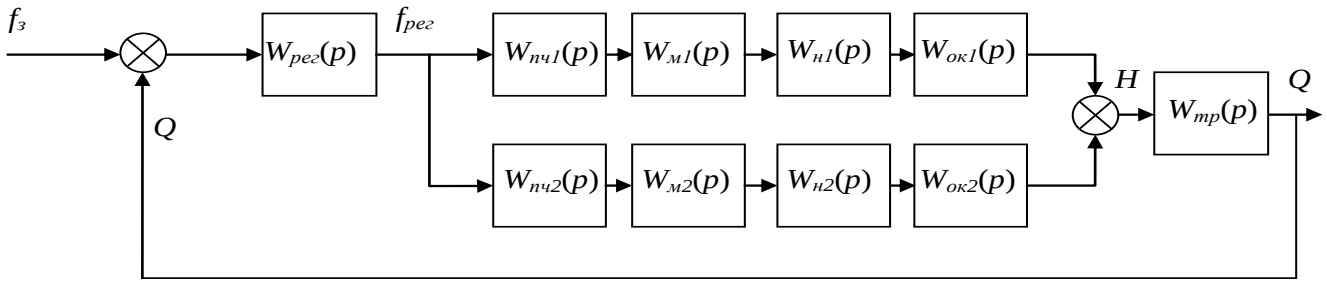


Рис. 2

Здесь $W_{рег}(p)$ – передаточная функция системы управления, $W_{пч1}(p)$ и $W_{пч2}(p)$ – передаточные функции преобразователей частоты, $W_{м1}(p)$ и $W_{м2}(p)$ – передаточные функции приводных двигателей, $W_{н1}(p)$ и $W_{н2}(p)$ – передаточные функции насосных агрегатов, $W_{ок1}(p)$ и $W_{ок2}(p)$ – передаточные функции обратных клапанов и $W_{тр}(p)$ – передаточная функция участка трубопровода от насосных агрегатов до датчика расхода. После очевидных структурных преобразований и перехода к обозначениям, принятым в теории автоматического управления, схема, изображенная на рисунке 2, может быть представлена в следующем виде (рисунок 3):

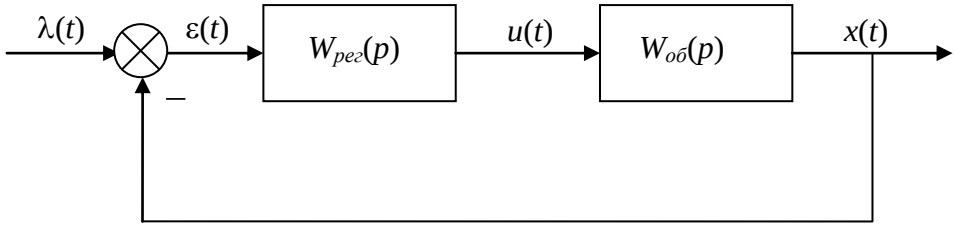


Рис. 3

где $\lambda(t)$ – задающее воздействие, $\varepsilon(t)$ – ошибка системы, $u(t)$ – управляющее воздействие, $x(t)$ – выходная координата системы. Причем $W_{об}(p)$ – передаточная функция объекта управления, определяется следующим выражением:

$$W_{об}(p)=\left[W_{пч1}(p)\cdot W_{м1}(p)\cdot W_{н1}(p)\cdot W_{ок1}(p)+W_{пч2}(p)\cdot W_{м2}(p)\cdot W_{н2}(p)\cdot W_{ок2}(p)\right]\cdot W_{тр}(p);$$

или, ввиду идентичности используемого оборудования:

$$W_{об}(p)=\left[2\cdot W_{пч1}(p)\cdot W_{м1}(p)\cdot W_{н1}(p)\cdot W_{ок1}(p)\right]\cdot W_{тр}(p).$$

Передаточная функция преобразователя частоты $W_{пч1}(p)$ представлена идеальным звеном с запаздыванием [9]. Передаточные функции обратных клапанов $W_{ок2}(p)$ представлены в виде идеальных звеньев. Передаточные функции насосных агрегатов $W_{н1}(p)$ и асинхронных двигателей $W_{м1}(p)$ могут быть представлены апериодическими звеньями

первого порядка [10]. Передаточная функция участка трубопровода $W_{тр}(p)$, также может быть представлена апериодическим звеном первого порядка с учетом некоторых допущений [11].

В результате исследований, проведенных в работе [8], получены следующие значения, постоянных времени для вышеперечисленных передаточных функций:

$$T_м = 0{,}05 \text{ с}; \quad T_н = 0{,}03 \text{ с}; \quad T_{тр} = 11{,}5 \text{ с}.$$

Время запаздывания для используемого преобразователя частоты составило:

$$\tau = 0{,}0005 \text{с}.$$

Произведение коэффициентов усиления всех звеньев равно $k = 92$. Таким образом, передаточная функция объекта управления может быть переставлена в следующем виде:

$$W_{об}(p) = \frac{k \cdot e^{-\tau p}}{(T_м p + 1)(T_н p + 1)(T_{тр} p + 1)} = \frac{92 e^{-0{,}0005p}}{(0{,}05p + 1)(0{,}03p + 1)(11{,}5p + 1)}.$$

Таким образом, задача синтеза системы управления насосной станцией заключается в выборе структуры регулятора и его параметрической оптимизации. Для регулирования расхода Q применен широко распространенный ПИД-регулятор с передаточной функцией вида:

$$W_{рег}(p) = k_р + \frac{1}{T_И p} + T_Д p,$$

где $k_р$ – коэффициент усиления, $T_И$ – время интегрирования, $T_Д$ – постоянная дифференцирования.

Причиной, по которой отдано предпочтение именно такому типу регулирования является простота построения и промышленного использования, а также низкая стоимость и ясность функционирования [12]. В качестве конкретного примера исполнения использован, ПИД-регулятор с универсальным входом и RS-485 ОВЕН ТРМ101 [13].

2. Параметрическая оптимизация

Следовательно, задача сводится к параметрической оптимизации выбранного ПИД-регулятора по какому-либо критерию качества, для формирования которого будем исходить из требований, предъявляемых к системе в целом. Во-первых ошибка системы и как следствие время регулирования должно быть, возможно, минимальным, во-вторых перерегулирование также должно по возможности минимизировано для увеличения срока службы системы, и, наконец, необходимо обеспечить минимально возможные затраты на управление. Исходя из вышесказанного, сформируем два критерия качества для исследуемой системы:

$$I_1 = \int_0^\infty \varepsilon^2(t)dt; \tag{1}$$

$$I_2 = \alpha_1 t_p + \alpha_2 \sigma, \tag{2}$$

где t_p – время регулирования, $\sigma = \dfrac{x_{\max} - x_{уст}}{x_{уст}}$ – перерегулирование, $\alpha_k \geq 0$, $k = 1,2$, – весовые коэффициенты, определение которых зависит от целей, поставленных перед разработчиком системы, причем $\sum_k \alpha_k = 1$. Выбор в пользу критерия I_1 либо I_2 не является очевидным, поэтому далее представлено решение задачи параметрической оптимизации по каждому из них.

Для решения задачи параметрической оптимизации в данной работе применен генетический алгоритм (ГА). Выбор в качестве инструмента именно ГА продиктован тем, что критерий I_2 содержит прямые показатели качества, вследствие чего широкий класс градиентных алгоритмов неприменим в данном случае.

Особенности применения ГА для такого типа задач подробно описаны в работах [7, 14], поэтому остановимся здесь лишь на конкретных особенностях применяемого алгоритма. Используемый алгоритм параметрической оптимизации построен на основе классического генетического алгоритма, в качестве метода отбора родителей использован рулеточная схема, а в качестве оператора перехода особей в следующее поколение – элитарный способ.

В результате предварительных исследований параметры генетического алгоритма были выбраны следующие значения:

- Количество особей в поколении $N = 50$;
- Вероятность скрещивания $p_c = 0{,}95$;
- Вероятность мутации $p_m = 0{,}3$.

Допустимые значения параметров регулятора ТРМ101 имеют следующие значения [6]:

- Коэффициент пропорциональности $k_p \in [0{,}001; 9999]$;
- Время интегрирования $T_И \in [0; 3999]$;
- Дифференциальная постоянная $T_Д \in [0; 3999]$.

Для критерия I_2 веса назначены следующим образом, $\alpha_1 = 0{,}35$, $\alpha_2 = 0{,}65$, исходя из тех соображений, что к системам такого типа обычно не предъявляют высоких требований по быстродействию [15].

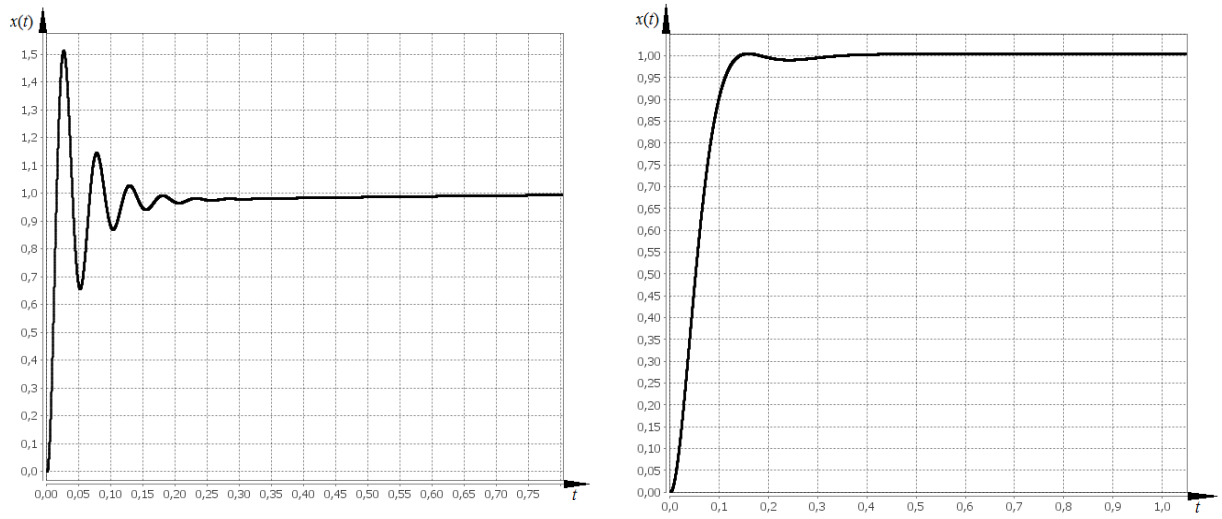
3. Результаты

В таблице 1 приведены результаты параметрической оптимизации описанной системы с помощью генетического алгоритма.

На рисунках 4а и 4б представлены переходные процессы, полученные в результате оптимизации по критерию I_1 и I_2, соответственно.

Таблица 1. Результаты расчета параметров регулятора

Значение критерия при задающем воздействии $\lambda(t)=1(t)$	Параметры регулятора		
	k_p	$T_И$	$T_Д$
$I_1=0{,}0129$	5,27	0,618	2,793
$I_2=0{,}048$	2,185	2,174	0,146



а) *б)*

Рис.4

В таблице 2 представлены прямые показатели качества полученных переходных процессов.

Таблица 2. Прямые показатели качества регулирования

Вид критерия	Показатели качества			
	t_p, время регулирования	σ, перерегулирование	$t_н$, время нарастания	χ, декремент затухания
I_1	0,639 с	51%	0,015 с	3,54
I_2	0,26 с	0,5%	0,137 с	1,25

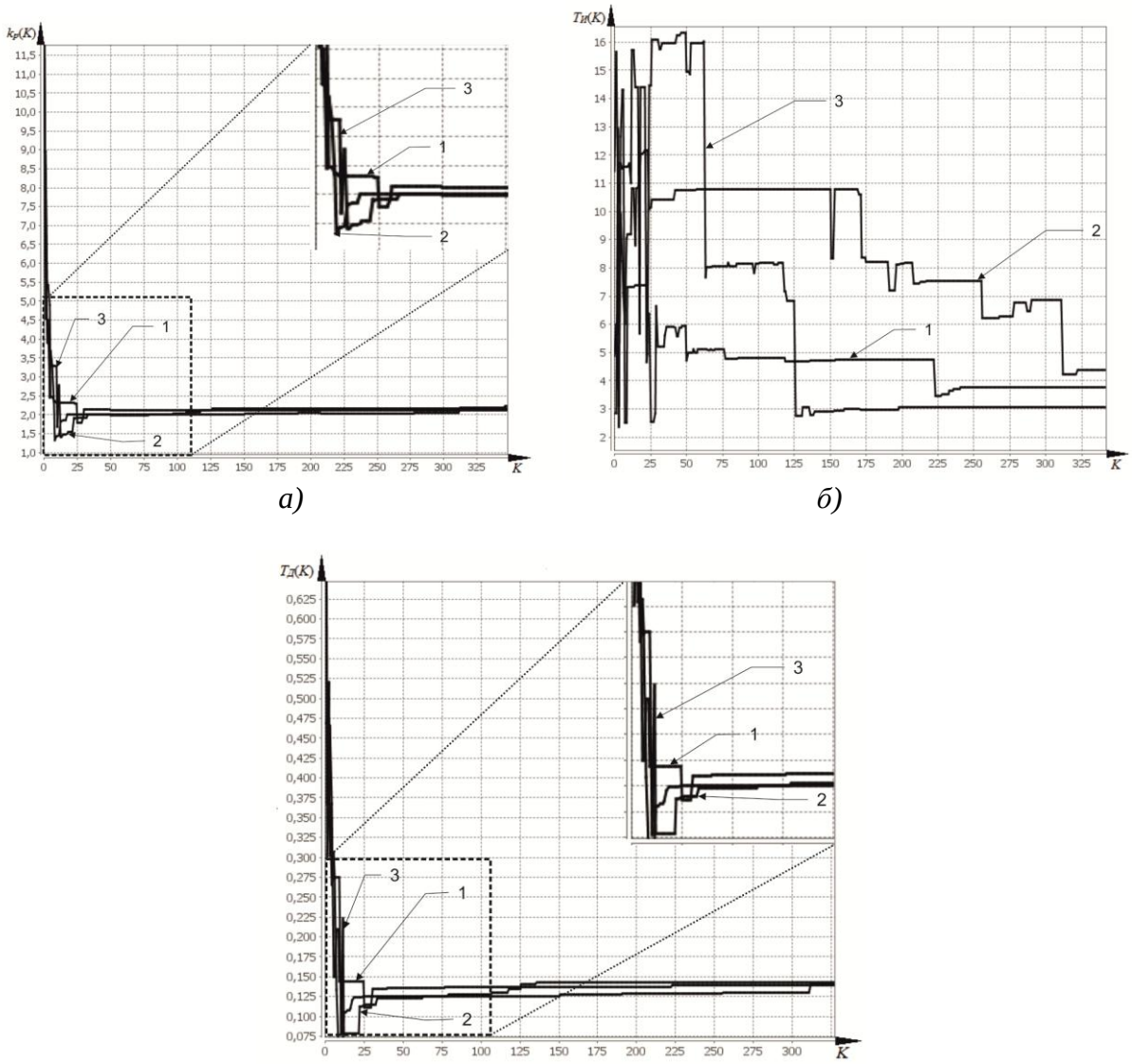
Из представленных рисунков и данных таблицы 2 можно заключить о том, что оптимизация системы по критерию I_2 обеспечивает лучшее качество переходного процесса по сравнению с традиционным квадратичным критерием I_1.

Покажем теперь, что представленные в таблице 1 параметры регулятора действительно являются оптимальными по отношению к соответствующему критерию. При использовании критерия I_1 возможно нахождение составляющих градиента в конечной точке работы алгоритма, близость значений которых к нулю будет служить одним из доказательств нахождения экстремума. Для данных, приведенных в таблице 1 модуль градиента равен:

$$\sqrt{\left(\frac{\partial I_1}{\partial k_p}\right)^2+\left(\frac{\partial I_1}{\partial T_И}\right)^2+\left(\frac{\partial I_1}{\partial T_Д}\right)^2}\cong 1{,}5\cdot 10^{-4},$$

что является достаточным для практики.

Для критерия I_2 воспользуемся методикой, широко используемой при применении градиентных методов, а именно, запуск алгоритма несколько раз при различных начальных условиях, в случае ПИД-регулятора, достаточным считается троекратный запуск алгоритма. Близость настраиваемых параметров к одному значению будет указывать на способность алгоритма решить поставленную задачу. Схождение параметров регулятора, после запуска генетического алгоритма с различных популяций, к одному значению, представлено на рисунках 5а, 5б и 5в, соответственно.



а) *б)*

в)

Рис. 5

Как видно из представленных рисунков, параметры ПИД-регулятора сходятся к одним значениям с достаточной для практики точностью.

Общий вывод работы следующий: параметрическая оптимизация ПИД-регулятора по традиционному критерию, даже при достижении алгоритмом оптимизации экстремума, не дает приемлемого качества регулирования. Применение же критерия, основанного на прямых показателях, существенно улучшает характер переходного процесса, однако его использование возможно только в комплексе с алгоритмами, не требующими вычисления производной целевой функции.

Таким образом, научная новизна данной работы заключается в применении генетического алгоритма для параметрической оптимизации системы стабилизации расхода жидкости станции второго подъема г. Братска, как по традиционному критерию, так и по продолженному авторами критерию, основанному на прямых показателях качества. Также проведен сравнительный анализ полученных решений и представлены доказательства их оптимальности.

Список литературы

1. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm // International Journal of Innovate Computing, Information and Control. 2012. Vol. 8, no. 11. P. 7761-7779. Available at: http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf , accessed 25.02.2014.
2. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization // Telkomnika. 2013. Vol. 11, no. 3. P. 1524-1530. Available at: http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf , accessed 25.02.2014.
3. Jaen-Cuellar A.Y., Romero-Troncoso R.de J., Morales-Velazquez L., Osornio-Rios R.A. PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Vol. 10. P. 324. DOI: 10.5772/56697
4. Ayman A.A. PID Parameters Optimization Using Genetic Algorithm Technique for Electrohydraulic Servo Control System // Intelligent Control and Automation. 2011. No. 2. P. 69-76. DOI: 10.4236/ica.2011.22008
5. Slavov T., Roeva O. Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control // Electronic journal: WSEAS Transactions on Systems. 2012. Vol. 11, no. 7. P. 223-233. Available at: http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf , accessed 17.02.2014.
6. Труханов К.А., Попов Д.Н. Выбор оптимальных параметров гидропривода вентилятора для системы охлаждения двигателя транспортного средства // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 7. С. 91-100. DOI: 10.7463/0713.0590873
7. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И, Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении // Exponenta Pro. 2004. № 3-4 (7-8). С. 78-85.

8. Илющенко В.В. Методы повышения надежности аппаратных средств автоматизированных систем управления насосными станциями: дис. … канд. техн. наук. Иркутск, 2011. 154 с.
9. Макшанцев В.Г., Статива К.Ю., Ольховский М.А. Исследование и моделирование электропривода насосной станции с частотным регулированием для гидросбива окалины на прокатном стане // Вісник Донбаськоі машинобудівноі академіі. 2007. № 2Е (10). С. 134-141.
10. Ключев В.И. Теория электропривода: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
11. Дудников Е.Г. Автоматическое управление в химической промышленности. М.: Химия, 1987. 367 с.
12. Денисенко В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Ч. 1 // Современные технологии автоматизации. 2007. № 4. С. 86-97.
13. ПИД-регулятор с универсальным входом и интерфейсом RS-485 ОВЕН ТРМ101 // ОВЕН. Оборудование для автоматизации: сайт компании. Режим доступа: http://www.owen.ru/uploads/trm101.pdf (дата обращения 10.02.2014).
14. Куцый Н.Н., Лукьянов Н.Д. Применение генетического алгоритма для оптимизации автоматических систем с ПИД-регулятором // Вестник ИрГТУ. 2012. № 6. С. 6-11.
15. Мошнориз Н.Н. Разработка модели системы управления насосной станцией второго подъема // Наукові праці ВНТУ. 2007. № 1. С. 1-5.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. ISSN 1994-0408

Parametric Optimization of Control Systems Pumping Station by the Genetic Algorithms

08, August 2014

DOI: 10.7463/0814.0721172

M. P. Dounaev[1], N.N. Kucyi[1], N. D. Lukyanov[1,a]

[1]National Research Irkutsk State Technical University, Irkutsk, 664074, Russia

[a]lukyanov.n@gmail.com

Keywords: genetic algorithm, PID-regulators, hydraulic power pack, direct indicators of quality

Now the frequency regulation with its well-known advantages is becoming more popular for using in electric drives. One of these systems is the system of liquid flow stabilization for pumping station of the second flood, which is discussed at the article. There are functional elements of the system: the frequency converter, the induction motor, pump set, check valve, part of the pipeline between the flow sensors and PID controller. In this case are used PID controller with universal input and RS-485 OWEN TRM101. The article tries to solve the main problem, which is to set optimal controller settings.

The article presents a mathematical model of the system, built on the basis of transfer functions. The specific values of the parameters for Bratsk pumping station of the second flood are found.

To solve the problem of parametric optimization for control of pumping station authors use a genetic algorithm, which allows us to use different quality criteria. A set of parameters for the genetic algorithm is represented, as well as a method of selection and a method of the transition between generations. The problem of parametric optimization was solved by quadratic integral criterion and by the criterion, composed of direct measures of quality (regulation time and the overshoot). The PID controller optimal values of adjustable parameters were obtained both for considered criteria and for their corresponding transient processes. Comparative analysis of results was produced. When proving the optimality of the obtained settings for the quadratic criterion the proximity of the gradient components of the target functional to zero is demonstrated. In the case of a criterion based on a direct measure of quality, is presented a picture of convergence of adjustable parameters to the same value when run with different starting points.

It is presented that the use of a criterion based on a direct measure of quality, can significantly reduce the overshoot with a comparable regulation time.

References

1. Saad M.S., Jamaluddin H., Darus I.Z.M. Implementations of PID-controller tuning using differential evolution and genetic algorithm. *International Journal of Innovate Computing, Information and Control*, 2012, vol. 8, no. 11, pp. 7761-7779. Available at: http://www.ijicic.org/ijicic-11-07073.pdf , accessed 25.02.2014.
2. Chen Y., Ma Y., Yun W. Application of Improved Genetic Algorithm in PID Controller Parameters Optimization. *Telkomnika*, 2013, vol. 11, no. 3, pp. 1524-1530. Available at: http://www.iaesjournal.com/online/index.php/TELKOMNIKA/article/viewFile/2301/pdf , accessed 25.02.2014.
3. Jaen-Cuellar A.Y., Romero-Troncoso R.de J., Morales-Velazquez L., Osornio-Rios R.A. PID-Controller Tuning Optimization with Genetic Algorithms in Servo Systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, p. 324. DOI: 10.5772/56697
4. Ayman A.A. PID Parameters Optimization Using Genetic Algorithm Technique for Electro-hydraulic Servo Control System. *Intelligent Control and Automation*, 2011, no. 2, pp. 69-76. DOI: 10.4236/ica.2011.22008
5. Slavov T., Roeva O. Application of Genetic Algorithm to Tuning a PID Controller for Glucose Concentration Control. *Electronic journal: WSEAS Transactions on Systems*, 2012, vol. 11, no. 7, pp. 223-233. Available at: http://www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2012/55-286.pdf , accessed 17.02.2014.
6. Trukhanov K.A., Popov D.N. Selection of the optimum parameters for the hydraulic drive of a fan of the vehicle's engine cooling system. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 7, pp. 91-100. DOI: 10.7463/0713.0590873
7. Sabanin V.R., Smirnov N.I, Repin A.I. Modified genetic algorithm for optimal control problems. *Exponenta Pro*, 2004, no. 3-4 (7-8), pp. 78-85. (in Russian).
8. Iliushchenko V.V. *Metody povysheniia nadezhnosti apparatnykh sredstv avtomatizirovannykh sistem upravleniia nasosnymi stantsiiami. Kand. diss*. [Methods of increasing the reliability of hardware of automated systems of pumping plants. Cand. diss.]. Irkutsk, 2011. 154 p. (in Russian).

9. Makshantsev V.G., Stativa K.Iu., Ol'khovskii M.A. Research and simulation electric drive pumping station with frequency regulation for hydraulic shooting down dross in rolling mill. *Vicnik Donbas'koi mashinobudivnoi akademii*, 2007, no. 2E (10), pp. 134-141. (in Russian).
10. Kliuchev V.I. *Teoriia elektroprivoda* [Theory of electric drive]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2001. 704 p. (in Russian).
11. Dudnikov E.G. *Avtomaticheskoe upravlenie v khimicheskoi promyshlennosti* [Automatic control in chemical industry]. Moscow, Khimiia Publ., 1987. 367 p. (in Russian).
12. Denisenko V. PID controllers: issues of implementation. Part 1. *Sovremennye tekhnologii avtomatizatsii = Contemporary Technologies in Automation*, 2007, no. 4, pp. 86-97. (in Russian).
13. *PID-reguliator s universal'nym vkhodom i interfeisom RS-485 OVEN TRM101* [PID controller with universal input and RS-485 interface OWEN TRM101]. OWEN LLC: company website. Available at: http://www.owen.ru/uploads/trm101.pdf , accessed 10.02.2014. (in Russian).
14. Kutsyi, N.N., Luk'ianov N.D. Using genetic algorithm for optimization of automatic systems with PID control. *Vestnik IrGTU*, 2012, no. 6, pp. 6-11. (in Russian).
15. Moshnoriz N.N. Development of model of the control system by pump station of the second rise. *Naukovi pratsi VNTU*, 2007, no. 1, pp. 1-5. (in Ukrainian, in Russian, in English).