

17. Qian Quan, Chao-Jie Xiao, Rui Zhang. Grid-based Data Stream Clustering for Intrusion Detection, *International Journal of Network Security*, 2013, Vol. 15, No. 1. Jan, pp. 1-8.
18. Jensen K. Colored Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems, *Modeling and Validation of Concurrent Systems*. Springer, 2009, pp. 398.
19. Missal D., Hanisch H.M. Synthesis of distributed controllers by means of a monolithic approach, *Proceedings of the 11th IEEE Int. Conf. on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'2006)*, Prague, September, 2006, pp. 356-363.
20. Simmon E. et al. A Vision of Cyber-Physical Cloud Computing for Smart Networked Systems. NIST, Aug. 2013. Available at: http://nist.gov/customcf/get_pdf.cfm?pub_id=914023 (accessed 1 April 2015).
21. Tron R., Vidal R. Distributed Computer Vision Algorithms, *IEEE Trans. Signal Processing*, 2011, Vol. 28, no. 3, pp. 32-45.
22. Dieber B., Micheloni C., Rinner B. Recourse-Aware Coverage and Task Assignment in Visual Sensor Networks, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 2011, Vol. 21, No. 10, pp. 1424-1437.
23. Yick J., Mukherjee B., Ghosal D. Wireless sensor network survey, *Computer networks*, August 2008, Vol. 52, Issue 12, 22, pp. 2292–2330 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128608001254> (accessed 1 April 2015).
24. Wireless sensor networks with Waspnote&Meshlium. Available at: <http://www.libelium.com/development/waspnote/documentation/wireless-sensor-networks-with-waspnote-meshlium/> (accessed 1 April 2015).
25. Roshan P., Leary J. 802.11 wireless LAN fundamentals, 1 st ed. Cisco Press, Indianapolis, IN. ISBN: 1-58705-077-3, December 2003.
26. The Evolution of Wireless Sensor Networks. URL: <http://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf> (accessed 1 April 2015).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор П.Г. Михайлов.

Петров Назар Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: kafmps@tgn.sfedu.ru; 347900, г. Таганрог, ул. Петровская, 81; кафедра встраиваемых систем; старший преподаватель.

Petrov Nazar Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: kafmps@tgn.sfedu.ru; 81, Petrovskayastreet, Taganrog, 347900, Russia; the department of embedded systems; senior lecturer.

УДК 004.942

А.В. Ярцев

ОБ УПРАВЛЕНИИ УГЛОВЫМ ОТКЛОНЕНИЕМ РАМОК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОСРЕДСТВОМ ПД-РЕГУЛЯТОРА

Рассматривается синтез математической модели устройства управления элементами электромеханической системы (гиростабилизированной платформы) по двум осям углового отклонения при помощи современного ПО. Предлагается использовать регулятор ПД-типа, который даёт необходимое качество управления как на модели, так и на реальном устройстве. Учтено влияние нелинейностей в наблюдаемой системе, которые были описаны по итогам идентификации посредством модели Гаммерштейна-Винера и относятся к блоку усиления управляющего сигнала. Поскольку система рассматривается отдельно от внешних устройств, все расчеты происходят в системе координат, связанной с самой платформой. Ввиду того, что в старых моделях исследуемой системы использовалось чисто аналоговое управление, данная разработка является перспективным и новым решением. Результаты синтеза регулятора проверены на адекватность в ходе полунатурного моделирования замкнутой системы управления. Математическая модель, рассматриваемая в работе, была создана с применением Matlab 2014 в среде Simulink, полунатурное моделирование осуществлялось при помощи системы NI LabVIEW и управляющего блока NI

cRIO. Проведено сравнение характеристик системы по обеим осям движения для регуляторов в непрерывной и в дискретной форме. Экспериментальное исследование показало, что управляющее устройство ПД-типа способно обеспечить точный и достаточно быстрый контроль перемещения рамок системы: перерегулирование в системе не более 0,5 градуса и длительность переходного процесса менее 100 мс для всех рассмотренных вариантов управления, колебания практически отсутствуют. Влияние нелинейностей успешно сведено к минимуму. В будущем предполагается разработать электронный модуль управления достаточно малых габаритов и массы, сравнимых с размерами и массой объекта управления.

ПД-регуляторы; моментный двигатель; теория управления; датчик угла; цифровое управление; полунатурное моделирование.

A.V. Yartsev

ABOUT THE ANGULAR DEVIATION CONTROL FOR THE FRAMES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM BY PD-CONTROLLER

The article deals with the synthesis of a mathematical model of the control unit for components of the electromechanical system (gyro-stabilized platform) along two axes of angular deviation using modern software. It is proposed to use the PD-type controller, which gives the necessary quality control as on the model and on a real device. The influence of non-linearities in the observed system is considered, which have been described on the basis of identification by Hammerstein-Wiener model and refer to the amplifying unit for control signal. Because the system is considered separately from the external devices, all calculations are performed in the coordinate system associated with the platform. In view of the fact that the purely analog control was used in older models of the studied system, this development is a promising and new solution. The results of the synthesis of the controller checked for adequacy in the HIL closed-loop control. The mathematical model considered in the work was created using Matlab 2014 environment Simulink, HIL system was carried out using NI LabVIEW and control unit NI cRIO. A comparison of the characteristics for two axes of motion was produced for the regulators in the continuous and in discrete form. Experimental research has shown that PD-controller is capable of providing accurate and fast enough monitoring of movement of the object frames: the system has overshoot no more 0.5 degrees and duration of the transition process less than 100 ms for all considered management options, the fluctuations are virtually absent. Influence of nonlinearities successfully minimized. In the future is assumed to develop the electronic control module with sufficiently small size and weight, comparable to the size and weight of the control object.

PD-controller; torque motor; control theory; angle sensor; digital control; HIL.

Введение. Задача автоматического управления техническими объектами является важной в современной науке и на производстве. Замкнутые автоматические системы существуют в технике в виде различных систем управления, следящих систем, вычислительных систем, компенсационных систем измерения, систем стабилизации, систем самонаведения, телеуправления, автономного управления и т.п. [1–4]. Для технических систем различной структуры и разного уровня сложности разработано большое количество методов построения управляющего устройства в математической форме с учётом требований по физической реализуемости [3–9]. Для данной работы интерес представляют системы управления перемещением, особенно угловым, которые используются в инерциальной навигации. Инерциальные навигационные системы управления делятся на платформенные и бесплатформенные, для обоих типов в настоящее время хорошо разработаны методы расчёта корректирующих устройств [10, 11]. В зависимости от назначения системы и среды перемещения (наземная, водная или воздушная) варьируется количество учитываемых параметров. В данной работе рассматривается задача построения регулятора для электромеханической системы типа «гиростабилизированная платформа», в которой входное напряжение преобразуется в угловую скорость

подвижной части посредством моментного двигателя [12–14], что отслеживается при помощи датчиков. Поскольку система рассматривается отдельно от внешних устройств, т.е. перемещения происходят в системе координат, связанной с самой платформой, при синтезе управляющего устройства необходимо учитывать только механические и электрические характеристики объекта, датчиков угловой скорости и встроенного усилительного элемента. Структура системы была изучена посредством идентификации объекта как «чёрного ящика» [14], поэтому сделано предположение, что в линейной части порядок передаточной функции объекта не выше третьего.

Постановка задачи. Подвижная часть объекта состоит из пары рамок разного размера, которые могут передвигаться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей вращения, условно независимых друг от друга. По обеим осям имеется ограничение по углу отклонения на 75 градусов в одну и другую сторону в виде упоров, а также на каждой рамке размещён датчик угла, позволяющий отследить её перемещение. Объект управления имеет в своей структуре нелинейные элементы, что было установлено посредством последовательной параметрической идентификации по модели Гаммерштейна-Винера [14, 15]: внешняя рамка имеет зону нечувствительности по входному току шириной ± 50 мА, внутренняя рамка – зону нечувствительности шириной ± 140 мА и нелинейность полиномиального типа, описанную формулой (1).

$$\Omega(u) = 88.22u + 548.13u^3, \quad (1)$$

Схематичное изображение рамки системы показано на рис. 1.

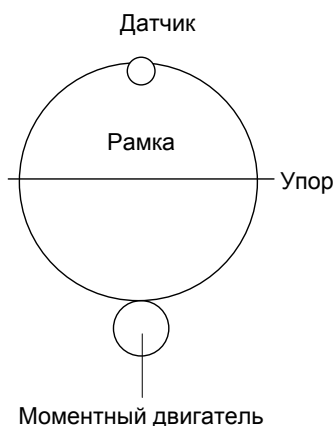


Рис. 1. Схема рамки исследуемой системы

Передаточные функции линейной части объекта по разным осям (соответственно «внутренней» и «внешней» рамок) при управлении от источника тока описываются формулами (2) и (3).

$$W_1(s) = \frac{1,511 \times 10^6}{s^2 + 126,6s + 586,1}, \quad (2)$$

$$W_2(s) = \frac{5,216 \times 10^6}{s^2 + 215,6s + 724}. \quad (3)$$

Ставится задача управления системой по угловому отклонению со следующими показателями качества:

- ♦ длительность переходного процесса не более 100 мс, дабы обеспечить своевременную реакцию системы на изменение курса движения;

- ♦ перерегулирование не более 10 % (3 градусов), так как зона оптической видимости для монтируемых на объект фотодатчиков не превышает 2,5 градусов;
- ♦ ошибка в установившемся режиме не более 0,4 градуса;
- ♦ параметры входного воздействия: для ступенчатого входного импульса задаваемый угол отклонения равен 30 градусам, поскольку наиболее частые амплитуды отклонения для аналогов реальной системы не превосходят 25 градусов, импульс подаётся через 10 мс от момента запуска модели.

Описание закона управления. Для управления системой было предложено использовать классические законы управления: пропорциональный, интегральный и дифференциальный [1, 2], в той или иной комбинации, с размещением регулятора в прямой цепи системы. Согласно теории управления [1, 2, 16–18], пропорциональная составляющая величиной K при подключении к объекту увеличивает его комплексную частотную характеристику (КЧХ) на каждой частоте в K раз. Выходной процесс в П-регуляторе описывается выражением

$$u(t) = K_{\varepsilon}(t), \quad (4)$$

где $\varepsilon(t)$ – входное воздействие регулятора (рассогласование системы), $u(t)$ – управляющий сигнал, поступающий к объекту.

Дифференциальная составляющая (Д-регулятор) при большой скорости отклонения регулируемой величины, когда в начальный момент П-регулятор оказывает слишком слабое управляющее воздействие, уменьшает ошибку $\varepsilon(t)$, причём, чем больше рассогласование, вызванное структурой системы или возмущающим воздействием, тем значительнее будет управляющее воздействие на объект. Известно, что в чистом виде Д-регуляторы не реализуемы физически, поэтому используется либо ПД-регулятор, либо регулятор с реальным дифференцирующим звеном, передаточные функции которых представлены соответственно формулами (5) и (6) [1, 2, 18]. В данной работе исследуется работа ПД-регулятора.

$$W_{ПД}(s) = K + K_d s = K(1 + T_{ne} s), \quad (5)$$

$$W_D = \frac{K_d T_d s}{T_d s + 1}, \quad (6)$$

где K – коэффициент усиления; T_{ne} – постоянная времени предварения; T_d – постоянная времени дифференцирования.

Экспериментальное исследование. Модель системы управления в Simulink [19–21] для объекта, описываемого функцией (2), приведена на рис. 2. Полиномиальная нелинейность (1) в данной модели заменена комбинацией блоков зоны нечувствительности и насыщения. Так как наличие сразу двух нелинейных звеньев не даёт возможности рассчитать коэффициенты регулятора традиционными методами, коэффициенты подбирались эмпирическим методом.

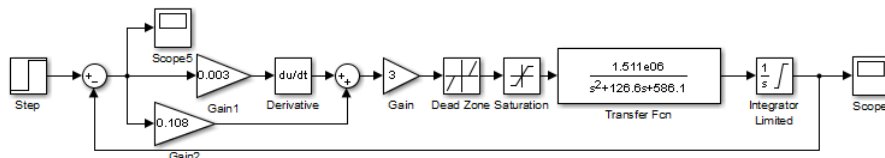
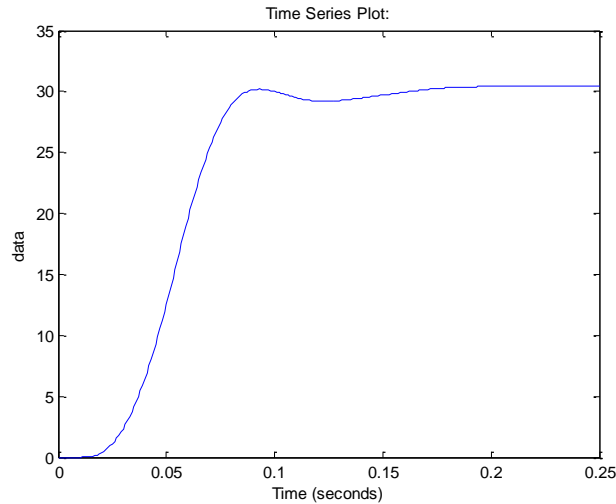
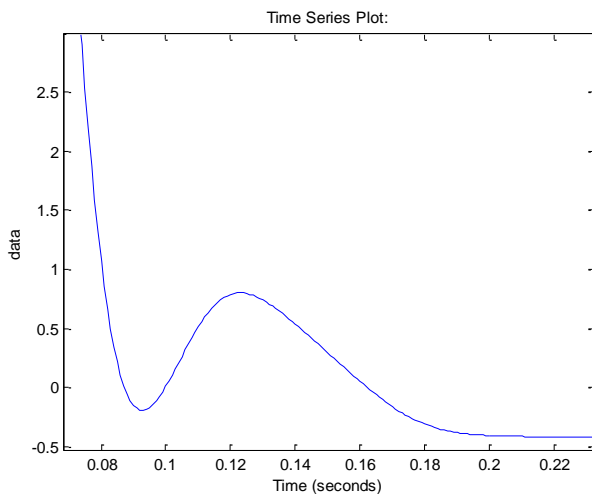


Рис. 2. Модель внутренней рамки объекта управления

Выходная характеристика данной системы и график ошибки в конце переходного процесса и установившемся режиме показаны на рис. 3. Данный регулятор обеспечивает требуемое качество управления даже с учётом нелинейностей в системе.



а



б

Рис. 3. Характеристики системы: а – выходное воздействие; б – ошибка системы

Исследование поведения модели в замкнутой системе с отрицательной обратной связью велось на полунатурной модели [22], которая состоит из объекта, двух усилителей, наборов источников питания, системы реального времени NI CompactRIO и персонального компьютера. Ввиду того, что механика объекта не допускает изменения его структуры, для цифрового управления системой [23–25] следует перевести в z -область только передаточную функцию корректирующего устройства. Соответствующая модель системы в Simulink представлена на рис. 4, а её характеристики по выходу и по ошибке на рис. 5. Коэффициенты регулятора редактируются по особенностям работы полунатурной модели.

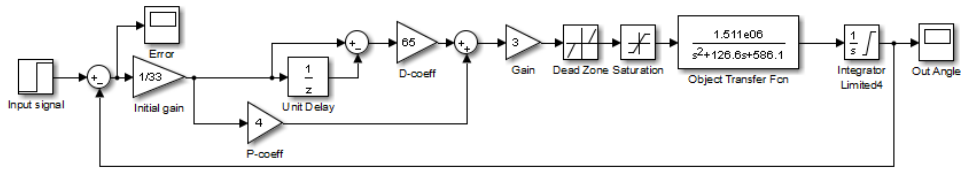
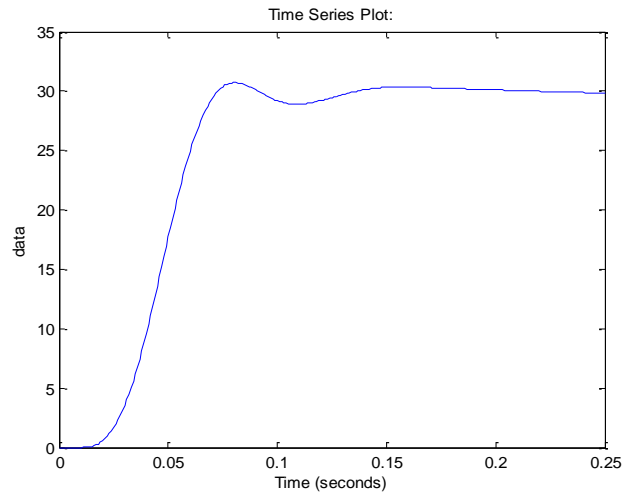
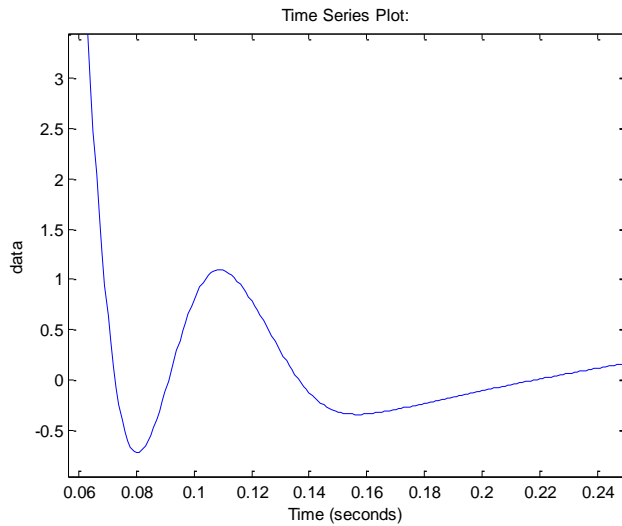


Рис. 4. Модель системы с цифровым регулятором для внутренней рамки



а



б

Рис. 5. Характеристики системы: а – выходное воздействие; б – ошибка системы

На рис. 6 показаны характеристики системы с аналоговым и цифровым регулятором в общей системе координат. Из графиков следует, что цифровая система управления обеспечивает более краткое время регулирования, но также и более высокое перерегулирование и ошибку в установившемся режиме.

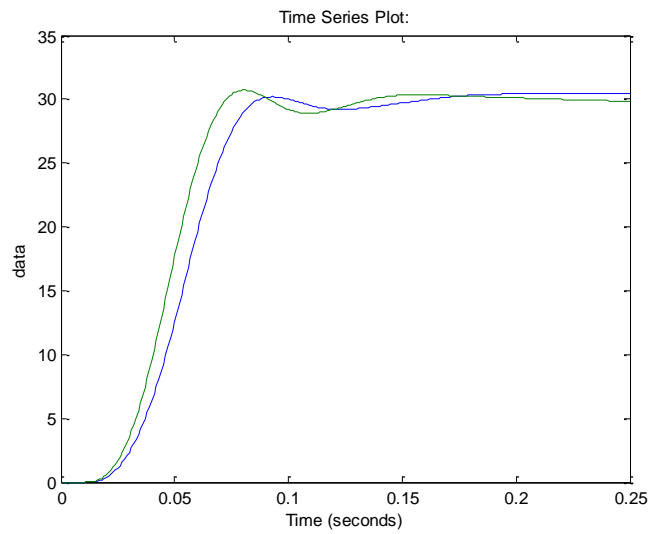


Рис. 6. Сравнение выходных характеристик системы для аналогового и цифрового управления

Для объекта управления с передаточной функцией (3) также были синтезированы регуляторы в аналоговой и цифровой области; нелинейность по этой оси вращения менее выражена (в модели использован только блок насыщения). На рис. 7 приведены модели системы с цифровым ПД-регулятором, аналоговым ПИД-регулятором и аналоговым ПД-регулятором, а на рис. 8 в общей системе координат приведены выходные характеристики полученных замкнутых систем.

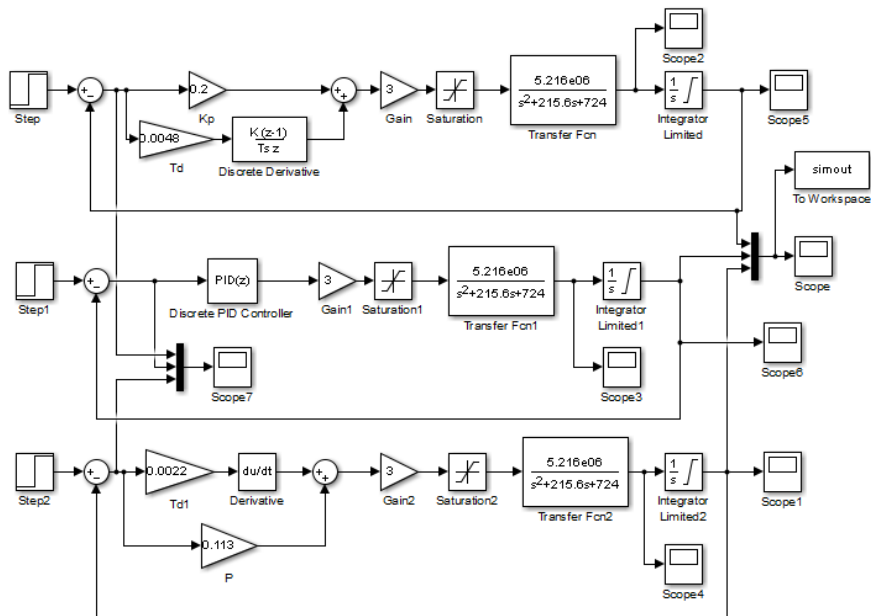


Рис. 7. Модели для внешней рамки объекта управления

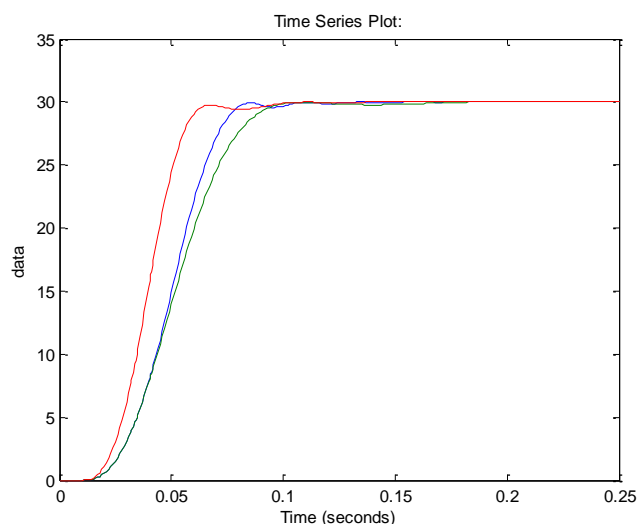


Рис. 8. Выходные характеристики систем с различными регуляторами

Представленные характеристики показывают, что все три регулятора реализуют управление во временной области с достаточно хорошим быстродействием и ошибкой в пределах допустимых отклонений [1, 9, 11, 18]. Также отмечено, что наилучшее качество по длительности переходного процесса имеет аналоговый ПД-регулятор (время достижения 95 % от установившегося значения T_p равно 47,9 мс), за ним следует цифровой ПД-регулятор ($T_p = 64,25$ мс), что наглядно показывает влияние задержки на один такт в цифровом устройстве управления на качество переходного процесса. Аналоговый ПИД-регулятор реализует управление выходной характеристикой системы за большее время ($T_p = 74,6$ мс), но более плавно, что доказывается отсутствием снижения выходной величины после достижения максимума. На этом примере иллюстрируется свойство интегральной составляющей регулятора медленно наращивать управляющее воздействие при нарастании ошибки регулирования [16].

В системе имеется возможность наблюдать графики изменения угловой скорости со временем (в реальном объекте эту функцию выполняют датчики угловой скорости). Данные об угловой скорости и показателях переходного процесса для внешней рамки помещены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры системы внешней рамки объекта в переходном и установившемся режимах

Параметр / Тип регулятора	Время регулирования T_p , мс	Наибольшая ошибка по углу в установившемся режиме $\varepsilon_{уст}$, град	Наибольшая угловая скорость ω_{max} , град/с	Момент достижения максимума угловой скорости T_{ω} , мс
Аналоговый ПД	47,9	0,594	1035	29
Цифровой ПД	64,25	0,43	781	40
Аналоговый ПИД	74,6	0,225	628,5	38

Заключение. В результате проведённых исследований было доказано, что задача управления достаточно сложным нелинейным объектом может быть решена с применением линейного регулятора ПД-типа, изучены особенности отработки входного воздействия при конструировании регулятора в аналоговой и в цифровой области. Так как испытание адекватности математической модели проводилось на полунатурной модели и достигнутое качество управления подтвердилось, решение задачи признано верным. Итоги НИР были сведены в отчёт по тематическому проекту и представлены заказчику с целью продолжения разработок.

Результаты исследований, изложенные в данной статье, получены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта «Создание высокотехнологичного производства для изготовления комплексных реконфигурируемых систем высокоточного позиционирования объектов на основе спутниковых систем навигации, локальных сетей лазерных и СВЧ маяков и МЭМС технологии» по постановлению правительства №218 от 09.04.2010 г. Исследования проводились в ФГАОУ ВО ЮФУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бесекерский В.А., Попов Е.П.* Теория систем автоматического управления. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с.
2. *Гайдук А.Р.* Непрерывные и дискретные динамические системы. – М.: Учебно-методический и издательский центр «Учебная литература», 2004. – 252 с.
3. *Гайдук А.Р., Гуренко Б.В., Плаксиенко Е.А.* К синтезу систем управления с частично заданной структурой по желаемым показателям качества // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2 (55). – С. 19-29.
4. Ad Damen. Modern Control Theory. Measurement and Control Group, Department of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, 2002.
5. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1974. – 832 с.
6. *Daniel Alpay, Israel Gohberg.* The State-Space Method Generalizations and Applications. Birkhäuser Verlag, 2006.
7. *Семенов А.В., Гайдук А.Р., Семенова А.В., Геложье Ю.А.* Процедура автоматизированного синтеза цифровых управляющих систем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4 (153). – С. 150-157.
8. *Филипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
9. *John J. d'Azzo, Constantine H. Houpis, Stuart N. Sheldon.* Linear control system analysis and design with Matlab. Marcel Dekker, Inc. NY, USA, 2003.
10. *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / Под общ. ред. д.т.н. В.Я. Распопова. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн» ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
11. *Петров Б.И., Полковников В.А., Рабинович Л.В. и др.* Динамика следящих приводов: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Л.В. Рабиновича. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 496 с.
12. *Капралов С., Матвеев В., Майоров В., Павлов Д., Смуров А.* Моментный электропривод для прецизионных следящих систем // Современная электроника. – 2008. – № 5.
13. Электрические машины систем автоматизации: методические указания. Сост. В.Д. Сергеев, С.М. Проскуринко. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2005.
14. *Дейч А.М.* Методы идентификации динамических объектов. – М.: Энергия, 1979. – 240 с.
15. Matlab System Identification Toolbox. Создание линейных и нелинейных моделей динамических систем по измеренным данным на входе и выходе. Руководство по применению, MathWorks. <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/system-identification-toolbox.pdf>.
16. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х т. / Под общ. ред. К.А. Пупкова. Т. 2: Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / Под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.

17. *Shlomo Engelberg*. A Mathematical Introduction to Control Theory. (Series in Electrical and Computer Engineering, vol.2) Imperial College Press, 2005.
18. *Гайдук А.Р.* Синтез систем автоматического управления по передаточным функциям // Автоматика и телемеханика. – 1980. – № 1. – С. 11.
19. *Дьяконов В.П.* Matlab и Simulink для радиоинженеров. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 976 с.
20. *Гультяев А.К.* Matlab 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: Учебное пособие. – М.: Наука, 1990. – 285 с.
21. *Чен К., Джиблин П., Ирвинг А.* MATLAB в математических исследованиях. – М.: Мир, 2001. – 346 с.
22. Полунатурное моделирование. Большая Энциклопедия нефти и газа. <http://www.ngpedia.ru/id159065p1.html> (дата обращения 3.04.2015).
23. *Гостев В.И.* Системы управления с цифровыми регуляторами. Справочник. – Киев: Техника, 1990. – 280 с.
24. *Gene F.Franklin, J.David Powell, Michael L. Workman.* Digital Control of Dynamic Systems. Addison-Wesley, 1997.
25. *Ioan D.Landau, Gianluca Zito.* Digital Control Systems. Design, identification and implementation. Springer-Verlag, 2006.

REFERENCES

1. *Besekerskiy V.A., Popov E.P.* Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya [Theory of automatic control systems]. St. Petersburg: Professiya, 2003, 752 p.
2. *Gayduk A.R.* Nepreryvnye i diskretnye dinamicheskie sistemy [Continuous and discrete dynamical systems]. Moscow: Uchebno-metodicheskiy i izdatel'skiy tsentr «Uchebnaya literatura», 2004, 252 p.
3. *Gayduk A.R., Gurenko B.V., Plaksienko E.A.* K sintezu sistem upravleniya s chastichno zadannoy strukturoy po zhelaemym pokazatelyam kachestva [To the synthesis of control systems with partially specified structure according to desired quality parameters], *Nauchnyy vestnik NGTU* [Scientific Bulletin of National Mining University], 2014, No 2 (55), pp. 19-29.
4. Ad Damen. Modern Control Theory. Measurement and Control Group, Department of Electrical Engineering, Eindhoven University of Technology, 2002.
5. *Korn G., Korn T.* Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [Mathematical Handbook for scientists and engineers]. Moscow: Nauka, 1974, 832 p.
6. *Daniel Alpay, Israel Gohberg.* The State-Space Method Generalizations and Applications. Birkhäuser Verlag, 2006.
7. *Semenov A.V., Gayduk A.R., Semenova A.V., Gelozhe Yu.A.* Protsedura avtomatizirovannogo sinteza tsifrovyykh upravlyayushchikh sistem [Procedure for automated synthesis of digital control systems], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 4 (153), pp. 150-157.
8. *Filips Ch., Kharbor R.* Sistemy upravleniya s obratnoy svyaz'yu [Control systems with feedback]. Moscow: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2001, 616 p.
9. *John J. d'Azzo, Constantine H. Houpis, Stuart N. Sheldon.* Linear control system analysis and design with Matlab. Marcel Dekker, Inc. NY, USA, 2003.
10. *Matveev V.V., Raspopov V.Ya.* Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsiyal'nykh navigatsionnykh sistem [Fundamentals of building strapdown inertial navigation systems], Under ed. V.Ya. Raspopova. St. Petersburg: GNTs RF OAO «Kontsern» TsNII «Elektropribor», 2009, 280 p.
11. *Petrov B.I., Polkovnikov V.A., Rabinovich L.V. i dr.* Dinamika sledyashchikh privodov: Ucheb. posobie dlya vtuzov [Dynamics of servo drives: a textbook for technical colleges], Under ed. L.V. Rabinovicha. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 1982, 496 p.
12. *Kapralov S., Matveev V., Mayorov V., Pavlov D., Smurov A.* Momentnyy elektroprivod dlya pretsizionnykh sledyashchikh sistem [Torque actuator for precision tracking systems], *Sovremennaya elektronika* [Modern electronics], 2008, No. 5.
13. Elektricheskie mashiny sistem avtomatiki: metodicheskie ukazaniya [Electrical machines automation systems]. Sost. V.D. Sergeev, S.M. Proskurenko. Vladivostok: Izd-vo DVG TU, 2005.
14. *Deych A.M.* Metody identifikatsii dinamicheskikh ob"ektov [Methods of identification of dynamic objects]. Moscow: Energiya, 1979, 240 p.

15. Matlab System Identification Toolbox. Sozdanie lineynykh i nelineynykh modeley dinamicheskikh sistem po izmerennym dannym na vkhode i vykhode. Rukovodstvo po primeneniyu, MathWorks [Matlab System Identification Toolbox. The creation of linear and non-linear dynamic models of all systems to the measured data at the input and the output. Application guide, MathWorks]. Available at: <http://www.mathworks.com/products/datasheets/pdf/system-identification-toolbox.pdf>.
16. Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya: Uchebnik v 3-kh t. [Methods of classical and modern theory of automatic control: a Tutorial in 3 three vol.], Under ed. K.A. Pupkova. Vol. 2: Sintez regulyatorov i teoriya optimizatsii sistem avtomaticheskogo upravleniya [The controller synthesis and optimization theory of automatic control systems], Under ed. N.D. Egupova. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2000, 736 p.
17. *Shlomo Engelberg*. A Mathematical Introduction to Control Theory. (Series in Electrical and Computer Engineering, vol.2) Imperial College Press, 2005.
18. *Gayduk A.R.* Sintez sistem avtomaticheskogo upravleniya po peredatochnym funktsiyam [Synthesis of automatic control systems by transfer functions], *Avtomatika i telemekhanika* [Automation and Remote Control], 1980, No. 1, pp. 11.
19. *D'yakonov V.P.* Matlab i Simulink dlya radioinzhenerov [Matlab and Simulink for radio engineers]. Moscow: DMK Press, 2011, 976 p.
20. *Gul'tyaev A.K.* Matlab 5.2. Imitatsionnoe modelirovanie v srede Windows: Uchebnoe posobie [Matlab 5.2. Imitation modelling in Windows environment: a Training manual]. Moscow: Nauka, 1990, 288 c.
21. *Chen K., Dzhiblin P., Irving A.* MATLAB v matematicheskikh issledovaniyakh [MATLAB in mathematical research]. Moscow: Mir, 2001, 346 p.
22. Polunaturnoe modelirovanie. Bol'shaya Entsiklopediya nefi i gaza [Loop simulation. Big encyclopedia of oil and gas]. Available at: <http://www.ngpedia.ru/id159065p1.html> (accessed 3 April 2015)
23. *Gostev V.I.* Sistemy upravleniya s tsifrovymi regulyatorami. Spravochnik [Control systems with digital controllers. Guide]. Kiev: Tekhnika, 1990, 280 p.
24. *Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael L. Workman.* Digital Control of Dynamic Systems. Addison-Wesley, 1997.
25. *Ioan D. Landau, Gianluca Zito.* Digital Control Systems. Design, identification and implementation. Springer-Verlag, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.В. Соколов.

Ярцев Артем Викторович – Научно-технический центр «Техноцентр» Южного федерального университета; e-mail: artem91light@mail.ru; 347900, г. Таганрог, улица Петровская, 81; тел.: +78634311143; программист.

Yartsev Artyom Viktorovich – Scientific and Technical Center "Technocenter" Southern Federal University; e-mail: artem91light@mail.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347900, Russia; phone: +78634311143; programmer.

УДК 620.9:519.711

В.И. Финаев, Е.Д. Синявская, И.В. Пушнина

НЕЧЕТКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ В ХЛЕБОПЕКАРНОЙ КАМЕРЕ

Цель и задачи данной работы состоят в разработке нечеткой модели управления производственными объектами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, с последующей оценкой ее точности. Решение задачи управления при применении классической теории управления в условиях неопределенности не позволяет обеспечить эффективное управление производственными процессами, функционирующими в условиях априорной неопределенности, и приводит к снижению точности результатов управления. Классическая теория управления не может учитывать неопределенность, а для многих трудноформализуемых производственных объектов управления невозможно найти точную