

ОПЕЙКО О. Ф.

СИНТЕЗ ДИСКРЕТНОГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью работы является синтез дискретного адаптивного пропорционально-интегро-дифференцирующего (ПИД) регулятора для улучшения робастного качества системы. В последние десятилетия управление положением звеньев в промышленных роботах остается актуальной проблемой. В частности, робастное управление по выходу с ПИД-регулятором играет значительную роль. Хорошо известно, что управление с ПИД-регулятором обеспечивает робастное качество для объектов, представимых линейной моделью низкого порядка. В иных случаях может быть полезно адаптивное управление. Предложен критерий адаптации и получен закон адаптивного управления, основанный на методе градиента. Для быстрой адаптации предложен закон управления, содержащий вторую производную, обеспечивающий робастное качество динамики. С другой стороны, со второй производной в законе управления возможно робастное качество без адаптации. Поэтому для системы с ПИД-регулятором необходимо сравнить две альтернативы. Во-первых, неадаптивное управление с ПИД2-регулятором, содержащим вторую производную ошибки в законе управления. Во-вторых, адаптивный ПИД-регулятор, который содержит вторую производную в законе управления, чем достигается быстрая адаптация. Дискретное адаптивное и неадаптивное управление проанализировано методом имитационного моделирования для номинального и возмущенного объекта.

Предложенные критерий адаптации и структура адаптивного управления обеспечивают устойчивость и робастность динамических показателей, что подтверждается имитационным моделированием. Сравнение систем с ПИД2-регулятором и адаптивного ПИД-регулятора показывает преимущество адаптивного регулятора в ширине области устойчивости. Способ применим для управления по выходу, когда выходная управляемая величина измеряется датчиком. К таким системам относятся системы управления положением рабочего органа, в частности, промышленных роботов.

Ключевые слова: дискретная система, ПИД-регулятор, адаптивное управление, метод градиента

Введение

Системы с пропорционально-интегро-дифференцирующими (ПИД) регуляторами широко применяются в промышленной автоматике, так как обеспечивают качество динамики в условиях возмущений объекта [1-11], однако лишь в условиях, когда объект представим линейной моделью низкого порядка. В последние десятилетия актуальна проблема управления в промышленных роботах [5, 6, 11], включая координированное движение звеньев, как правило, вращательных, в том числе управление положением [3]. Управление электроприводом каждого звена робота затруднено изменением динамических свойств с изменением относительного положения звеньев. В связи с этим исследуются разнообразные структуры и методы с ПИД-регуляторами, в том числе адаптивное управление [3], нейроподобные структуры [8], что также означает адаптивность регулятора. Известны способы адаптации за длительное время, большее, чем переходный процесс в системе [10], что не обеспечивает стабильности качества. Кроме того, целесообразность адаптации обосновывается сравнением с неадаптивным ПИД-управлением, в особенности, с применением второй производной ошибки (ПИД2-регулятор).

Целью работы является синтез дискретного адаптивного ПИД-регулятора и сравнительный ана-

лиз неадаптивного и адаптивного законов управления в отношении стабильности качества. Задача робастного синтеза решается для линеаризованного объекта, представленного интегрирующими звеньями, особенно $1 \div 4$ порядков, что характерно для управления положением [3-5, 11].

Адаптация предполагает изменение параметров регулятора в процессе функционирования в направлении минимизации критерия качества, что делает регулятор нелинейным. Градиентный метод [7, 8] обеспечивает устойчивость и актуален также для обучения в искусственных нейронных сетях (ИНС) [8].

Адаптация может быть продолжительнее процессов в системе, а качество динамики должно улучшаться с каждым новым процессом [10]. Вторым вариантом, когда адаптация происходит в переходном процессе и быстрее его, обеспечивает стабильность качества динамики в условиях возмущений, что является предметом рассмотрения в данной работе.

Синтез адаптивного дискретного управления

На входе ПИД-регулятора (рисунок 1) действует сигнал ошибки $x_1 = Y^* - y$, где Y^* – сигнал задания, y – выход системы, $u(k)$ – сигнал управления, рассчитываемый на k -м шаге с интервалом дискретности T_c . Вектор $x(k) = (x_1(k), x_2(k), x_3(k))^T$ переменных системы удовлетворяет разностным уравнениям:

$$\begin{aligned}x_1(k) &= x_1(k-1) + T_c x_2(k-1), \\x_2(k) &= x_2(k-1) + T_c x_3(k-1), \\x_3(k) &= x_3(k-1) + T_c b u(k-1).\end{aligned}\quad (1)$$

Сигнал управления на выходе адаптивного регулятора представлен суммой:

$$\begin{aligned}u(k) &= u_0(k) + u_a(k) = \\&= (c_0^T + c_a^T) x(k), u_0(k) = \\&= -c_0^T x(k), u_a(k) = c_a^T x(k).\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь $u_0(k)$ – неадаптивная составляющая управления с постоянными коэффициентами $c_0 = (c_{0,0}, c_{1,0}, c_{2,0})$, которые рассчитываются для формирования качества динамики неадаптивной системы. Адаптивная составляющая $u_a(k) = -c_a^T x(k)$ содержит настраиваемые в процессе адаптации коэффициенты $c_a = (c_{0,a}, c_{1,a}, c_{2,a})$.

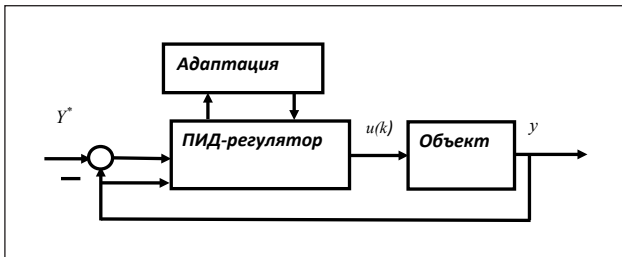


Рисунок 1. Структура системы

Для дискретного ПИД-регулятора в системе с управлением по выходу предлагается критерий адаптации, минимизируемый методом градиента [7, 8], в виде:

$$Q = T_c \sum_{k=1}^{\infty} (u(k)^2 + \lambda T_c^{-2} (\Delta u(k))^2) \rightarrow \min \quad (3)$$

Здесь обозначено $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, далее λ – постоянный коэффициент. Изменение критерия (3) на каждом шаге $\Delta Q(k) = T_c(u^2(k) + \lambda T_c^{-2}(\Delta u(k))^2)$ зависит, в частности, от вектора c параметров управления, что позволяет записать выражение градиента:

$$\begin{aligned}\text{grad}_c(\Delta Q) &= \{\partial \Delta Q / \partial c_i\} = \\&= 2T_c \begin{bmatrix} u_k x_{0k} + \lambda T_c^{-2} \Delta u_k \Delta x_{0k} \\ -u_k x_{1k} - \lambda T_c^{-2} \Delta u_k \Delta x_{1k} \\ -u_k x_{2k} + \lambda T_c^{-2} \Delta u_k (\Delta x_{1k} - \Delta x_{1k-1}) \end{bmatrix}, \quad (4) \\&\quad (i = 0, 1, 2).\end{aligned}$$

Выражение (4) представлено двумя составляющими: при $\lambda = 0$ действует первая компонента медленной адаптации, а при $\lambda \rightarrow \infty$ имеет место быстрая адаптация, требующая, однако, дискретного дифференцирования сигналов, что видно из выражений (4).

С учетом обозначения $\Lambda_i = 2T_c^{-1} \gamma_i$ ($i = 0, 1, 2$) искомого изменения $\Delta c(k) = c(k) - c(k-1)$ вектора параметров обратно градиенту в соответствии с [7], и для каждого $c_i(k)$ означает:

$$\begin{aligned}c_0(k) &= c_0(k-1) - \Lambda_0 \Delta u(k) \Delta x_0(k), \\c_1(k) &= c_1(k-1) - \Lambda_1 \Delta u(k) \Delta x_1(k), \\c_i(k) &= c_i(k-1) - \Lambda_2 \Delta u(k) \Delta x_2(k).\end{aligned}\quad (5)$$

Здесь $\gamma_0, \gamma_1, \gamma_2$ – коэффициенты интенсивности адаптации, Λ_i приняты $\Lambda_i = c_{i,0}$ ($i = 0, 1, 2$). Выражения (4) показывают, что интенсивность настройки параметров пропорциональна ошибке $\Delta x_0(k)$ регулирования и производным ошибки, и должна стремиться к нулю в установившемся режиме.

Результаты моделирования

Моделирование выполнено для системы с неадаптивным ПИД2-регулятором и с адаптивным ПИД-регулятором в соответствии с (5). Коэффициенты c_{0i} ($i = 0, 1, 2$) приняты равными $c_{0,0} = 1, c_{0,1} = 2, c_{0,2} = 1$. Параметры ПИД2-регулятора $c_{i,j}$ ($i = 0, 1, 2, 3$), равны 1, 3, 3 и 1 соответственно. Для значений параметров объекта $n = 3, b = 5, a_4 = 20, a_j = 0, (j = 0, \dots, 3)$ (рисунок 2, а) изменение выходной величины y при ступенчатом воздействии Y^* в обеих системах мало отличается, как и сигнал управления на рисунке 2, б, в.

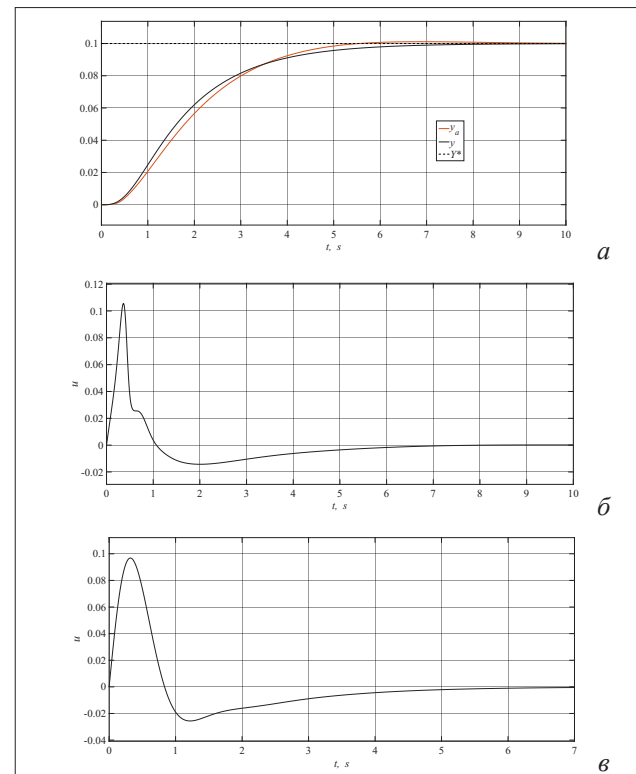


Рисунок 2. Процесс в системе с расчетными параметрами с адаптацией y_a и без адаптации $-y(a)$, сигналы управления адаптивный (б) и неадаптивный (в)

При возмущенном объекте с параметрами $n = 4$, $b = 1,5$, $a_4 = 10$, $a_j = 0$, ($j = 0, \dots, n$) система с ПИД2-регулятором неустойчива (рисунок 3), а при адаптивном управлении устойчивость сохраняется, и качество мало изменяется. На рисунке 4 представлено изменение параметров c_0 , c_1 , c_2 регулятора в процессе

адаптации для исходного (рисунок 4, а) и возмущенного (рисунок 4, б) объекта. В первом случае изменение параметров не столь значительно, как во втором (рисунок 4, б), где более чем в 10 раз растет c_2 , что в сочетании с увеличением c_1 способствует запасу устойчивости.

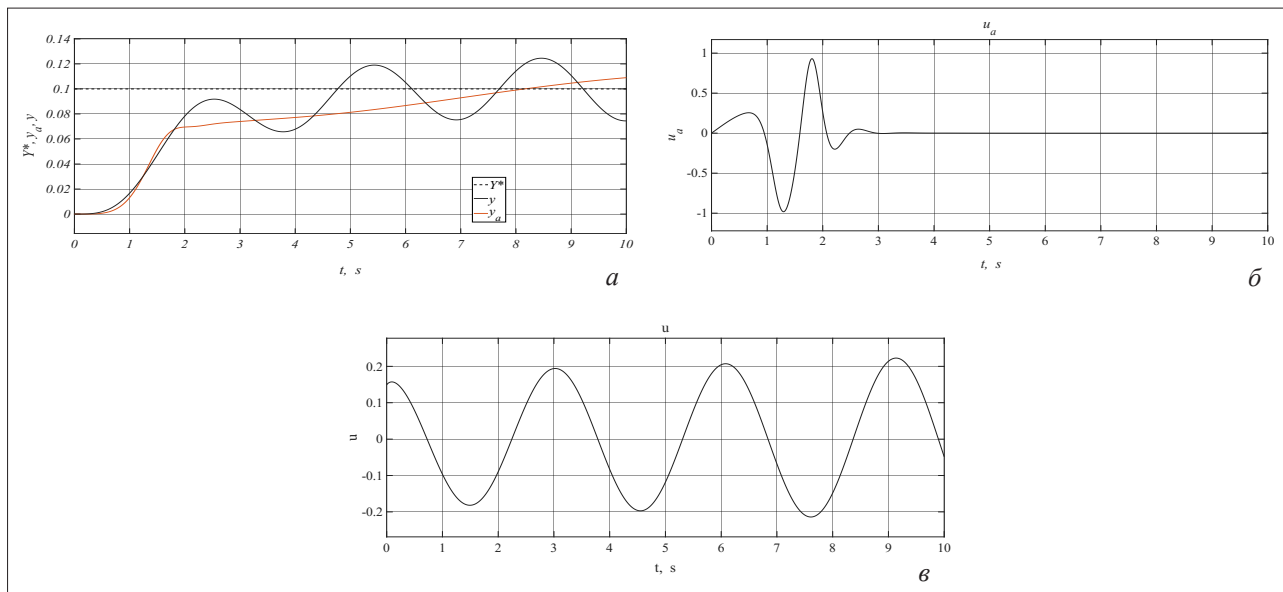


Рисунок 3. Процесс в системе с возмущенным объектом, (а), сигналы управления, адаптивного (б) и неадаптивного (в) для $n = 4$

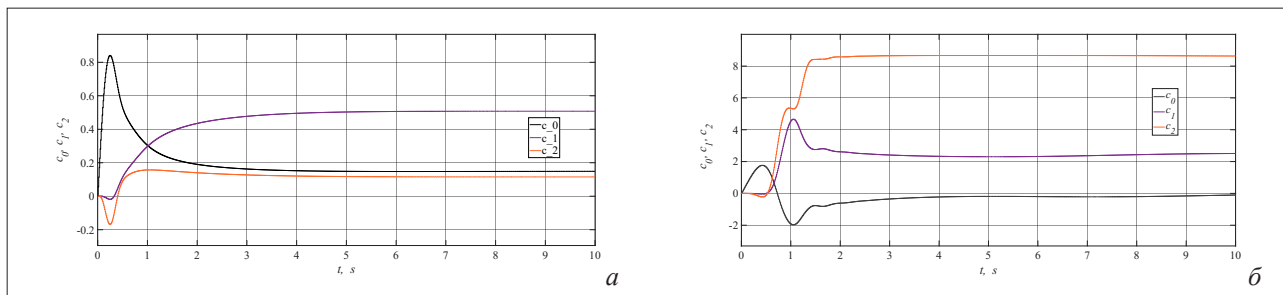


Рисунок 4. Процессы изменения параметров регулятора в системе с адаптацией при расчетных параметрах (а) и для возмущенного объекта (б)

Так в процессе адаптации расширяется область устойчивости в пространстве параметров, что и является преимуществом.

Заключение

Предложенные критерий адаптации и структура адаптивного управления обеспечивают устойчивость и робастность динамических показателей,

что подтверждается имитационным моделированием. Сравнение систем с ПИД2-регулятором и адаптивного ПИД-регулятора показывает преимущество адаптивного регулятора в ширине области устойчивости. Способ применим для управления по выходу, когда выходная управляемая величина измеряется датчиком. К таким системам относятся системы управления положением рабочего органа, в частности, промышленных роботов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Astrom, K. J. Advanced PID Control / K. J. Astrom, T. Hagglund. Nord Carolina : ISA, 2006. 461 p.
2. Pajchrowski, T. Neural Speed Controller Trained Online by Means of Modified RPROP Algorithm / T.

Pajchrowski, K. Zawirski, K. Nowopolski // IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. Vol. 11, №2. P. 560–568. DOI: 10.1109/tii.2014.2359620.

3. Zhai, Y.–Y. Robust Adaptive Tracking Control for Nonlinearly Parameterized High-Order Systems with Unmatched Disturbances / Yu–Yao Zhai, Shaohua Yang, Zong–Yao Sun // IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 129031–129042. DOI: 10.1109/access.2023.3332365.

4. A Tracking Control of a Flexible-Robot Including the Dynamics of the Induction Motor as Actuator / F. J. Torres, J.P. Ramirez-Paredes, M.A. Garcia-Murillo [et al.] // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 82373–82379. DOI: 10.1109/access.2021.3086813.

5. Sarcinelli-Filho, M. Control of Ground and Aerial Robots / Mario Sarcinelli-Filho, Ricardo Carelli. Springer International Publishing, 2023. XIV, 146 p. DOI: 10.1007/978-3-031-23088-2.

6. Kulkarni, P. Tuning of a Robotic Arm using PID Controller for Robotics and Automation Industry / P. Kulkarni, O. Kulkarni, J. K. Sayyad // 2024 6th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE), Shillong, India, 20-22 June 2024. P. 1–6. DOI:10.1109/icepe63236.2024.10668952.

7. Фрадков, А. Л. Адаптивное управление в сложных системах : беспоисковые методы / А. Л. Фрадков. М. : Наука, 1990. 292, [1] с.

8. Головки, В. А. Краснопрошин В.В. Нейросетевые технологии обработки данных / В.А. Головки. Мн. : БГУ, 2017. 263 с.

9. Опейко, О. Ф. Робастный синтез дискретных ПИД регуляторов для объектов с интервальными параметрами / О. Ф. Опейко // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19, № 6. С. 374-379. DOI: 10.17587/mau.19.374-379.

10. Опейко, О. Ф. Управление по выходу с пропорционально–дифференцирующим адаптивным регулятором / О. Ф. Опейко // Системный анализ и прикладная информатика. 2016, №3. С. 35-39. URL: <https://sapi.bntu.by/jour/article/view/118/100> (date of access: 17.10.2025).

11. Opeiko, O. F. Synthesis of the Robust Electric Drive for Robot Control Using PI Controllers Parameterization on the Basis of Root Locus Approach / O. F. Opeiko, A. A. Nesenchuk // 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Genova, 03-05 September 2019. P. 1-10. DOI: 10.23919/epe.2019.8915531.

REFERENCES

1. Astrom K.J., Hagglund T. Advanced PID Control. ISA; 2006. 461 p.
2. Pajchrowski T., Zawirski K., Nowopolski K. Neural Speed Controller Trained Online by Means of Modified RPROP Algorithm. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015;11(2):560–568. <http://dx.doi.org/10.1109/tii.2014.2359620>
3. Zhai Y.Y., Yang S., Sun Z.Y. Robust Adaptive Tracking Control for Nonlinearly Parameterized High-Order Systems with Unmatched Disturbances. IEEE Access. 2023;11:129031–129042. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2023.3332365>
4. Torres F.J., Ramirez–Paredes J.P., Garcia–Murillo M.A., Martinez–Ramirez I., Capilla-Gonzalez G., Ramirez V.A. A Tracking Control of a Flexible-Robot Including the Dynamics of the Induction Motor as Actuator. IEEE Access. 2021;9:82373–82379. <http://dx.doi.org/10.1109/access.2021.3086813>
5. Sarcinelli–Filho M., Carelli R. Control of Ground and Aerial Robots. Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering. Springer International Publishing; 2023. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-23088-2>
6. Kulkarni P., Kulkarni O., Sayyad J.K. Tuning of a Robotic Arm using PID Controller for Robotics and Automation Industry. 2024 6th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE). 2024 Jun 20;1–6. <http://dx.doi.org/10.1109/icepe63236.2024.10668952>
7. Fradkov A.L. Adaptive control in complicate systems. Moscow: Nauka; 1990. 378 p. (in Russian).
8. Golovko V.A., Krasnoprosin V.V. Neural network technologies for data processing. Minsk: BGU; 2017. 263 p. (in Russian).
9. Opeiko O.F. Robust Synthesis of Discrete PID Controllers for Objects with Interval Parameters. Mehatronika, avtomatizacia, upravlenie = Mechatronics, automation and control. 2018 Jun 20;19(6):374–379 (in Russian). <http://dx.doi.org/10.17587/mau.19.374-379>
10. Opeiko O.F. Output Control with Adaptive-proportional Differential Controller. Sistemnyj analiz i prikladnaâ informatika = System analysis and applied information science. 2016;3:35-39 (in Russian). Available at: <https://sapi.bntu.by/jour/article/view/118/100> (accessed 17.10.2025).
11. Opeiko O.F., Nesenchuk A.A. Synthesis of the Robust Electric Drive for Robot Control Using PI Controllers Parameterization on the Basis of Root Locus Approach. 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe). 2019 Sep;1-10. <http://dx.doi.org/10.23919/epe.2019.8915531>.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований (ГПНИ) «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства», подпрограммы «Цифровые технологии и космическая информатика» по заданию: 1.3.4 Робастное интеллектуальное управление в мехатронных технических системах № ГР 20212520.

ОПЕЙКО О. Ф.

SYNTHESIS OF DISCRETE ADAPTIVE PID CONTROL

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

Abstract. *The aim of the work is to improve the proportional integral differential (PID) controlled system robustness using the discrete adaptive control rule. In the recent decades, the tracking control of the industrial robots' actuators remains an actual problem. In particular, the robust output PID-control stands of significant importance. It is well known, that PID output control provide robustness for the low order plant model. Otherwise, adaptation-based control can be helpful. The criteria of the adaptation are proposed and the gradient method based adaptation rule is evaluated. For the fast adaptation, the control law offered with the second derivative, which assures the dynamics robust quality. On other hand, with the second derivative in control law, it is possible to reach high robustness without adaptation. Hence, in the system with PID control, two alternatives must be compared. Firstly, the not adaptive PID2 controller with second derivative in control law. Secondly, the adaptive PID controller, which fastness achieved with the second derivative in the control law. The discrete adaptation and its comparison with not adaptive discrete PID2 control are analyzed by means of simulation for nominal and perturbed plant. The simulation results demonstrate the high efficiency of the proposed method of adaptation.*

The proposed criteria of adaptation and structure of the fast adaptive control rule provide stability and the robustness of dynamics, suggested by simulation. The comparison of the systems with PID2 controller and the adaptive one demonstrate advantage of the adaptive controller because of the width stability range. The method is useful only for output control when the output value is measured by sensor. That can be tracking control systems, for instance, robots' end effectors.

Keywords: *discrete system, PID controller, adaptive control, gradient method*

Опейко Ольга Федоровна

Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь. Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт» (НИПИ), Отраслевая научно-исследовательская лаборатория инновационной энергетики (ОНИЛ ИЭ). Кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник.

Olga F. Opeiko

Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus. ONIL Innovatsionnaya energetika.

PhD of Engineering Sciences. Associate Professor. Leading Researcher.

E-mail: oopeiko@bntu.by

Тел.: +375299774189