

УДК 531.36

Синтез нелинейных регуляторов для управляемых механических систем *

А.С. Андреев ¹

Ульяновский государственный университет¹

Проблема применения ПИД-регуляторов в управлении механическими системами исследована во многих работах [1] – [30]. Значительно меньше исследованы применение ПИ-регуляторов и задача о стабилизации движений без измерения скоростей [31] – [35]. В докладе дается обзор известных результатов по решению задач о стабилизации движений механических систем посредством управлений типа ПИ- и ПИД-регуляторов. Излагаются новые результаты в этой области на основе развития метода функционалов Ляпунова в исследовании устойчивости интегро-дифференциальных уравнений типа Вольтерра [36] – [46].

Литература

1. Astrom K., Hagglund T. *Advanced PID control*. 2006.
2. Aidan O'Dwyer. *Handbook of PI and PID controller tuning rules*, 3th Edition. London: Imperial College Press, 2009.
3. Александров А.Г., Паленов М.В. Состояние и перспективы развития адаптивных ПИД-регуляторов // *Автоматика и телемеханика*. 2014. № 2. С. 16-20.
4. Arimoto S., Miyazaki F. Stability and robustness of PID feedback control for robot manipulators of sensory capability. In M. Brady and R.P. Paul (Ed.), *Robotics Researches: First International Symposium* MIT press, Cambridge, MA, 1984. P. 783-799.
5. Arimoto S., Naniwa T., Suzuki H. Asymptotic stability and robustness of PID local feedback for position control of robot manipulators // *Proc. ICARCV*. Singapore. 1990. P. 382-386.
6. Wen J. T., Murphy S. PID control for robot manipulators. CIRSSE Document 54, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY. 1990.
7. Qu Z., Dorsey J. Robust PID control of robots // *Int. Journal of Robotics and Automation*. 1991. V. 6. № 4. P. 228-235.
8. Arimoto S. A class of quasi-natural potentials and hyper-stable PID servo-loops for nonlinear robotic systems // *Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers*. 1994. V. 30. № 9. P. 1005-1012.
9. Kelly R. A tuning procedure for stable PID control of robot manipulators // *Robotica*. 1995. V. 13. № 2. P. 141-148.
10. Ortega R., Loria A., Kelly R. A semiglobally stable output feedback PI2D regulator for robot manipulators // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1995. V. 40 (8). P. 1432-1436.

*Работа выполнена в рамках государственного задания по НИР № 9.5994.2017/БЧ Минобрнауки России.

11. Arimoto S. Fundamental problems of robot control: Part I, Innovation in the realm of robot servo-loops // *Robotica*. 1995. V. 13. P. 19-27.
12. Arimoto S. *Control Theory of Non-Linear Mechanical Systems: A Passivity-Based and Circuit-Theoretic Approach*. Oxford, U.K.: Clarendon Press, 1996.
13. Rocco P. Stability of PID control for industrial robot arms // *IEEE Transactions on Robotics and Automation*. 1996. V. 12. № 4. P. 606-614.
14. Kelly R. Global positioning of robot manipulators via PD control plus a class of nonlinear integral actions // *IEEE Trans. Automat. Contr.* 1998. V. 43. № 4. P. 934-937.
15. Santibanez V., Kelly R. A class of nonlinear PID global regulators for robot manipulators // *Proceedings of the IEEE international conference on robotics and automation*. Leuven, Belgium. 1998. P. 3601-3606.
16. Gorez R. Globally stable PID-like control of mechanical systems // *Systems and Control Letters*. 1999. V. 38. P. 61-72.
17. Alvarez J., Cervantes I., Kelly R. PID regulation of robot manipulators: stability and performance // *Systems and Control Letters*. 2000. V. 41. P. 73-83.
18. Cervantes I., Alvarez-Ramirez J. On the PID tracking control of robot manipulators // *Systems and Control Letters*. 2001. V. 42. P. 37-46.
19. Alvarez J., Kelly R., Cervantes I. Semiglobal stability of saturated linear PID control for robot manipulators // *Automatica*. 2003. V. 39. P. 989-995.
20. Jafarov E. M., Parlakci M. N. A., Istefanopulos Y. A new variable structure PID-controller design for robot manipulators // *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* 2005. V. 13. № 1. P. 122-130.
21. Kelly R., Santibanez V., Loria A. *Control of Robot Manipulators in Joint Space*. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
22. Meza J.I., Santibanez V., Hernandez V. Saturated nonlinear PID global regulator for robot manipulators: Passivity based analysis // *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic. 2005.
23. Meza J.L., Santibanez V., Campa R. An Estimate of the Domain of Attraction for the PID Regulator of Manipulators // *International Journal of Robotics and Automation*. 2007. V. 22. № 3. P. 187-195.
24. Alvarez J., Santibanez V. and Campa R. Stability of robot manipulators under saturated PID compensation // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2008. V. 16. № 6. P. 1333-1341.
25. Santibanez V., Kelly R., Zavala-Rio A., Parada P. A new saturated nonlinear PID global regulator for robot manipulators // *Proceedings of the 17th IFAC World Congress*, Seoul, Korea. 2008.
26. Sun D., Hu S., Shao X., Liu C. Global stability of a saturated nonlinear PID controller for robot manipulators // *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 2009. V. 17. № 4. P. 892-899.
27. Orrante J., Santibanez V., Campa R. *On Saturated PID Controllers for Industrial Robots: the PA10 Robot Arm as Case of Study, Advanced Strategies for Robot Manipulators*, S. Ehsan Shafiei (Ed.), 2010. ISBN: 978-953-307-099-5, InTech.

28. Santibanez V., Camarillo K., Moreno-Valenzuela J., Campa R. A practical PID regulator with bounded torques for robot manipulators // *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2010. V. 8. № 3. P. 544-555.
29. Meza J.L., Santibanez V., Soto R., Perez J. and Perez J. Analysis via passivity theory of a class of nonlinear PID global regulators for robot manipulators // *Advances in PID Control*. Chapter 3. Edited by Valery D. Yurkevich, InTech, 2011. P. 45-64. ISBN 978-953-307-267-8
30. Loria A., Lefeber E., Nijmeijer H. Global asymptotic stability of robot manipulators with linear PID and PI2D control // *Stability Control: Theory Appl.* 2000. V. 3. No. 2. P. 138-149.
31. Berghuis H., Nijmeijer H. Global regulation of robots using only position measurements // *Systems Contr. Lett.* 1993. V. 21. No. 4. P. 289-293.
32. Berghuis H., Nijmeijer H. A passivity approach to controller-observer design for robots // *IEEE Trans. Robotics Autom.* 1993. V. 9. No. 6. P. 740-754.
33. Бурков И.В. Стабилизация натуральной механической системы без измерения её скоростей с приложением к управлению твёрдым телом // *ПММ*. 1998. Т.62. Вып. 6. С. 923-933.
34. Burkov I.V. Stabilization of position of uniform motion of mechanical systems via bounded control and without velocity measurements // *3-rd IEEE Multi-conf. Systems Control*. St Petersburg. 2009. P. 400-405.
35. Andreev A.S., Peregudova O.A., Makarov D.S. Motion control of multilink manipulators without velocity measurement // *Proc. 2016 Intern. Conf. Stability Oscill. Nonlin. Control Syst. (Pyatnitskiy's Conf.)*. 2016.
36. Андреев А.С., Перегудова О.А., Раков С.Ю. Уравнения Вольтерра в моделировании нелинейного интегрального регулятора // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2016. № 3(18). С. 8–18.
37. Перегудова О.А., Макаров Д.С. Стабилизация программного движения манипуляционных роботов на основе измерения координат звеньев // *Журнал Средневолжского математического общества*. 2016. № 4(18). С. 46–51.
38. Андреев А.С., Макаров Д.С. О стабилизации стационарных программных движений управляемой механической системы // *Ученые записки Ульяновского государственного университета. Серия Математика и информационные технологии*. 2016. Вып. 1(8). С. 10–14.
39. Андреев А.С., Раков С.Ю., Дороговцева Е.В. Об управлении трехзвенным манипулятором-роботом на основе нелинейного интегрального регулятора // *Ученые записки Ульяновского государственного университета. Серия Математика и информационные технологии*. 2016. Вып. 1(8). С. 15–17.
40. Макаров Д.С., Перегудова О.А. О стабилизации программных позиций голономной механической системы без измерения скоростей // *Ученые записки Ульяновского государственного университета. Серия Математика и информационные технологии*. 2016. Вып. 1(8). С. 64–71.
41. Андреев А.С., Перегудова О.А. О стабилизации программных движений голономной механической системы без измерения скоростей // *Прикладная математика и механика*. 2017. Т. 81. Вып. 2. С.137–153.

42. Andreev A., Peregudova O. Non-linear PI regulators in control problems for holonomic mechanical systems // Systems Science and Control Engineering. 2018. V. 6. No. 1. P. 12-19.
43. Andreev A.S., Bezglasnyi S.P., Peregudova O.A. On Stabilization of Stationary Program Motions of a Controlled Mechanical System // Lecture Notes in Engineering and Computer Science. 2017. P. 777-781.
44. Андреев А.С., Перегудова О.А. Нелинейные регуляторы в задачах управления механическими системами // Автоматизация процессов управления. 2017. Т. 50. № 4. С. 42-47.
45. Andreev A., Peregudova O. Non-linear PI and PID regulators in mechanical system control // PHYSCON 2017, Florence, Italy, 17–19 July, 2017.
46. Андреев А.С., Перегудова О.А. Нелинейные регуляторы в задаче о стабилизации положения голономной механической системы // Прикладная математика и механика. 2018. Т. 82. Вып. 2. С. 156-176.

MSC 93C10

Synthesis of nonlinear regulators for controlled mechanical systems

A.S. Andreev ¹

Ulyanovsk state university ¹