

Б. И. КУЗНЕЦОВ, д-р. техн. наук, проф., зав. отд. ИТПМ НАН Украины, Харьков;
Т. Б. НИКИТИНА, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. ХНАДУ, Харьков;
В. В. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, доц., директор УНППИ УИПА, Харьков;
В. В. ХОМЕНКО, асп. УИПА, Харьков

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ

Введение. Подавляющее большинство существующих электромеханических следящих систем построены по принципу подчиненного регулирования и содержат контуры момента (тока), скорости и положения с типовыми регуляторами. В связи с наличием сухого трения на валах исполнительного двигателя и рабочего механизма, введение интегральной составляющей в контуре регулирования положения приводит к возникновению незатухающих колебаний. Поэтому в существующих следящих электромеханических системах применяют пропорционально-дифференциальные регуляторы, реализуемые с помощью гироскопических датчиков углового положения и угловой скорости рабочего органа.

Постановка проблемы. Точность управления такими системами в значительной степени определяется наличием нелинейных элементов. При движении рабочего органа с малой скоростью влияние сухого трения на валах исполнительного двигателя и рабочего органа вызывает неравномерность движения, что приводит к ухудшению технических характеристик системы. А при движении с большой скоростью наличие сухого трения практически не оказывает влияние на показатели качества системы. Однако при больших перемещениях время регулирования определяется энергетическими характеристиками исполнительного двигателя – максимальными значениями его момента и скорости вращения.

Наличие упругих элементов между приводным двигателем, редуктором и приводным механизмом также влияет на динамические характеристики системы. По мере повышения быстродействия и расширения полосы пропускания системы собственные механические колебания начинают влиять на динамику: в переходном процессе появляются колебания, в частотной характеристике системы возникают выбросы, а по мере приближения полосы пропускания к первой частоте собственных недемпфированных колебаний механической части система становится неустойчивой.

Анализ литературы. Существующие типовые регуляторы, в основном, исчерпали возможности дальнейшего повышения точности управления [1 – 2]. Постоянное повышение требований к точности работы электромеханических следящих систем обуславливает применение новых современных законов управления. Одним из возможных направлений существенного повышения качества таких систем является реализация управления по вектору состояния, в частности, на основе теории робастного управления [3].

Робастные регуляторы состояния являются линейными регуляторами по вектору состояния исходной линейной системы, восстановленному с помощью линейных робастных наблюдателей. Однако анализ синтезированных систем необходимо проводить с учетом наличия существенных нелинейностей объекта управления, таких как сухое трение на валах двигателя и рабочего механизма, изменение параметров объекта управления в ходе работы системы и другие факторы и при этом необходимо выполнить исследование работы системы в различных режимах работы системы.

Целью данной статьи является исследование влияния нелинейностей и вариации параметров объекта управления на динамические характеристики электромеханических следящих систем с робастными регуляторами по сравнению с системами с типовыми регуляторами.

Изложение материала исследования. Существующие следящие электромеханические системы с пропорционально-дифференциальным регулятором положения являются статическими системами. В процессе наведения рабочего органа основным режимом работы системы является отработка линейно нарастающего, либо линейно убывающего задания по положению объекта сопровождения [1]. Для устранения установившейся ошибки в таком режиме работы, система управления положением рабочего органа должна обладать астатизмом второго порядка. С этой целью при синтезе системы в математическую модель расширенного объекта управления введем два последовательно соединенные интегрирующие звена.

Метод решения. Синтезируем робастный регулятор следящей электромеханической системы [3] с помощью решения [4 – 7] многокритериальной задачи нелинейного программирования с ограничениями [8 – 9] на основе построения Парето оптимальных решений [10 – 12] с помощью алгоритмов стохастической мультиагентной оптимизации мультироем частиц [13 – 15], что позволяет сократить время решения задачи и удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе следящей электромеханической системы в различных режимах [1 – 2].

К проектируемым многомассовым системам управления предъявляются разнообразные требования при их работе в различных режимах. Как правило, накладываются определенные ограничения на качество переходных процессов – задается время первого согласования, время регулирования,

перерегулирование и т.д. Обычно также задается максимальная дисперсия ошибки слежения либо стабилизации при отработке случайных задающих воздействий, либо компенсация случайных возмущающих воздействий, и при этом, естественно, должны удовлетворяться ограничения на переменные состояния и управления. Еще одним требованием, предъявляемым к системам управления, является ограничение ошибок отработки задающих, либо компенсации возмущающих воздействий в виде гармонических сигналов. При этом может быть задан входной сигнал одной частоты, либо несколько характерных рабочих частот, а может быть задан диапазон рабочих частот, в котором необходимо выполнить определенные условия. И, наконец, для следящих систем повышенной точности характерным режимом работы является отработка малых скоростей либо малых перемещений. Для этого режима обычно задается неплавное движение в виде соответствующих критериев. Причинами неплавного движения рабочего органа на низких скоростях является наличие нелинейностей типа сухое трение в исполнительных двигателях и рабочих органах и упругих элементов между исполнительным двигателем и рабочим органом, что приводит к срывным колебаниям подвижных частей исполнительного двигателя и рабочего органа, сопровождающихся остановками и срывами подвижных частей относительно положения останков. Одним из основных требований, предъявляемых к многомассовым системам управления, является также требование робастности синтезированной системы, т.е. способность системы сохранять предъявляемые к ней технические требования при изменении в определенных пределах параметров объекта управления и внешних воздействий.

Результаты моделирования на ЭВМ. Вначале проведем исследование динамических характеристик следящей электромеханической системы с синтезированным робастным регулятором с астатизмом второго порядка при учете всех нелинейностей для трех различных значений момента инерции объекта управления при наведении на малых скоростях. На рис. 1. показаны переходные процессы в электромеханической следящей системе при наведении на малых скоростях (0,02град/с). На рисунке показаны следующие переменные состояния: а) угла поворота рабочего органа $\varphi(t)$; б) скорости вращения рабочего органа $\omega_M(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_D(t)$; д) тока двигателя $I_{\text{я}}(t)$; е) напряжения на якровой цепи двигателя $U_{\text{я}}(t)$.

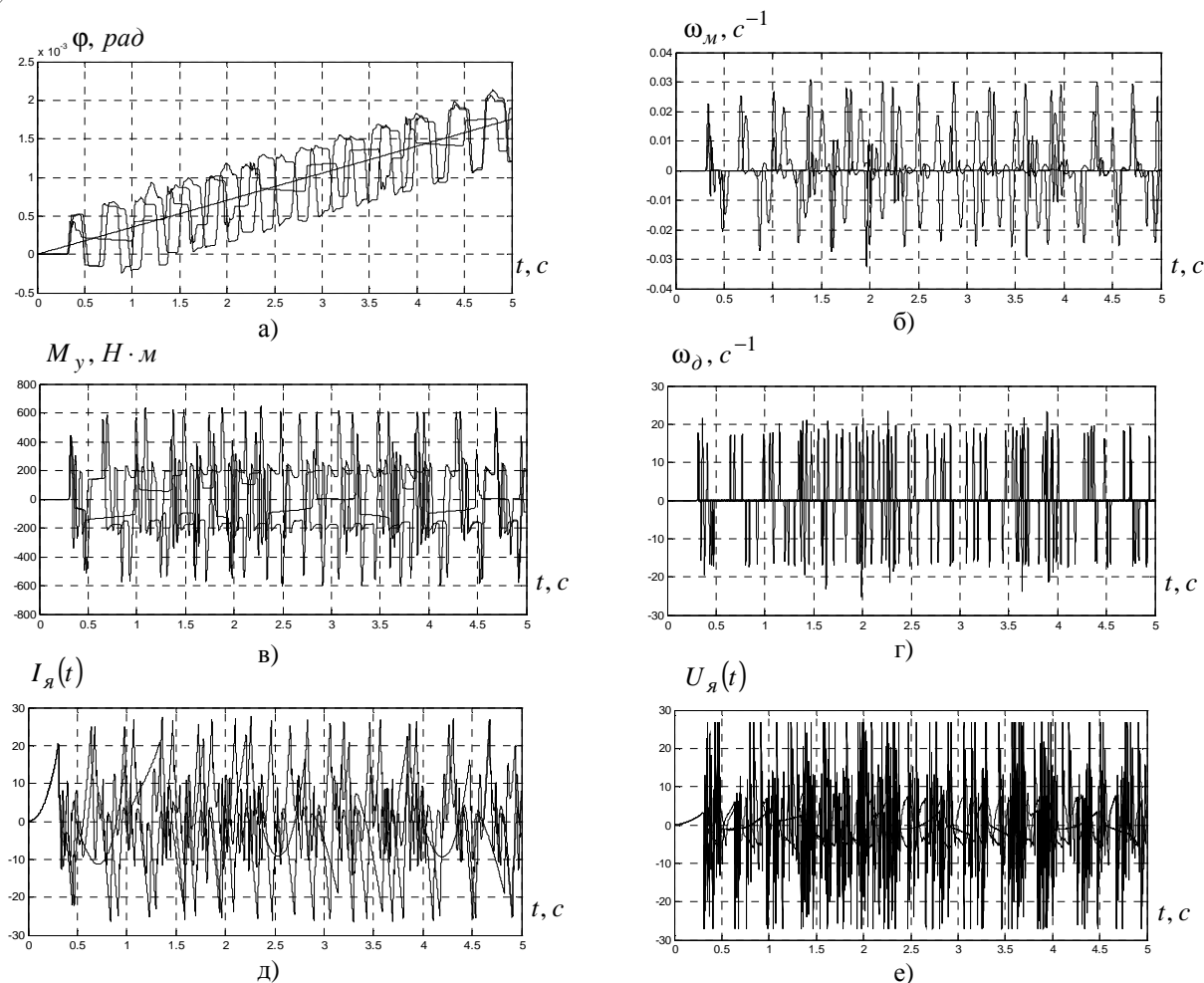


Рис. 1 Переходные процессы при наведении на малых скоростях (0,02град/с): а) угла поворота башенки $\varphi(t)$; б) скорости вращения башенки $\omega_M(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_D(t)$; д) тока двигателя $I_{\text{я}}(t)$; е) напряжения на якровой цепи двигателя $U_{\text{я}}(t)$.

Как видно из этого рисунка, при наведении объекта с малой скоростью установившаяся ошибка при обработке системой линейно-нарастающего сигнала равна нулю, однако движение рабочего органа сопровождается остановками и участками с изменением знака скорости движения относительно заданного значения угла поворота рабочего органа. В целом, несмотря на наличие двух интегрирующих звеньев регулятора для объекта управления, у которого имеется существенное сухое трение на валах двигателя и рабочего органа, система сохраняет устойчивость при изменении момента инерции объекта управления в заданных пределах.

Проведем теперь исследование динамических характеристик следящей электромеханической системы с синтезированным робастным регулятором с астатизмом второго порядка с учетом всех нелинейностей для трех различных значениях момента инерции объекта управления при наведении на больших скоростях. На рис. 2 показаны переходные процессы в электромеханической следящей системе при наведении на больших скоростях (6 град/с). На этом рисунке, так же как и на рис. 1, показаны следующие переменные состояния: а) угла поворота рабочего органа $\varphi(t)$; б) скорости вращения рабочего органа $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_y(t)$; е) напряжения на якорной цепи двигателя $U_y(t)$.

Как видно из этого рисунка, при наведении объекта с большой скоростью установившаяся ошибка при обработке системой линейно-нарастающего сигнала равна нулю, и при этом рабочий орган движется достаточно плавно.

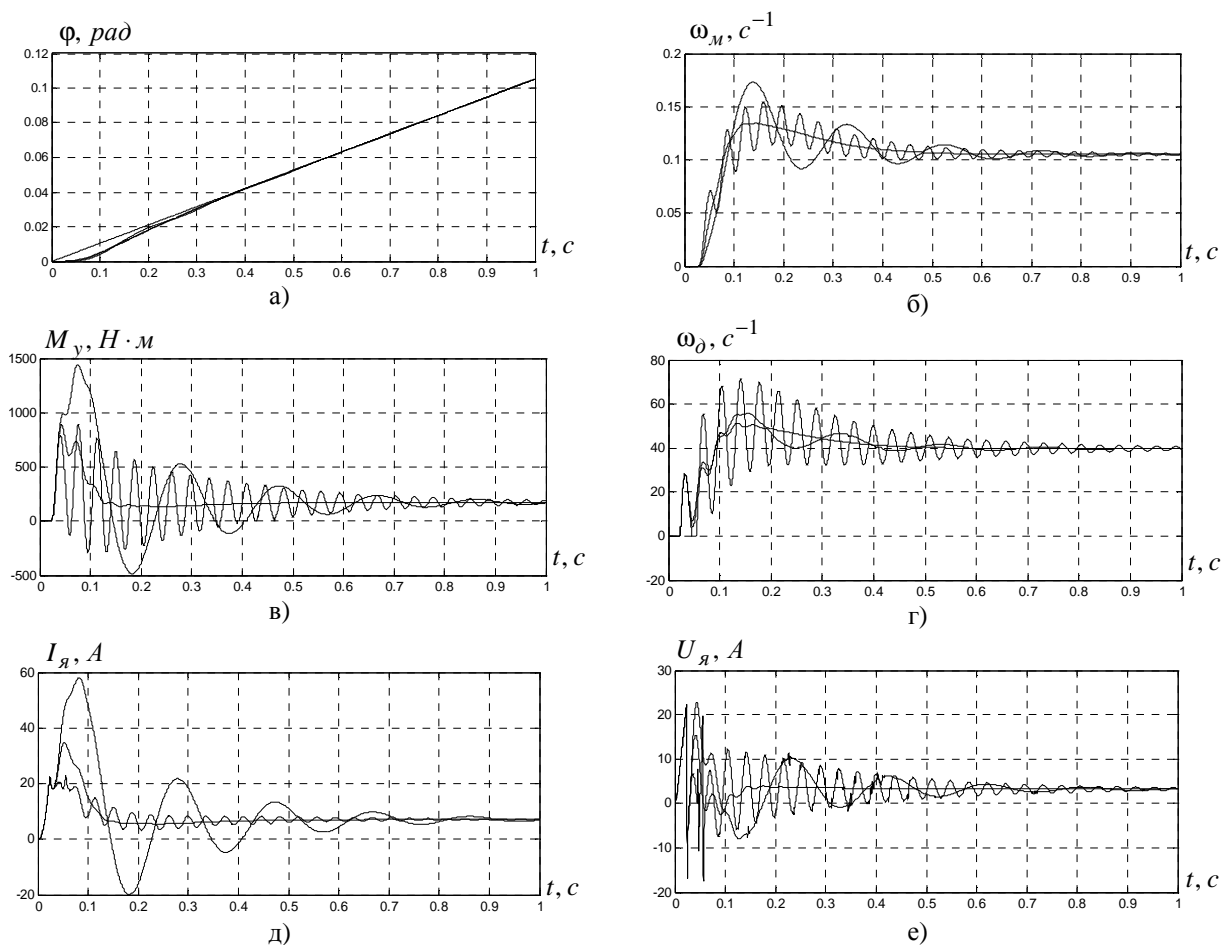


Рис. 2 Переходные процессы при наведении на больших скоростях (6 град/с): а) угла поворота башенки $\varphi(t)$; б) скорости вращения башенки $\omega_m(t)$; в) момента упругости $M_y(t)$; г) скорости двигателя $\omega_d(t)$; д) тока двигателя $I_y(t)$; е) напряжения на якорной цепи двигателя $U_y(t)$.

Выводы. Наличие нелинейных элементов, а также изменение параметров объекта управления в процессе работы электромеханических следящих систем оказывает влияние на динамические характеристики систем с синтезированными робастными регуляторами состояния. Однако их влияние на динамические характеристики системы с робастными регуляторами существенно меньше по сравнению с системой с типовыми регуляторами.

В существующих следящих электромеханических системах применяют пропорционально - дифференциальный регулятор положения, так что система является статической. Введение интегральной составляющей в контур регулирования положения приводит к возникновению незатухающих колебаний в связи с наличием сухого трения на валах исполнительного двигателя и рабочего механизма. В синтезируемой системе с робастным регулятором состояния реализован второй порядок астатизма за счет введения в контур управления двух

интегрирующих звеньев. Это позволило устранить установившуюся ошибку при обработке линейно нарастающего задающего воздействия, в то время как существующая система с пропорционально-дифференциальным регулятором имеет установившуюся статическую ошибку по положению рабочего органа.

Изменение момента инерции рабочего механизма в заданных пределах практически не приводит к изменению динамических характеристик синтезированной системы с робастным регулятором, в то время как в существующей системе с пропорционально-дифференциальным регулятором это изменение динамических характеристик существенно. Таким образом, синтезированная система с робастным регулятором обладает большей робастностью по отношению к изменению параметров объекта управления в сравнении.

Список литературы: 1. Кузнецов Б.И. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов многомассовых электро-механических систем / Б.И. Кузнецов, Т.Б. Никитина, М.О. Татарченко, В.В.Хоменко // Технічна електродинаміка. – 2014. – №4. – С. 105 – 107. 2. Liu G.P. Multiobjective Optimization and Control /G.P. Liu, J.B. Yang, J.F. Whidborne. – Research Studies Press Ltd, 2003. – 320 p. 3. Diamond P. Anisotropy – based Performance Analysis of Linear Discrete Time Invariant Control Systems / P. Diamond, I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov / Int. J. Control. – 2001. – V. 74. – Pp. 28 – 42. 4. Kennedy J. Swarm Intelligence / J. Kennedy, R.C. Eberhart, Y. Shi. – San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2001. 5. Clerc M. Particle Swarm Optimization / M. Clerc. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p. 6. Gazi V. Swarm Stability and Optimization / V. Gazi, K.M. Passino. – Springer, 2011. – 318 p. 7. Xin-She Yang. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications / Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, Mehmet Karamanoglu. – Elsevier Inc., 2013. – 450 p. 8. Kurdukov A.P. Computing Anisotropic Optimal Controller for System with Parametric Uncertainty via Homotopy – based Algorithm / A.P. Kurdukov, E.A. Maximov, M.M. Tchaikovsky. – SicPro'06, Moscow, ICS, CD-ROM, 2006. 9. Kurdukov A.P. Homotopy Method for Solving Anisotropy-based Stochastic H_{∞} -optimization Problem with Uncertainty / A.P. Kurdukov, E.A. Maximov, M.M. Tchaikovsky / Proc. 5th IFAC Symposium on Robust Control Design. – Toulouse, France, CD-ROM, 2006. 10. Ziltzer Eckart. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimizations: Methods and Applications, Ph.D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, 1999. 11. Fonseca C.M. An overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization / C.M. Fonseca, P.J. Fleming / Evolutionary Computation. – 1995. – Vol. 3. –№1. – Pp. 1–16. 12. Coello Coello C.A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-based Multiobjective Optimization Techniques / C.A. Coello Coello / Knowledge and Information Systems. – 1999. – Vol. 1.– №3. – Pp. 269 – 308. 13. Coello Coello C.A. MOPSO: a Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization / Coello Coello, Carlos A., Lechuga, Maximino Salazar / Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2002. 14. Hu Xiaohui. Multiobjective Optimization using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization / Hu Xiaohui, Eberhart Russell C. / Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, 2002. 15. Parsopoulos Konstantinos E. Particle Swarms Optimization Method in Multiobjective Problems / Parsopoulos Konstantinos E., Vrahatis, Michael N. / Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing. – 2002. – Pp. 603 – 607.

Bibliography (transliterated): 1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Tatarchenko M.O., Khomenko V.V. “Mnogokriterial'nyj sintez anizotropijnyh reguljatorov mnogomassovyh jelektromehaničeskih sistem”. *Tehnična elektrodynamika*. no 4. 2014. 105 – 107. Print. 2. Liu G.P., Yang J.B., Whidborne J.F. Multiobjective Optimization and Control, *Research Studies Press Ltd*, 2003. Print. 3. Diamond P., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P., Semyonov A.V. Anisotropy – based Performance Analysis of Linear Discrete Time Invariant Control Systems. *Int. J. Control*. V. 74. 2001. 28 – 42. Print. 4. Kennedy J., Eberhart R.C., Shi Y. Swarm Intelligence. *San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers*, 2001. Print. 5. Clerc M. Particle Swarm Optimization. *London: ISTE Ltd*, 2006. Print. 6. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization, *Springer*, 2011. Print. 7. Xin-She Yang, Zhihua Cui, Renbin Xiao, Amir Hossein Gandomi, and Mehmet Karamanoglu. Swarm Intelligence and Bio-Inspired Computation: Theory and Applications. *Elsevier Inc*, 2013. Print. 8. Kurdukov A.P., Maximov E.A., Tchaikovsky M.M. Computing Anisotropic Optimal Controller for System with Parametric Uncertainty via Homotopy – based Algorithm. *SicPro'06, Moscow: ICS*, 2006. CD-ROM. 9. Kurdukov A.P., Maximov E.A., Tchaikovsky M.M. Homotopy Method for Solving Anisotropy-based Stochastic H_{∞} -optimization Problem with Uncertainty, *Proc. 5th IFAC Symposium on Robust Control Design, Toulouse*, 2006. CD-ROM. 10. Ziltzer Eckart. Evolutionary Algorithms for Multiobjective Optimizations: Methods and Applications, Ph.D. Thesis Swiss Federal Institute of Technology. Zurich. 1999. Print. 11. Fonseca C.M., Fleming P.J. An overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization, *Evolutionary Computation*. No. 1. 3. 1995. 1 – 16. Print. 12. Coello Coello C.A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-based Multiobjective Optimization Techniques. *Knowledge and Information Systems*. No. 3. 1. 1999. 269 – 308. Print. 13. Coello Coello, Carlos A., Lechuga, Maximino Salazar. MOPSO: a Proposal for Multiple Objective Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2002. Print. 14. Hu Xiaohui, Eberhart Russell C. Multiobjective Optimization using Dynamic Neighborhood Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2002. Print. 15. Parsopoulos Konstantinos E., Vrahatis, Michael N. Particle Swarms Optimization Method in Multiobjective Problems. *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing*. 2002. 603 – 607. Print.

Поступила (received) 29.05.2015