

УДК 621.77

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХМАССОВЫХ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С АНИЗОТРОПИЙНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ
ПРИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОМ СИНТЕЗЕ**

Б. И. Кузнецов, Т. Б. Никитина, Б. Б. Кобылянский, В. В. Хоменко

Институт технических проблем магнетизма Национальной академии наук Украины
ул. Индустриальная, 19, г. Харьков, 61106, Украина. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

Решена задача многокритериального синтеза анизотропийных регуляторов двухмассовых электромеханических систем, что позволяет удовлетворить разнообразным требованиям, которые предъявляются к работе систем в различных режимах. Многокритериальный синтез анизотропийных регуляторов выполнен на основе стохастических мультиагентных алгоритмов оптимизации роом частиц. Проведены исследования динамических характеристик двухмассовых электромеханических систем с анизотропийными регуляторами и с типовыми регуляторами при работе систем в различных режимах. Показано, что синтезированная система имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами. Установлено, что применение синтезированных анизотропийных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами позволило повысить плавность работы системы при движении объекта управления на низких скоростях, уменьшить время регулирования и одновременно уменьшить ошибки отработки гармонического задающего воздействия

Ключевые слова: двухмассовая электромеханическая система, анизотропийный регулятор.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Применение анизотропийных регуляторов позволяет создавать электромеханические системы с малой чувствительностью к изменению параметров объекта управления [1, 2]. С помощью анизотропийных регуляторов минимизируется анизотропийная норма системы. Синтез анизотропийных регуляторов сводится к решению четырех связанных алгебраических уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и вычисления уровня анизотропии входного сигнала по выражению специального вида [3]. Эти системы уравнений численно решаются с помощью метода гомотопий, включающего векторизацию матриц и итерации по методу Ньютона [4]. Вектор цели стохастического робастного комбинированного управления [5–10] определяется в виде решения многокритериальной задачи нелинейного программирования [11–14] на основании стохастической мультиагентной оптимизации роом частиц [15–16].

При синтезе анизотропийных регуляторов предполагается, что система работает при случайных внешних воздействиях и при случайных помехах измерения. Однако синтезированная система с анизотропийными регуляторами должна работать в различных режимах и при различных внешних воздействиях: ступенчатых, линейно-изменяющихся, гармонических и т.д. [1, 17].

Целью данной работы является исследование динамических характеристик двухмассовых электромеханических систем с анизотропийными регуляторами, синтезированными при многокритериальном синтезе, и их сравнение с динамическими характеристиками систем с типовыми регуляторами при работе систем в различных режимах.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Приведем вначале типовые технические требования [1, 17], которые предъявляются к системам наведения и стабилизации объектов, расположенных на подвижном основании: время регулирования при

подаче определенных входных сигналов, перерегулирование, время первого согласования, статическая ошибка при отработке ступенчатого сигнала заданной величины, время отработки заданного угла рассогласования, время разгона до максимальной скорости, время останова с максимальной скорости, ошибка отработки гармонического сигнала заданной амплитуды и частоты, максимальная ошибка отработки гармонических сигналов в заданном диапазоне частот, максимальный выброс амплитудно-частотной характеристики, точность отработки заданного минимального значения скорости – неравномерность движения рабочего органа на минимальной скорости, дисперсия стабилизации заданного случайного изменения задающего воздействия при действии случайных возмущающих воздействий, максимальная скорость наведения, минимальная скорость наведения. При этом необходимо учитывать ограничения на компоненты вектора состояния и на вектор управления. Все эти требования необходимо выполнить при изменении параметров объекта управления в заданной области. В частности, для таких систем наиболее сильно изменяется момент инерции объекта управления.

Исследование динамических характеристик. Рассмотрим теперь исследование динамических характеристик и чувствительность к изменению параметров объекта управления двухмассовой электромеханической системы [17] с синтезированными анизотропийными регуляторами. Фактически в системе управления имеются нелинейные элементы. Это, в первую очередь, касается наличия сухого трения как в исполнительном двигателе, так и в объекте управления. Кроме того, в системе имеются нелинейные характеристики элементов упругости между исполнительными двигателями и приводными механизмами за счет люфтовывбирающих пружин. Рассмотрим влияние этих элементов на динамические характеристики системы. При этом будем рас-

смагивать динамические характеристики системы для трех значений моментов инерции рабочего механизма – номинального и отличающихся от номинального значения в два раза в большую и меньшую стороны.

Одним из напряженных критериев при синтезе системы является неравномерность движения объекта управления при наведении на малых скоростях, который в значительной степени определяет потенциальную точность работы системы в одном из самых ответственных режимов работы системы. Анизотропный регулятор имеет астатизм второго порядка, однако синтезированная система при наведении на малых скоростях с учетом всех нелинейностей при разных значениях момента инерции объекта управления имеет установившуюся ошибку по углу поворота объекта управления, а сам объект управления движется неравномерно с участками останова и трогания.

При синтезе системы напряженным критерием является также режим движения объекта управления на больших – перебросочных – скоростях. При этом особенно остро проявляются энергетические ограничения приводного двигателя. При движении на перебросочных скоростях синтезированная система с учетом всех нелинейностей и при разных значениях момента инерции объекта управления также имеет установившуюся ошибку по углу поворота объекта управления, однако объект управления движется плавно и без остановок.

Время переходного процесса в режиме отработки малых углов также является напряженным критерием при синтезе системы. Переходные процессы незначительно изменяются при изменении момента инерции рабочего механизма и удовлетворяют техническим требованиям, предъявляемым к системе.

Точность отработки гармонических воздействий заданных частот также является напряженным критерием при синтезе системы. Этот критерий связан с работой системы управления, установленной на подвижном основании объекта, движущегося по неровной дороге с заданной скоростью и заданными параметрами неровностей дороги. Синтезированная система с учетом всех нелинейностей и при разных значениях момента инерции объекта управления имеет допустимую ошибку отработки заданного гармонического сигнала.

ВЫВОДЫ. Проведенные исследования двухмассовой электромеханической системы с анизотропными регуляторами показали, что синтезированная система удовлетворяет всем предъявляемым к ней требованиям и имеет меньшую чувствительность к изменению параметров объекта управления по сравнению с системой с типовыми регуляторами. Установлено, что применение синтезированных анизотропных регуляторов по сравнению с типовыми регуляторами позволило повысить плавность работы системы при движении объекта управления на низких скоростях, уменьшить время регулирования и одновременно уменьшить ошибки отработки

гармонического задающего воздействия.

При изменении момента инерции объекта управления можно использовать один анизотропный регулятор, синтезированный для одного – центрального объекта управления, и, следовательно, можно реализовать основную парадигму робастного управления – управлять с помощью одного анизотропного регулятора не одним, а целым классом объектов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Никитина Т.Б. Многокритериальный синтез робастного управления многомассовыми системами. – Харьков: ХАДУ, 2013. – 432 с.
2. 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.* – 2001. – Iss. 74. – PP. 28–42.
3. Vladimirov I.G., Kurdjukov A.R., Semyonov A.V. State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem // *Proc. 13th IFAC World Congress.* – San-Francisco (USA), 1996. – PP. 427–432.
4. Semyonov A.V., Vladimirov I.G., Kurdjukov A.P. Stochastic approach to H_∞ – optimization // *Proc. 33rd IEEE Conf. on Decision and Control.* – Florida (USA), 1994. – PP. 2249–2250.
5. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. – К.: Наукова думка, 2006. – 264 с.
6. Кунцевич В.М. От проблем управления одним объектом – к проблемам управления классами объектов // *Проблемы управления и информатики.* – 1994. – Вып. 1–2. – С. 3–15.
7. Hoyle D., Hyde R., Limebeer D.J.N. An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design // *Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control.* – Brighton, 1991. – PP. 1581–1585.
8. Limebeer D.J.N., Kasenally E.M., Perkins J.D. On the design of robust two degree of freedom controllers // *Automatica.* – 1993. – Вып. 29. – PP. 157–161.
9. Кунцевич В.М. Квазиинвариантность, робастность и адаптация в системах управления // *Труды научного семинара «70 лет теории инвариантности».* – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 61–90.
10. Кунцевич В.М. Инвариантность и квазиинвариантность систем управления // *Праці міжнародної конференції «50 років інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України».* – К.: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 2008. – С. 61–74.
11. Воронин А.Н. Многокритериальный синтез динамических систем. – К.: Наукова думка, 1992. – 160 с.
12. Батищев Д.И., Шапошников Д.Е. Многокритериальный выбор с учетом индивидуальных предпочтений. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1994. – 92 с.
13. Штойер Р. Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления, приложения. – М.: Наука,

1982. – 382 с.

14. Ногин В.Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. – М.: Физматиздат, 2004. – 176 с.

15. Clerc M. Particle Swarm Optimization. – London: ISTE Ltd, 2006. – 244 p.

16. Gazi V., Passino K.M. Swarm Stability and Optimization. – Springer, 2011. – 318 p.

17. Кузнецов Б.И., Никитина Т.Б., Коломиец В.В. Синтез электромеханических систем со сложными кинематическими цепями. – Харьков: УИПА, 2005. – 512 с.

RESECH OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF TWO-MASS ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH ANISOTROPIC REGULATORS AT MULTICRITERION SYNTHESIS

B. Kuznetsov, T. Nikitina, B. Kobylanskiy, V. Khomenko

Institute of Technical Problems of Magnetism National Academy of Sciences of Ukraine

ul. Industrialnaya, 19, Kharkov, 61106, Ukraine. E-mail: bikuznetsov@mail.ru

Solved the problem of multi-criteria synthesis of anisotropic regulators of two-mass electromechanical systems that can satisfy the various requirements that apply to the operation of the systems in different modes. Multicriteria synthesis of anisotropic regulators made on the basis of stochastic multi-agent particles swarm optimisation algorithms. The dynamic characteristics of the two-mass electromechanical systems with anisotropic controllers and with types controller of systems at work in different modes. It is shown that synthetic system has less sensitivity to changes in the parameters of the control object compared with the system controller types. It was found that the use of synthetic anisotropic regulators compared of regulators types allowed to increase the smoothness of the system while moving object control at low speeds, reducing the time control while reducing errors mining harmonic reference variable.

Key words: two-mass elektromenhanical system, anisotropic regulator.

REFERENCES

1. Nikitina, T.B. (2013), *Mnogokriterialnyy sintez robustnogo upravleniya mnogomassovymi sistemami* [Multicriterion synthesis of robust control by multimass systems], KHADU, Kharkov. (in Russian)

2. Diamond, P., Vladimirov, I.G., Kurdjukov, A.P. and Semyonov, A.V. (2001), "Anisotropy – based performance analysis of linear discrete time invariant control systems", *International Journal Control*, Vol. 74, pp. 28–42.

3. Vladimirov, I.G., Kurdjukov, A.R. and Semyonov, A.V. (1996), "State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞ – optimization problem", *Proceedings of the 13th IFAC World Congress*, San-Francisco, pp. 427–432.

4. Semyonov, A.V., Vladimirov, I.G. and Kurdjukov, A.P. (1994), "Stochastic approach to H_∞ – optimization", *Proceedings of the 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, Florida, pp. 2249 – 2250.

5. Kuntsevich, V.M. (2006), *Upravleniye v usloviyakh neopredelennosti: garantirovannyye rezultaty v zadachakh upravleniya i identifikatsii* [Control under uncertainty: guaranteed results in problems of control and identification], Naukova dumka, Kiev. (in Russian)

6. Kuntsevich, V.M. (1994), "From one object control problems – the problems of control object classes", *Problemy upravleniya i informatiki*, Vol. 1–2, pp. 3–15. (in Russian)

7. Hoyle, D., Hyde, R. and Limebeer, D.J.N. (1991), "An H_∞ approach to two-degree-of-freedom design", *Proceedings of the 30 th IEEE Conference on Decision and Control*, Brighton, pp. 1581–1585.

8. Limebeer, D.J.N., Kasenally, E.M. and Perkins, J.D. (1993), "On the design of robust two degree of freedom controllers", *Automatica*, Vol. 29, pp. 157–161.

9. Kuntsevich, V.M. (2008), "Quasi-invariance, robustness and adaptation in control systems", *Trudy nauchnogo seminara «70 let teorii invariantnosti»*, Izdatelstvo LKI, Moscow, pp. 61–90. (in Russian)

10. Kuntsevich, V.M. (2008), "Invariance and quasi-invariance of control systems", *Pratsi mizhnarodnoi konferentsii "50 rokiv instytutu kibernetiky imeni V.M. Glushkova NAN Ukrainy"* [Proceedings of the International conference "V.M.Glushkov Institute of Cybernetics of NAS of Ukraine 50 anniversary"], Instytut kibernetiky im. V.M. Glushkova NAN Ukrainy, Kiev, pp. 61–74. (in Russian)

11. Voronin, A.N. (1992), *Mnogokriterialnyy sintez dinamicheskikh sistem* [Multicriteria synthesis of dynamic systems], Naukova dumka, Kiev. (in Russian)

12. Batishchev, D.I. and Shaposhnikov, D.E. (1994), *Mnogokriterialnyy vybor s uchetom individualnykh predpochteniy* [Multicriteria selection to suit individual preferences], IPF RAN, Nizhny Novgorod. (in Russian)

13. Shtoyer, P. (1982), *Mnogokriterialnaya optimizatsiya: teoriya, vyichisleniya, prilozheniya* [Multicriteria optimization: theory, calculation, applications], Nauka, Moscow. (in Russian)

14. Nogin, V.D. (2004), *Prinyatiye resheniy v mnogokriterialnoy srede: kolichestvennyy podkhod* [Multicriteria decision making environment: a quantitative approach], Fizmatlit, Moscow. (in Russian)

15. Clerc, M. (2006), Particle Swarm Optimization, ISTE Ltd, London.

16. Gazi, V. and Passino, K.M. (2011), Swarm Stability and Optimization, Springer, London.

17. Kuznetsov, B.I., Nikitina, T.B. and Kolomiets, V.V. (2005), *Sintez elektromekhanicheskikh sistem so slozhnymi kinematischeskimi tsepyami* [Synthesis of electromechanical systems with complex kinematic chains], UIPA, Kharkov. (in Russian)