

АНАЛІЗ МЕТОДІВ СИНТЕЗУ ОПТИМАЛЬНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ СИСТЕМ ІЗ ПАРАМЕТРИЧНИМИ ЗБУРЕННЯМИ

С.В. Бондаренко, А.Р. Рожко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: serhii.bondarenko@nure.ua, anna.rozhko@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто питання забезпечення робастної стійкості та високої якості керування в системах, параметри яких змінюються під час експлуатації. Особливу увагу приділено параметричним збуренням, що відображають зміну маси, інерції та сил тертя. Проаналізовано сучасні підходи до синтезу регуляторів, зокрема методи на основі інтегральних критеріїв оптимізації та лінійних матричних нерівностей. Підкреслюється значення робастного керування як інструмента мінімізації впливу невизначеностей та забезпечення стабільних характеристик у широкому діапазоні змін параметрів системи.

Ключові слова: синтез, керування, оптимальний регулятор, параметричні збурення; робастне керування, стійкість.

ANALYSIS OF OPTIMAL CONTROLLER SYNTHESIS METHODS FOR SYSTEMS WITH PARAMETRIC UNCERTAINTIES

S. Bondarenko, A. Rozhko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: serhii.bondarenko@nure.ua, anna.rozhko@nure.ua

Annotation: This article examines the problem of ensuring robust stability and high control quality in systems whose parameters change during operation. Particular attention is paid to parametric uncertainties that reflect variations in mass, inertia, and friction forces. Modern approaches to controller synthesis are analyzed, specifically methods based on integral optimization criteria and linear matrix inequalities. The significance of robust control is emphasized as a tool for minimizing the effect of uncertainties and ensuring stable characteristics across a wide range of system parameter variations.

Key words: synthesis, control, optimal controller, parametric uncertainties, robust control, stability.

Якість функціонування сучасних систем автоматичного керування критично залежить від точності математичної моделі об'єкта управління. Їх функціонування пов'язане з необхідністю забезпечення стабільності та передбачуваності роботи незалежно від зовнішніх умов. Проте реальні технічні об'єкти рідко зберігають свої параметри постійними: з часом змінюються фізичні властивості матеріалів, виникають додаткові навантаження, погіршуються механічні та електричні характеристики. Це створює потребу у таких системах керування, які здатні залишатися працездатними навіть за умови значних параметричних змін.

Параметричні збурення можуть мати різну природу. Наприклад, у механічних системах зміни маси або інерційних характеристик відбуваються під час транспортування вантажів або внаслідок зношування деталей. В електромеханічних приводах змінюються коефіцієнти тертя або магнітні параметри. У гідравлічних або пневматичних установках на поведінку системи впливають температурні режими та зміни тиску. Усі ці фактори зазвичай не можуть бути

точно виміряні або завчасно враховані, що робить завдання стабілізації та керування суттєво складнішим.

Наявність невизначеностей у параметрах системи призводить до зниження точності регулювання, погіршення якості перехідних процесів та зменшення запасу стійкості. Якщо методи керування орієнтовані лише на номінальні значення параметрів, навіть незначні відхилення можуть спричинити небажані коливання, повільне реагування або взагалі втрату стабільності. У критичних сферах, таких як аерокосмічна техніка, медичне обладнання або аварійно-рятувальні комплекси, це створює потенційно небезпечні ситуації, які несумісні з вимогами безпеки та надійності.

В реальних умовах збурення не лише змінюють параметри, але й можуть бути непередбачуваними за своєю динамікою. Вони можуть виникати раптово, мати випадковий характер або залежати від неконтрольованих факторів середовища. Класичні системи керування не передбачають механізмів активної компенсації таких ефектів, що робить їх недостатньо ефективними у випадках, коли параметричні зміни мають значний вплив на поведінку об'єкта. Саме тому, пошук методів синтезу систем керування, які здатні забезпечувати робастну стійкість і високу якість функціонування при наявності широкого діапазону параметричних збурень, є актуальним.

Традиційні методи синтезу систем керування базуються на припущенні, що параметри об'єкта відомі з достатньо високою точністю і залишаються незмінними протягом усього процесу функціонування. Класичні підходи, такі як використання ПІД-регуляторів, оптимальних регуляторів або стабілізуючих законів, розроблялися саме для таких умов. Вони забезпечують високу якість керування у випадку, коли модель системи добре відповідає реальним характеристикам об'єкта. Однак за наявності параметричних відхилень ефективність цих методів суттєво знижується, що обмежує можливості їх застосування у складних динамічних системах.

Один із шляхів компенсувати вплив параметричних збурень полягає у використанні методів адаптивного керування. Такі системи автоматично коригують свої параметри на основі вимірюваних сигналів, що дозволяє підтримувати прийнятний рівень якості керування навіть при значних змінних впливах, але адаптивні підходи потребують великої кількості вимірювань, складної процедури налаштування та часто мають обмеження щодо швидкості адаптації. Якщо параметри системи змінюються надто швидко або в умовах шумів, адаптивні методи можуть виявитися недостатньо надійними. Інший клас методів пов'язаний із використанням моделей спостерігачів, що дозволяють відновлювати невимірювані параметри або внутрішні стани системи. Спостерігачі стану суттєво розширюють можливості класичних схем керування, але їх ефективність також залежить від точності моделі. Якщо збурення значні, похибка оцінювання зростає, що погіршує функціонування замкненої системи.

У технічних системах із високими вимогами до точності широко застосовуються методи оптимального керування на основі мінімізації інтегральних критеріїв. Вони дозволяють знайти компроміс між швидкістю реакції, стабільністю і енергетичними витратами. Такі методи проєктуються на основі номінальних моделей і не враховують можливих відхилень параметрів. Оптимальний для одного набору параметрів регулятор може виявитися неефективним або навіть дестабілізуючим при зміні умов роботи.

Класичні підходи до синтезу регуляторів, що застосовуються у традиційних автоматизованих системах, не забезпечують гарантованої стійкості та якості функціонування при значних невизначеностях, що обумовлює інтенсивний розвиток підходів робастного керування, які ставлять за мету забезпечення якісної роботи системи незалежно від точних значень параметрів.

Сучасні підходи до синтезу керування в умовах параметричної невизначеності базуються на концепції робастності, тобто здатності системи зберігати необхідний рівень якості роботи для всього діапазону можливих змін параметрів. На відміну від класичних методів, орієнтованих на номінальну модель, робастне керування враховує невизначеності на етапі проектування регулятора. Завдяки цьому забезпечується стійке функціонування навіть за умов неконтрольованих збурень, деградації елементів або зміни зовнішніх умов експлуатації.

Одним із найпоширеніших підходів робастного синтезу є використання методів гармонічної оптимізації, які дозволяють забезпечити допустимі показники якості системи на всіх можливих частотах. Такі методи спрямовані на обмеження впливу збурень, що діють у широкому спектральному діапазоні. У результаті замкнена система залишається стабільною навіть при значних змінах параметрів об'єкта.

Також поширення набула технологія побудови регуляторів на основі лінійних матричних нерівностей. Цей метод дозволяє формулювати вимоги до стійкості та якості роботи системи у вигляді задачі оптимізації, для якої існують ефективні обчислювальні алгоритми. Такий підхід забезпечує можливість одночасного врахування декількох критеріїв, зокрема точності, швидкодії та енергетичної ефективності. Крім того, він дає змогу системно враховувати обмеження на керуючі дії, що важливо для практичної реалізації в реальних технічних системах.

Іншим напрямком розвитку є синтез адаптивно-робастних систем керування, у яких регулятор не лише забезпечує стійкість для широкого діапазону параметрів, але й здатний підлаштовуватися до їх змін у реальному часі. Поєднання робастності та адаптації дозволяє підвищити якість керування в умовах швидких змін навантаження або зовнішніх впливів. Однак побудова таких систем є значно складнішою і потребує ретельного аналізу умов збудження, щоб уникнути нестабільності або помилкових модифікацій параметрів регулятора.

Підходи до оптимального синтезу систем керування в умовах параметричних збурень базуються на розумінні того, що реальна система ніколи не відповідає своїй номінальній моделі. У цьому контексті ефективний регулятор має бути здатним працювати не з одним конкретним набором параметрів, а з цілою множиною можливих їх значень. Для цього при розробці керуючих законів формується узагальнена модель, що охоплює допустимий діапазон змін характеристик. Це забезпечує збереження працездатності системи незалежно від того, які саме відхилення виникнуть у процесі експлуатації. Сучасні методи орієнтуються на багатокритеріальний підхід, який дозволяє знайти збалансоване рішення, що відповідає усім заданим вимогам на прийнятному рівні. Це дає змогу отримати керуючі алгоритми, які є ефективними в широкому спектрі режимів роботи.

Важливим елементом оптимального синтезу є оцінка енергетичних характеристик системи. У процесі побудови регулятора враховується не лише точність і стійкість, а також ресурсні та енергетичні обмеження. Завдяки цьому розроблені системи стають більш надійними і довговічними, що особливо важливо для промислових, мобільних та автономних технічних комплексів.

Таким чином, застосування робастних принципів керування дозволяє значно підвищити надійність і передбачуваність роботи системи в умовах невизначеності параметрів. Такий підхід забезпечує стабільність динамічної поведінки, навіть якщо об'єкт зазнає тривалої експлуатації, механічного зносу або впливу непередбачуваних зовнішніх факторів. Це робить робастні методи незамінними для сучасних високовідповідальних технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.

2. Сучасна теорія управління. Частина 2. Прикладні аспекти сучасної теорії управління: підручник / Ю. М. Ковриго, О. В. Степанець, Т. Г. Баган, О. С. Бунке. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 155 с.

3. Delay-dependent robust H_∞ control of uncertain neutral systems with state and input delays LMI optimization approach, / Chen, Jenq-Der // Chaos, Solitons & Fractals, Elsevier, vol. 33(2), p. 595-606.

4. A robust H-infinity controller design approach for neutral systems with time-varying delay and plant and controller uncertainties / Parlakçı MNA // Transactions of the Institute of Measurement and Control. 2014; vol. 37(5), p. 645-651. doi:10.1177/0142331214532305

5. H. Attar, A. T. Abu-Jassar, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, I. Nevliudov and A. K. Luhach, "Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar", Comput. Intell. Neurosci., vol. 2022, pp. 3046116, 2022.

6. Nevliudov, I. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., Gopejenko, V. ., & Kosenko, V. . (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. Advanced Information Systems, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>

7. I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Demska, K. Kolesnyk, Olha Miliutina, "Mobile Robot Navigation System Based on Ultrasonic Sensors", 2023 IEEE XXVIII International Seminar/Workshop on Direct and Inverse Problems of Electromagnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), vol.1, pp.247-251, 2023.

8. Igor Nevliudov, Vladyslav Yevsieiev, Svitlana Maksymova, Nataliia Demska, Nikolaj Starodubcev, Oleksandr Klymenko, "Monitoring System Development for Equipment Upgrade for IIoT", 2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), pp.1-5, 2023.

9. Svitlana Maksymova, Vladyslav Yevsieiev, Igor Nevliudov, Oksana Bahlai, "Balancing System For A Zoomorphic Spot Type Mobile Robot Development Using An Accelerometer MPU 6050(GY-521)", 2024 IEEE 19th International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), pp.39-42, 2024.

10. Amer Abu-Jassar, Hassan Al-Sukhni, Yasser Al-Sharo, Svitlana Maksymova, Vladyslav Yevsieiev, Vyacheslav Lyashenko, "Building a Route for a Mobile Robot Based on the BRRT and A*(H-BRRT) Algorithms for the Effective Development of Technological Innovations," International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 72, no. 11, pp. 294-306, 2024. Crossref, <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I11P129>

11. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Filippenko, I. (2020). Development of an architecturallogical model to automate the management of the process of creating complex cyberphysical industrial systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2020, 4(3-106), 44-52.

12. Lyashenko, V., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., & Maksymova, S. (2023). Automated Monitoring and Visualization System in Production. International Research Journal of Multidisciplinary Technovation, 5(6), 9-18.

13. Mustafa, S.K., Yevsieiev, V., Nevliudov, I., & Lyashenko, V.. (2022). HMI Development Automation with GUI Elements for Object-Oriented Programming Languages Implementation. SSRG International Journal of Engineering Trends and Technology, 70(1), 139-145.

14. H. Attar, A. T. Abu-Jassar, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, I. Nevliudov and A. K. Luhach, "Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar", Comput. Intell. Neurosci., vol. 2022, pp. 3046116, 2022.

Науковий керівник: Токарева Олена Віталіївна, доц., к.т.н., професор кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки.