

СИНТЕЗ АДАПТИВНИХ СИСТЕМ ІЗ ПРОГНОЗУЮЧИМ ЗАКОНОМ КЕРУВАННЯ**Д.С. Кобець, С.О. Кравченко**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: denys.kobets@nure.ua, serhii.kravchenko@nure.ua

Анотація: Розглянуто синтез адаптивних систем керування з використанням прогнозуючих законів керування, що дозволяють підвищити точність і стійкість динамічних об'єктів в умовах невизначеностей та змін параметрів. Показано, що включення прогнозуючої складової забезпечує здатність системи передбачати майбутню поведінку об'єкта та формувати керуючі дії, оптимізовані з урахуванням можливих відхилень. Обґрунтовано необхідність адаптації як до структурних змін моделі, так і до зовнішніх збурень, що дозволить реалізувати стабільне керування в широкому діапазоні режимів та підвищить загальну ефективність функціонування технічних систем, зокрема у сфері робототехніки, промислової автоматизації, авіоники та автономних платформ.

Ключові слова: адаптивне керування, прогнозуючий закон керування, робастність; математична модель, невизначені параметри, зворотний зв'язок; стійкість.

SYNTHESIS OF ADAPTIVE SYSTEMS WITH PREDICTIVE CONTROL LAW**D. Kobets, S. Kravchenko**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: denys.kobets@nure.ua, serhii.kravchenko@nure.ua

Annotation: The paper considers the synthesis of adaptive control systems utilizing predictive control laws, which allows for enhancing the accuracy and stability of dynamic objects under conditions of uncertainties and parameter variations. It is shown that the inclusion of a predictive component enables the system to anticipate the future behavior of the object and formulate control actions optimized with regard to possible deviations. The necessity of adaptation to both structural changes in the model and external disturbances is substantiated, which facilitates the implementation of stable control across a wide range of operating regimes and increases the overall efficiency of technical systems, particularly in the fields of robotics, industrial automation, avionics, and autonomous platforms.

Key words: adaptive control, predictive control law, robustness, mathematical model, uncertain parameters, feedback; stability.

В сучасних технічних системах зростає потреба в забезпеченні стабільного та точного керування об'єктами, параметри яких можуть змінюватися в процесі експлуатації. Зовнішні впливи, зношування механізмів, зміна динамічних характеристик або нестабільність навантаження створюють ситуації, коли заздалегідь налаштовані регулятори перестають працювати з необхідним рівнем якості. Це особливо критично для систем, які функціонують у складних або змінних середовищах, де швидкість прийняття рішення і здатність до адаптації визначають загальну ефективність роботи. Даний чинник робить проблему адаптивного керування актуальною для багатьох сфер промисловості та наукових досліджень.

Класичні методи керування ґрунтуються на фіксованих математичних моделях і припущенні про відомі властивості об'єкта. У реальних умовах ці параметри змінюються, і невизначеності неминуче виникають навіть у добре досліджених системах. Невідповідність

між реальною динамікою та номінальною моделлю призводить до втрати точності, зниження стійкості або навіть до розгортання коливальних режимів.

Зростаюча складність технічних систем також вимагає підвищення рівня автономності керування. Системи, що здатні самостійно оцінювати власний стан та здійснювати корекцію алгоритмів керування, дозволяють зменшити залежність від зовнішнього оператора і підвищити надійність функціонування. Це особливо актуально у випадках, коли оператор не може оперативнo реагувати на швидкоплинні зміни стану системи, або коли людське втручання взагалі неможливе через умови експлуатації. Автономність стає ключовою властивістю сучасних систем автоматизації.

Сучасні вимоги до енергоефективності та ресурсоощадності визначають необхідність оптимізації керуючих дій. Система повинна не лише стабілізувати об'єкт, але й робити це з мінімальними витратами енергії, забезпечуючи плавність та передбачуваність динаміки. Відсутність адаптивності нерідко призводить до надмірної інтенсивності керуючих впливів, що знижує ресурс механізмів та призводить до неекономічної роботи. Це ускладнюється ще тим, що в умовах зміни параметрів необхідно забезпечити не просто точність відпрацювання команд, а збереження стійкості системи в цілому. Навіть незначні похибки в оцінюванні параметрів можуть викликати нестабільність або нестійкі коливання, якщо система має чутливу структуру. Тому адаптивні системи повинні поєднувати механізми корекції з механізмами контролю якості та гарантіями стійкості.

Адаптивні системи керування здатні модифікувати власну структуру або значення параметрів у процесі функціонування, що забезпечує їх здатність підтримувати необхідну якість керування навіть за умов впливу неконтрольованих зовнішніх факторів. Основною рисою таких систем є наявність механізму оцінювання поточного стану об'єкта та внесення відповідних коригувань у закон керування. Важливим елементом адаптивності є процес ідентифікації параметрів динамічної моделі. Оскільки точні характеристики об'єкта не завжди відомі або змінюються з часом, система повинна вміти оцінювати їх на основі вхідних та вихідних сигналів. Це дозволяє не лише уточнювати модель поведінки об'єкта, а й прогнозувати можливі зміни у його роботі. Ефективність адаптації безпосередньо залежить від точності та швидкості таких оцінок, що зумовлює необхідність використання спеціалізованих алгоритмів та структур спостерігачів.

Одним із перспективних напрямів розвитку адаптивного керування є застосування прогнозуючих законів керування. У таких системах наявні механізми випереджувального аналізу, що дозволяють оцінювати майбутній стан об'єкта на основі поточної інформації та очікуваних зовнішніх впливів. Прогнозуючий підхід дає можливість мінімізувати запізнення керуючих дій і завчасно компенсувати негативні тенденції у поведінці системи. Це особливо актуально у швидкодіючих або інерційно складних системах, де традиційні методи корекції не забезпечують необхідної динамічної точності.

Серед основних переваг прогнозуючого керування виділяють підвищену адаптивність, здатність враховувати обмеження на керуючі сигнали та забезпечувати плавність перехідних процесів. Керувальні дії формуються не лише на основі поточного стану системи, а й з урахуванням очікуваного розвитку подій, що дозволяє уникати перевантажень і різких змін у роботі виконавчих механізмів. Прогнозуючий підхід забезпечує вищий рівень стабільності та передбачуваності, що особливо важливо для технічних систем.

Однак впровадження прогнозуючого закону керування водночас пов'язане з низкою складнощів. Необхідність розрахунку майбутніх станів системи підвищує вимоги до продуктивності обчислювальних засобів і точності моделей. Крім того, неправильне або спрощене прогнозування може призвести до хибних керуючих рішень і втрати стійкості. Тому

важливою задачею є розробка методів, які дозволяють узгоджувати адаптивні й прогнозуючі механізми так, щоб забезпечити баланс між швидкістю реакції, точністю та надійністю.

У теорії керування сформувалося кілька підходів до побудови адаптивних систем керування, кожен з яких має свої переваги та сфери застосування. Традиційні схеми адаптації, орієнтовані на корекцію параметрів регулятора, зберігають незмінною структуру керуючого пристрою, змінюючи лише числові значення налаштувань. Цей підхід характеризується відносною простотою реалізації, проте вимагає ретельного вибору алгоритмів настроювання, щоб забезпечити бажаний рівень швидкодії та стійкості. Такі системи добре працюють за умов плавної зміни параметрів об'єкта, але можуть втрачати ефективність у швидкозмінних або слабо формалізованих середовищах. Інший напрямок формування адаптивних систем базується на структурній адаптації, коли схема керування може змінюватися в залежності від поточного стану об'єкта або характеру зовнішніх впливів. У цьому випадку система здатна активувати різні режими роботи або перемикатися між наборами регуляторів, спеціально налаштованих для певних умов. Такий підхід дозволяє враховувати широкий спектр варіацій у поведінці системи, однак потребує складної системи діагностики стану, що визначає моменти та логіку перемикання.

На рівні прогнозуючого керування найбільш поширеним підходом є модельно-орієнтоване керування, де рішення формуються на основі внутрішньої моделі динаміки об'єкта. У таких системах прогнозування використовується для передбачення наслідків можливих керуючих дій, що дозволяє вибрати оптимальну траєкторію розвитку керованих процесів. Основна перевага цього підходу полягає в здатності враховувати майбутні наслідки дій, що забезпечує плавність реакції та запобігає різким перевантаженням системи. Проте ефективність моделі суттєво залежить від точності опису об'єкта та швидкості обчислень.

Існують також адаптивно-прогнозуючі системи, які поєднують параметричну ідентифікацію з механізмами передбачення майбутніх станів. Такі системи здатні оперативно оновлювати модель об'єкта і на цій основі прогнозувати його поведінку. Поєднання адаптації з прогнозуванням дозволяє підтримувати оптимальні показники динаміки навіть за різких змін зовнішніх умов. Проте практична реалізація такого підходу потребує обчислювальних ресурсів та суворої узгодженості між блоками спостереження, прогнозування і формування керуючого впливу.

У сучасних системах керування, що функціонують в умовах змінних параметрів, завдання оптимального синтезу полягає не лише у забезпеченні стійкості, але й у досягненні передбачуваної динамічної якості в усьому діапазоні можливих станів об'єкта. Класичні методи синтезу орієнтувались на номінальну модель, яка вважалась достатньо точною для відображення поведінки системи. Проте у випадку реальних технічних об'єктів навіть незначні відхилення параметрів можуть спричинити істотні зміни динаміки. Тому сучасні методи синтезу передбачають розгляд множини моделей, що представляють імовірні стани системи, а не єдиного варіанту її параметризації.

Одним із ключових аспектів оптимального синтезу є визначення критеріїв, які водночас враховують точність керування, швидкість реакції системи та її енергетичну ефективність. Застосування багатокритеріальних підходів дозволяє побудувати регулятор, здатний забезпечувати баланс між цими характеристиками. Інтеграція прогнозування у процес оптимального синтезу дозволяє регулятору враховувати не лише поточний стан об'єкта, але й очікувані зміни в майбутньому. Це особливо важливо у системах з інерційною або затриманою реакцією, де наслідок керуючої дії проявляється не миттєво. Використання механізмів передбачення дає змогу формувати керуючий вплив таким чином, щоб система своєчасно компенсувала майбутні збурення або зміни параметрів. У результаті покращується плавність перехідних процесів і підвищується загальна точність керування.

Оптимальні методи синтезу включають механізми робастної перевірки, що гарантують працездатність системи для всього простору допустимих варіацій параметрів. Це вимагає попереднього аналізу меж можливих відхилень та їхнього впливу на динаміку. Якщо система здатна зберігати стійкість і прийнятну якість керування для всіх цих сценаріїв, вона вважається робастною, і це забезпечує її надійність у рixних умовах експлуатації.

Додатковим інструментом є адаптація параметрів регулятора на основі результатів прогнозування. На відміну від традиційної адаптації, що реагує лише на вже виявлені зміни, прогнозуючий підхід дозволяє регулятору готуватися до них завчасно. Це дає системі змогу уникати критичних режимів, стабілізуватися швидше та працювати більш енергоефективно. Принцип випереджального налаштування параметрів стає ключовим для високодинамічних систем, де діапазон збурень і швидкість зміни станів є значними.

Таким чином, застосування підходів адаптивного регулювання у поєднанні з прогнозуючими механізмами формування керуючих дій дозволяє істотно підвищити ефективність і надійність функціонування систем із параметричними збуреннями. Такий підхід забезпечує більш гнучку реакцію на зміну динамічних характеристик об'єкта, що робить систему стійкою до впливу факторів невизначеності та зовнішніх збурень. Синтез адаптивних систем із прогнозуючим законом керування дає змогу не лише зберігати стійкість у широкому діапазоні робочих умов, але й підтримувати задану якість перехідних процесів. Використання прогнозування дозволяє компенсувати зміни ще до того, як вони негативно вплинуть на роботу системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Feedback Control of Dynamic Systems. 9th Edition [Electronic resource] / J David Powell, Abbas F. Emami-Naeini, Christina M. Ivler. – Pearson, 2025. – 1046 p.
3. Control in System Dynamics: Comparative Analysis of Feedback Strategies [Electronic resource] / Alain Oustaloup. – John Wiley and Sons Ltd, 2024. – 464 p.
4. Adaptive control Lyapunov function based model predictive control for continuous nonlinear systems / Zheng, Yi, Yanye Wang and Shaoyuan Li // International Journal of Robust and Nonlinear Control 33 (2022), p.1254 - 1266.
5. Model Predictive Control for Discrete Time-Delay System Based on Equivalent-Input-Disturbance Method / Shi, Zuguang, Fang Gao and Wenbin Chen // J. Adv. Comput. Intell. Intell. Informatics 28 (2024), p. 983-989.
6. 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.
7. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. *J. Math. Comput. Sci.*, 11(1), 520-542.
8. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 9140156, 2022.
9. 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.

Науковий керівник: Овчаренко Віталій Євгенович, проф., д.т.н., професор кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки.