

СИНТЕЗ СИСТЕМ ТЕРМІНАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ З ПРОГНОЗУЮЧИМИ МОДЕЛЯМИ

С.О. Кравченко, Д.А. Шматько

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: serhii.kravchenko@nure.ua, dmytro.shmatko1@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто синтез систем термінального управління з прогнозуючими моделями для підвищення точності управління складними нелінійними об'єктами, підкреслено актуальність подальшого розвитку цього напрямку для систем з невизначеностями. Проаналізовано особливості організації термінального управління, етапи синтезу та проблеми розробки ефективних алгоритмів для роботи в режимі реального часу.

Ключові слова: термінальне управління, прогнозуюча модель, робототехнічна система, об'єкт управління, синтез.

SYNTHESIS OF TERMINAL CONTROL SYSTEMS WITH PREDICTIVE MODELS

S. Kravchenko, D. Shmatko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: serhii.kravchenko@nure.ua, dmytro.shmatko1@nure.ua

Annotation: The article discusses the synthesis of terminal control systems with predictive models to enhance the accuracy of controlling complex nonlinear objects, emphasizing the relevance of further development in this area for systems with uncertainties. The specifics of terminal control organization, synthesis stages, and challenges in developing efficient real-time algorithms are analyzed.

Key words: terminal control, predictive model, robotic system, control object, synthesis.

Аналіз сучасних досліджень щодо алгоритмів управління дозволяє зробити висновок, що термінальні системи управління відрізняються від інших систем насамперед способом організації процесу управління. Основна їх особливість полягає в прогнозуванні траєкторії руху об'єкта від поточного стану до заданого кінцевого, що забезпечується через побудову оптимальної програми керуючих впливів. Термінальне управління також часто носить багатокритеріальний характер, де окрім основної мети враховуються додаткові критерії, наприклад, енергоспоживання, безпека чи сталість.

На відміну від класичних систем регулювання, де реакція відбувається на відхилення, термінальні системи проактивно формують управління на основі прогнозу. Такий підхід дозволяє зменшити інерційність реакції системи та забезпечити плавність переходів. Це особливо важливо для високоточних і критичних застосувань, наприклад, в робототехнічних системах.

Синтез систем термінального управління здійснюється в два етапи: спочатку визначається клас функцій управління з умови екстремуму обраного функціонала, а далі вирішується задача синтезу системи управління зі зворотним зв'язком, яка забезпечує якість управління за наявності обурень і зміни параметрів об'єкта. Основою для цього є система звичайних диференціальних рівнянь об'єкта, обмеження на фазові координати, оптимізуючий функціонал

і граничні умови на початку та в кінці фазової траєкторії. Результатом є вектор-функція управління, яка мінімізує функціонал за проміжком часу $[0, T]$.

У реальних умовах на об'єкт можуть впливати різноманітні стохастичні фактори, тому врахування адаптивних механізмів у системі управління є важливим аспектом другого етапу синтезу. Параметри зворотного зв'язку налаштовуються так, щоб система залишалася стійкою навіть за суттєвих змін динамічних характеристик. Таким чином, синтезована система здатна забезпечити необхідний рівень надійності та точності управління навіть в умовах невизначеності.

Однак у реальних умовах розрахунок оптимального управління супроводжуються значними затратами машинного часу, що ускладнює застосування таких методів у режимі реального часу. Ця проблема особливо критична для систем із високими вимогами до динаміки, таких як промислові маніпулятори, автономні транспортні засоби та інші елементи Індустрії 4.0. Через обмеження обчислювальних ресурсів виникає потреба в апроксимації рішень або застосуванні спрощених моделей. Навіть незначні затримки в розрахунках можуть призводити до зниження якості управління або нестабільності системи. Тому на практиці часто впроваджуються компромісні підходи, що поєднують точні методи з евристичними алгоритмами. Питання підвищення швидкодії алгоритмів є одним з ключових напрямів сучасних досліджень у сфері управління.

Одним із перспективних рішень підвищення точності процесу управління є введення паралельної прогнозуючої моделі в основний контур управління. Зокрема для промислових роботів із датчиками в плечових суглобах, транспортних машин із системами стеження та інших пристроїв. Такий підхід дозволяє здійснювати короткостроковий прогноз поведінки системи на базі математичної моделі приводу, яка описується системою звичайних диференціальних рівнянь. На кожному часовому кроці виконується прогноз майбутніх станів, оптимізація управління для мінімізації відхилення від задаючих сигналів і реалізація поточного оптимального управління.

Прогнозуюча модель виступає інтелектуальним доповненням класичного регулятора. Вона дозволяє враховувати тенденції змін в системі та реагувати на них ще до фактичного відхилення. Така модель особливо корисна в умовах змінних навантажень або зовнішніх обурень. Застосування подібних моделей підвищує стабільність і точність управління, зменшуючи необхідність жорсткого переналаштування системи.

Принцип роботи такої системи управління наступний: є математична модель приводу, що керує будь-яким об'єктом, початковою умовою для якої є його поточний стан. Математична модель представляє собою систему звичайних диференціальних рівнянь, яка описує процеси, які відбуваються в приводі. При заданому програмному управлінні виконується розв'язання системи рівнянь цієї моделі, що дає прогноз руху об'єкта на деякому кінцевому відрізку часу. Далі виконується оптимізація програмного управління, метою якого є наближення регульованих змінних прогнозуючої моделі до відповідних задаючих сигналів прогнозу.

Після цього визначається найефективніше керування, яке реалізується на наступному часовому кроці. Процес повторюється циклічно з оновленням стану системи, що дозволяє враховувати актуальні зміни. Такий підхід забезпечує адаптивність управління навіть при швидких змінних умовах. Крім того, він дозволяє скоротити час реакції системи до мінімуму.

Диференціальні рівняння руху складного механічного об'єкта, наприклад, робота-маніпулятора (разом з рівняннями, що описують його систему управління), як правило, є суттєво нелінійними і часто мають розривні праві частини. За необхідності отримання оптимальних, а не оціночних результатів, у математичних моделях системи управління слід враховувати багато з наявних у них нелінійностей. Це характерно для опису динаміки багатьох механічних систем. Нелінійності можуть виникати через геометричні особливості конструкції,

сили тертя або обмеження на рух. Ігнорування таких факторів може призвести до спрощення задачі, але суттєво знизити точність моделювання. Тому сучасні підходи передбачають створення складних моделей із максимально повним відображенням фізичних процесів. Це забезпечує більш достовірні результати симуляцій і підвищує ефективність синтезованого управління.

При моделюванні систем управління складних механічних об'єктів, математичні моделі яких включають моделі електромеханічних або гідравлічних приводів, можуть виникати труднощі, пов'язані з особливостями таких систем. У таких випадках важливими є: вибір ефективних чисельних методів та питань, пов'язані з похибками обчислень.

Особливо актуальним є забезпечення стійкості обчислювального процесу при великих градієнтах або різких змінах сигналів. Також необхідно враховувати, що приводи можуть мати гістерезис, насичення чи інші нелінійні властивості. Для забезпечення точного прогнозу станів потрібні методи з високим порядком точності та контрольованими похибками. Важливо також оптимізувати розрахунки для виконання в режимі реального часу, що вимагає ефективного коду та обчислювальної архітектури.

Для дослідження та проектування систем управління зазвичай виконуються розрахунки аналізу статичних і динамічних режимів, частотний аналіз, обчислення чутливості характеристик системи управління та її елементів до зміни значень конструктивних параметрів, структурна й параметрична оптимізація тощо. Розрахунок динамічних режимів систем управління та її елементів полягає у розв'язанні задач аналізу перехідних процесів і частотних характеристик, а також у дослідженні й аналізі процесів, що відбуваються в її елементах. У всіх цих випадках розв'язання задачі зводиться, як правило, до розв'язання нелінійних систем звичайних диференціальних рівнянь, які можуть мати високий порядок, при різних типових і нетипових вхідних керуючих впливах. В таких умовах особливо актуальними є точні чисельні методи, які враховують похибки обчислень і дозволяють розв'язати задачу Коші у нормальній формі.

Незважаючи на широке застосування прогнозуючих систем в автоматичних і напівавтоматичних системах управління, в системах з елементами невизначеності зовнішнього середовища та стану об'єкта управління, цей напрям потребує свого подальшого розвитку.

Принциповими питаннями, що підлягають дослідженню, є: вибір прогнозуючих функцій, або поліномів, та аналіз точності їхньої роботи в реальному часі; алгоритмізація прогнозуючих функцій та аналіз особливостей їхньої програмної реалізації; вибір та призначення значення часу прогнозу; алгоритми формування додаткової складової в керуючому впливі; аналіз стійкості алгоритмів адаптації.

У контексті глобальних тенденцій до впровадження кіберфізичних систем і інтелектуальних технологій в інфраструктурні рішення, термінальні системи управління з прогнозуючими та адаптивними компонентами розглядаються як базовий елемент для побудови автономних самонавчальних технічних об'єктів. Такі системи не лише підвищують ефективність процесів, але й відповідають викликам сталого розвитку: скорочення техногенного навантаження, оптимізація ресурсів, мінімізація впливу людських чинників.

Таким чином, використання прогнозуючих моделей є важливим етапом у розробці автономних адаптивних систем, здатних до самостійного прийняття рішень в умовах невизначеності. Це створює підґрунтя для глибшої автоматизації й роботизації виробничих та технологічних процесів. Особливо важливим є впровадження таких систем у контексті сталого розвитку: зменшення енергоспоживання, підвищення ресурсозбереження та забезпечення екологічної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Моделі та методи кіберфізичних виробничих систем в концепції Industry 4.0: монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, А. О. Андрусевич, С. С. Максимова; Oktan Print – Prague. 2023. 321 с.
2. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Текст]: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
3. Adaptive Control / Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, 2nd Edition. Dover publications, inc., 2008, 574 p.
4. Control Systems Engineering /I.J Nagrath, M. Gopal. - New Academic Science, 2020. – 912 p.
5. Chala, O., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). MATHEMATICAL MODEL BASED ON MULTI-AGENT REINFORCEMENT LEARNING (MARL) AND PARTIALLY OBSERVABLE MARKOV DECISION PROCESS (POMDP) FOR MODELING CARGO MOVEMENT FOR A MOBILE ROBOTS GROUP. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(4), 480-489.
6. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 3046116.
7. 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.
8. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Yevsieiev, V., Amer, A., Demska, N., Luhach, A. K., & Lyashenko, V. (2022). Electronic user authentication key for access to HMI/SCADA via unsecured internet networks. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 5866922.
9. Chala, O., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). USING THE HUMAN FACE RECOGNITION METHOD BASED ON THE MOBILENETV2 NEURAL NETWORK IN AUTHENTICATION SYSTEMS. *Multidisciplinary Journal of Science and Technology*, 5(3), 882-895.
10. Невлюдов, І. Ш., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). MODEL DEVELOPMENT OF DYNAMIC REPRESENTATION A MODEL DESCRIPTION PARAMETERS FOR THE ENVIRONMENT OF A COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR WITHIN THE INDUSTRY 5.0 FRAMEWORK. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*, 1(79), 42-48.
11. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. *International Journal of Crowd Science*, 9(1), 29-43.
12. Yevsieiev, V., Maksymova, S., Alkhalaileh, A., & Gurin, D. (2025). Development of a program for processing 3d models of objects in a collaborative robot workspace using an HD camera. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 194-210.
13. Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
14. Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., & Maksymova, S. (2024). Calculation of the Distance to Objects in Collaborative Robots Workspace Using Computer Vision. *Journal of universal science research*, 2(11), 240-255.

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