

МЕТОДИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ

О.А. Коваленко, Б.В. Івченко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleh.kovalenko@nure.ua, bohdan.ivchenko@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто підходи до побудови адаптивних систем керування в умовах структурної та параметричної невизначеності, характерної для промислових процесів. Проаналізовано основні методи адаптації, включаючи моделі з ідентифікацією параметрів у реальному часі, самоналаштувані регулятори та методи нечіткого логічного керування в умовах змінних середовищ та зовнішніх обурень.

Ключові слова: адаптивне керування, регулятор, об'єкт керування, промисловий процес, стійкість, якість.

METHODS OF ADAPTIVE CONTROL UNDER INDUSTRIAL PROCESS UNCERTAINTY

O. Kovalenko, B. Ivchenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: oleh.kovalenko@nure.ua, bohdan.ivchenko@nure.ua

Annotation: The article discusses approaches to the design of adaptive control systems under structural and parametric uncertainty, which is characteristic of industrial processes. The main methods of adaptation are analyzed, including models with real-time parameter identification, self-tuning regulators, and fuzzy logic control methods in variable environments and under external disturbances.

Key words: adaptive control, regulator, control object, industrial process, stability, quality.

У сучасних умовах промислові процеси характеризуються підвищеною складністю, багатофакторністю, нелінійністю та наявністю значної кількості зовнішніх збурень і невизначеностей. Особливо це стосується високотехнологічних галузей, зокрема радіоелектронного приладобудування, де об'єкти керування часто змінюють свої характеристики в часі, що робить традиційні системи автоматичного керування недостатньо ефективними. У таких умовах необхідно застосовувати адаптивні системи керування, здатні змінювати свої параметри в режимі реального часу відповідно до змін середовища або параметрів об'єкта керування.

Адаптивне керування дозволяє системі модифікувати свою поведінку відповідно до зміни динамічних характеристик об'єкта без участі людини-оператора. В загальному вигляді адаптивна система містить три основні компоненти: модель об'єкта керування, механізм ідентифікації параметрів та механізм адаптації (налаштування регулятора). Основною метою є забезпечення стабільності та високої якості керування в умовах структурної та параметричної невизначеності. У порівнянні з класичними регуляторами, адаптивні системи враховують зміни об'єкта керування, які неможливо врахувати при попередньому налаштуванні.

У промислових об'єктах найчастіше зустрічаються два типи невизначеності: структурна невизначеність, яка виникає, коли точна модель об'єкта невідома або змінюється з часом (наприклад, технологічні лінії з частими переналагодженнями) та параметрична невизначеність, яка пов'язана з неточним знанням параметрів процесу (наприклад,

коефіцієнти теплообміну, інерційність механізмів), які можуть змінюватися під впливом зовнішніх умов. В обох випадках використання жорстко запрограмованих систем може призводити до втрати точності регулювання або навіть до нестабільної роботи.

До найпоширеніших методів адаптації відносять самоналаштовувані регулятори з ідентифікацією параметрів об'єкта, системи з еталонною моделлю, моделі нечіткого логічного керування, а також сучасні методи на основі нейронних мереж і машинного навчання.

Самоналаштовувані регулятори складаються з блоку ідентифікації моделі об'єкта та блоку налаштування параметрів керування. В таких системах параметри регулятора автоматично змінюються без явної побудови моделі об'єкта. Як правило, вони використовують інформацію про похибку керування та її похідні. Типовими прикладами є регулятори з моделями МІТ, регулятори з моделюванням опорної моделі або самоналаштовувані ПД-регулятори. Залежно від типу процесу, що підлягає керуванню, адаптаційний алгоритм може змінювати параметри ПД-регулятора, структуру керування або ж навіть алгоритм прийняття рішень в системі. Перевагою такого підходу є простота реалізації та гнучкість. Проте ефективність залежить від точного налаштування швидкості адаптації та від здатності системи забезпечити стійкість в умовах швидких змін. Також такі системи активно застосовуються в робототехнічних маніпуляторах, де маса захвату або динамічні характеристики об'єкта можуть змінюватися в процесі виконання операцій. Наприклад, при збірці мікроелектроніки вага захоплених компонентів змінюється, що впливає на інерційні характеристики маніпулятора.

Самоналаштовуваний регулятор дозволяє оперативнo підлаштувати ПД-параметри під змінені умови. Одним із класичних підходів є реалізація контурів ідентифікації параметрів, які дозволяють в режимі реального часу оновлювати математичну модель об'єкта. Одночасно з ідентифікацією відбувається перебудова регулятора, що дозволяє підтримувати бажані показники якості керування. Найбільш поширеними методами є: рекурсивна ідентифікація з використанням градієнтних чи квадратичних алгоритмів. У випадку зміни інерційних властивостей механічної системи, регулятор автоматично коригує значення коефіцієнтів підсилення або інтегрування. Однак такий підхід вимагає високої обчислювальної потужності і стійкого алгоритму ідентифікації для уникнення флуктуацій або спотворень. У галузі радіоелектронного приладобудування цей підхід застосовується в адаптивних системах термостабілізації, де зміна навколишньої температури вимагає оперативного налаштування коефіцієнтів регулятора для збереження стабільності роботи електронних елементів.

Системи з еталонними моделями призначені для порівняння реального вихідного сигналу системи з бажаним. Такі моделі, зазвичай у вигляді динамічних математичних описів бажаної поведінки системи, дозволяють формувати очікувану реакцію системи на вхідні сигнали. Відхилення між еталонною траєкторією і фактичним вихідним сигналом визначається у реальному часі та використовується як сигнал помилки для адаптивної корекції параметрів регулятора.

В такій архітектурі реалізується принцип зворотного зв'язку з елементами навчання, що дозволяє системі не лише реагувати на поточні відхилення, але й накопичувати інформацію про умови функціонування, формуючи базу для прогнозування майбутньої поведінки. Це забезпечує високий рівень точності навіть при швидкій зміні умов або параметрів, характерних для промислових процесів із високим ступенем нестабільності. Крім того, використання еталонних моделей дозволяє створювати універсальні адаптивні контролери, які можуть бути ефективно переналаштовані під різні типи об'єктів без суттєвих змін у структурі алгоритму.

В радіоелектронному приладобудуванні такі системи застосовуються, наприклад, у високоточному керуванні фазовим регулюванням у приймально-передавальних пристроях або у стабілізації частоти генераторів за умов флуктуацій температури та навантаження. В

робототехнічних комплексах принцип еталонного керування може використовуватись для відстеження заданих траєкторій маніпуляторів з урахуванням інерційних та гнучких характеристик ланок. У таких випадках відхилення від еталонної траєкторії враховується не лише в координатному просторі, а й у параметрах динаміки, що потребує побудови складніших моделей зі зворотним зв'язком другого або вищого порядку. Завдяки цьому забезпечується не лише коректне позиціонування, а й плавність та стабільність руху в умовах непередбачуваних зовнішніх впливів.

В багатьох промислових процесах виникає необхідність керування у випадку, коли точна математична модель об'єкта відсутня або побудова такої моделі недоцільна через складність процесу, значну варіативність параметрів або високі витрати на ідентифікацію. У таких випадках ефективними виявляються системи нечіткого логічного керування (СНЛК), які базуються на принципах нечіткої логіки, що наближує процес прийняття рішень до особливостей людського мислення та експертних оцінок. На відміну від класичних детермінованих систем, СНЛК дозволяє формалізувати керуючі алгоритми без необхідності створення точного аналітичного опису динаміки об'єкта. Такий підхід дозволяє побудувати керуючий алгоритм на основі знань експерта або емпіричних даних, навіть у ситуаціях із сильними нелінійностями, часовими затримками чи змінними структурними властивостями об'єкта. Крім того, нечіткі системи здатні ефективно адаптуватися до змін у зовнішньому середовищі, оскільки структура правил може бути динамічно змінена або доповнена без суттєвого перегляду всієї моделі.

В радіоелектронному приладобудуванні нечіткі регулятори широко застосовуються, зокрема, для стабілізації параметрів генераторів, адаптивного фільтрування сигналів у шумових середовищах, а також у схемах автоматичного налаштування антенно-фідерних трактів. У робототехнічних системах нечіткі алгоритми використовуються для вирішення задач позиціонування, адаптивної навігації в умовах неповної інформації та адаптації до зміни конфігурації маніпуляторів або рухомого середовища.

Важливою перевагою СНЛК є можливість інтеграції з іншими типами керування, зокрема у вигляді нейро-нечітких систем або гібридних адаптивних структур, що поєднують логічні висновки з можливостями машинного навчання. Такий підхід є перспективним у контексті реалізації інтелектуальних систем керування в рамках концепцій Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, які висувають високі вимоги до гнучкості, автономності та здатності систем до самоприсосування.

Впровадження методів адаптації також потребує врахування питань стійкості системи. Параметрична адаптація, якщо вона реалізується без належної оцінки збурень, може призвести до дестабілізації процесу. Тому важливими критеріями є забезпечення асимптотичної або експоненціальної стійкості адаптивного алгоритму. Особливо це стосується систем з високим ступенем невизначеності або неповною інформацією про процес.

При реалізації адаптивних систем у промислових умовах важливо також враховувати енергетичну ефективність. Адаптивне керування дає змогу зменшити втрати енергії за рахунок оптимізації режимів роботи виконавчих механізмів, мінімізації часу стабілізації та зменшення амплітуди коливань. У поєднанні з методами оптимального керування це створює умови для підвищення сталого розвитку виробництва та екологічної безпеки.

Таким чином, у сучасних умовах адаптивні методи керування набувають особливого значення як засіб забезпечення стабільної та ефективної роботи автоматизованих систем. Розглянуті підходи демонструють здатність таких систем адаптуватися до структурної та параметричної невизначеності об'єктів керування. Інтеграція адаптивних алгоритмів у системи керування радіоелектронного приладобудування та робототехнічних комплексів дозволяє

досягати високої точності, надійності та енергоефективності в умовах невизначеності параметрів та структури об'єктів керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Текст]: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Control Systems Engineering /I. J Nagrath, M. Gopal. - New Academic Science, 2020. – 912 p.
3. Automatic Control Systems. 11th Edition / F.Golnaraghi, B.Kuo. – McGraw-Hill Education, 2019. – 864 p.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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: Овчаренко Віталій Євгенович, проф., д.т.н., професор кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки.