

## УПРАВЛІННЯ БАГАТОСТУПЕНЕВИМИ НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ ІЗ НЕВИЗНАЧЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

**Д.А. Шматько, С.О. Кравченко**

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

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

**Анотація:** У статті розглядаються особливості управління робототехнічними системами в контексті вимог Індустрії 4.0 і переходу до Індустрії 5.0. Розглянуто структуру, принципи функціонування систем управління, методи підвищення точності та динамічної стабільності в умовах невизначеності зовнішнього середовища та варіабельності параметрів об'єктів управління.

**Ключові слова:** система управління, робототехнічна система, об'єкт управління, принципи управління, адаптивна система.

## CONTROL OF MULTISTAGE NONLINEAR SYSTEMS WITH UNCERTAIN PARAMETERS

**D. Shmatko, S. Kravchenko**

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

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

**Annotation:** The article examines the features of the control of robotic systems in the context of the requirements of Industry 4.0 and the transition to Industry 5.0. The structure, principles of operation of control systems, and methods for improving accuracy and dynamic stability under conditions of environmental uncertainty and variability of control object parameters are discussed.

**Key words:** control system, robotic system, control object, control principles, adaptive system.

Розвиток робототехнічних систем (РТС) набуває особливої актуальності у світлі концепцій Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, які акцентують на інтелектуалізації виробництва, взаємодії людини і машини, сталому розвитку та підвищенні ефективності використання ресурсів. Сучасні РТС стають важливою складовою високотехнологічних галузей, забезпечуючи гнучкість, адаптивність і автономність виробничих процесів.

РТС складається із системи управління, виконавчих пристроїв (двигуни, механічні системи) та об'єкта управління (ОУ). ОУ може бути будь-який технічний або технологічний процес, який змінює свій стан під впливом керуючих дій. Об'єкт управління виділяється таким чином, щоб на нього можна було впливати й змінювати його стан у заданому напрямку. Виконавчі пристрої РТС складаються з механічної системи, приводів та сенсорів зворотного зв'язку, що забезпечують контроль координат, швидкостей, прискорень та сил. Механічна система закінчується робочим органом, який взаємодіє з зовнішнім середовищем.

Інтелектуальна робототехнічна система включає об'єкт управління разом із середовищем, у якому вона функціонує. Виконавчі двигуни РТС здійснюють переміщення ОУ за заданими законами. Інформація про положення вихідних ланок РТС визначається датчиками, розташованими в шарнірах її ланок, що реєструють координати механізмів переміщення, їхні швидкості, прискорення й сили.

Функція управління полягає у забезпеченні виконання заданих функцій об'єктом управління в умовах реальних експлуатаційних впливів. Фактичний стан ОУ визначається одним або кількома робочими параметрами  $u(t)$ , які найчастіше є фізичними величинами: швидкість (лінійна та обертальна), температура, електрична напруга, лінійні та кутові переміщення тощо. В реальних умовах на об'єкт діють обурення  $z(t)$ , що змінюють його стан. Для компенсації збурень та підтримки необхідних робочих параметрів необхідно формувати відповідні керуючі дії  $U(t)$ .

Основна задача системи управління полягає у формуванні законів переміщення її виконавчими механізмами в реальному часі. Зазвичай такі системи працюють у слідкуючому режимі, який забезпечує виконання заданої траєкторії переміщення для кожного ступеня рухливості РТС з необхідною точністю, швидкістю та зусиллям. Вихідними координатами виконавчих механізмів є їх положення та швидкість у відповідному просторі. Під час взаємодії виконавчого механізму з об'єктом формується зусилля, яке впливає на виконавчі органи РТС. Як об'єкт управління або середовище можуть виступати переміщувані вироби, інструменти або технологічні процеси.

Для вирішення цієї задачі використовують три фундаментальні принципи управління: розімкнене управління, управління за збуренням (принцип компенсації) та замкнене управління (принцип зворотного зв'язку або управління за відхиленням). Для складних завдань із високими вимогами до точності використовується третій принцип із відповідними надбудовами. Для формування керуючих впливів на всі ступені рухливості розв'язується крайова задача для системи звичайних диференціальних рівнянь, що описують функціонування об'єкта управління.

Сьогодні задачі управління багатоступеневими взаємопов'язаними нелінійними електромеханічними та електрогідрравлічними об'єктами, які забезпечують функціонування складних комплексних систем, мають високу значущість для промисловості. До таких комплексів належать робототехнічні системи, екстремальні роботи-маніпулятори, наземні та морські мобільні об'єкти, безпілотні літальні апарати тощо. Досягнення високої точності й продуктивності можливе завдяки складним методам управління, і останнім часом активно використовуються аналітичні та інтелектуальні адаптивні системи управління. Таким чином, завдання підвищення динамічної точності та швидкодії функціонування складних механічних об'єктів розв'язуються шляхом створення ефективних систем управління їхнім рухом.

Для вирішення таких завдань потрібно розвивати і вдосконалювати методи та засоби автоматичного управління багатоступеневими взаємопов'язаними механічними об'єктами з апріорно невизначеним та/або складним нелінійним математичним описом, з неповними вимірюваннями, зі швидкими й широкими змінами параметрів, властивостей і умов функціонування, а також впливами зовнішнього середовища. В такій постановці одним із методів вирішення завдань управління механічними об'єктами є адаптивні методи.

Сучасний етап проектування складних комплексів, що керують високотехнологічними об'єктами, пов'язаний із вирішенням завдань щодо зниження впливу різних чинників, які спричиняють порушення робочих режимів керованих об'єктів. До таких чинників належать відсутність апріорної інформації про нестабільні значення масо-інерційних і пружних параметрів механічних об'єктів, випадкові зміни навантаження; взаємний вплив ступенів рухливості об'єктів; варіювання параметрів об'єктів від одного зразка до іншого та варіювання параметрів стандартних систем регулювання при заміні виконавчих приводів і окремих блоків управління.

Побудова більшості сучасних систем автоматичного управління рухом базується на основі підлеглого управління, основним обчислювальним електронним модулем реалізації якого є операційний підсилювач. Однак таке побудування систем із підлеглим управлінням не

враховує прояви згаданих недосконалостей динаміки складних багатоступневих взаємопов'язаних нелінійних пружних механічних об'єктів із невизначеними параметрами та зовнішніми збуреннями, які можуть мати періодичний або навіть ударний характер.

Максимально можлива швидкодія широко поширеного в техніці методу підлеглого управління за ідеалізованого подання одного ступеня рухливості керованого об'єкта у вигляді жорстко приєднаного до виконавчого приводу навантаження зі сталою інерційною характеристикою відповідає пропускну́й смузі системи стеження 15-40 Гц. Однак при наявності пружних деформацій із частотами в межах 2-15 Гц реальна швидкодія систем може істотно знижуватися. Це може призводити до значного недовикористання потенційних можливостей сучасних виконавчих приводів. Очевидно, що зниження швидкодії системи не вирішує проблему стійкості до виникнення пружних коливань, які можуть збуджуватися ударними навантаженнями. З іншого боку, вимушене зниження швидкодії систем стеження з підлеглим управлінням погіршує реакцію систем на обурення, що може спричиняти великі динамічні похибки цих систем у режимах стабілізованого наведення. Таким чином, сучасні приводи (електричні й гідравлічні) створюють необхідні передумови для вдосконалення систем управління.

Іншою важливою передумовою створення більш досконалих систем автоматичного управління рухомими механічними об'єктами є перехід від аналогової елементної бази електронних блоків систем управління до сучасної високопродуктивної обчислювальної мікроконтролерної техніки. Це потребує коригування традиційних методів побудови систем управління рухомими об'єктами й переходу до сучасніших методів управління.

Задача управління рухом складної механічної системи (до них можна віднести і робототехнічні системи) формулюється як завдання термінального управління із заданими початковими та кінцевими станами. За визначенням, термінальне управління – це управління, мета якого полягає в переведенні об'єкта управління в заданий кінцевий стан у визначений момент часу при дотриманні заданих критеріїв якості системи. Важливою особливістю термінальних завдань є неоднозначність їхнього розв'язання: жорсткі вимоги до точності управління висуваються тільки до кінцевої (термінальної) точки, тим самим допускаючи певну довільність у формуванні проміжної частини траєкторії.

Найбільш оптимальним способом для завдань термінального управління є управління зі зворотним зв'язком. Під ним розуміють таке управління, при якому поточні керуючі дії виробляються з урахуванням стану об'єкта управління. Проте, окрім врахування поточного стану, закон управління має забезпечувати виконання термінальних умов і допустиме відхилення нових траєкторій від вихідної.

Традиційні методи підлеглого управління не повною мірою враховують ці недоліки. Для їх подолання необхідно впроваджувати адаптивні системи управління з інтелектуальними прогнозуючими моделями та методами активної компенсації коливань. Впровадження прогнозуючих моделей, що працюють паралельно основному контуру управління, забезпечуючи попередження про можливі відхилення та корекцію траєкторії руху в реальному часі є одним з перспективних напрямків реалізації термінального управління.

Індустрія 4.0 акцентує на автоматизації та цифровізації процесів, використанні великих даних, IoT, хмарних технологій. Індустрія 5.0 доповнює це орієнтацією на людину, сталий розвиток і соціальну відповідальність. Управління РТС у рамках цих концепцій повинно враховувати: енергетичну ефективність і екологічність (сталий розвиток), інтерактивну взаємодію з людиною-оператором, адаптивність до швидких змін зовнішніх умов, впровадження елементів штучного інтелекту для самонавчання систем.

Таким чином, побудова ефективних систем управління складними механічними багатоступневими нелінійними об'єктами із невизначеними параметрами потребує синергії

традиційних методів і новітніх технологій цифровізації, адаптивного управління та прогнозування. Це особливо актуально у світлі сучасних вимог сталого розвитку та гуманізації виробництва у межах Індустрії 5.0.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Текст]: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
  2. Проектування мобільних маніпуляційних роботів: монографія /І. Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, В. В.Євсєєв, С. П. Новоселов, Н. П. Демська. Х.: 2022. 427 с.
  3. 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.
  4. Vladyslav, Y., & Bronnikov, A. (2020, October). ANALYSIS OF THE CMMI MODEL APPLICATION FOR SOLVING THE TASKS OF CPPS CONTROL PROCESSES AUTOMATION DEVELOPMENT. In The 4 th International scientific and practical conference “Actual trends of modern scientific research”(October 11-13, 2020) MDPC Publishing, Munich, Germany. 2020. 386 p. (p. 128).
  5. Yevsieiev, V. V., & Bronnikov, A. I. (2020). Development of databases interconnection “essences” information model for cyber-physical production systems additive cyber design creation automation. Збірник Наукових Праць НУК, №3. С.56-62. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.3\(481\).7](https://doi.org/10.15589/znp2020.3(481).7)
  6. Yevsieiev V., Bronnikov A. Information systems development methodologies application analysis for cyber-physical production systems development. III International scientific-practical conference “Theory, science and practice” (Japan, Tokyo, 5–8 October 2020). P. 398–401. DOI: 10.46299/ISG.2020.II.III
  7. Yevsieiev V., Bronnikov A. Analysis of the cyber-physical production systems implementation impact to achieve the goals of lean production. The IIth International scientific and practical conference «Development of scientific and practical approaches in the era of globalization» (USA, Boston, 28–30 September. 2020). P.221–226. DOI:10.46299/ISG.2020.II.II.
  8. Attar, H., & et al.. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.
  9. Abu-Jassar AT, Attar H, Amer A, et al. Remote Monitoring System of Patient Status in Social IoT Environments Using Amazon Web Services (AWS) Technologies and Smart Health Care. International Journal of Crowd Science, 2024, <https://doi.org/10.26599/IJCS.2023.9100019>
  10. Abu-Jassar AT, Attar H, Amer A, et al. Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. International Journal of Crowd Science, 2024, <https://doi.org/10.26599/IJCS.2023.9100018>
  11. 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.
  - 12 Attar, H., & et al.. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.
- Науковий керівник:** Токарева Олена Віталіївна, доц., к.т.н., професор кафедри КІТАР Харківського національного університету радіоелектроніки.