

СТІЙКЕ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ З ВАРІАТИВНОЮ СТРУКТУРОЮ ДИНАМІКИ У КОНТЕКСТІ ІНДУСТРІЇ 5.0

А.П. Кітченко, А.В. Бербенець

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: artur.kitchenko@nure.ua, andrii.berbenets@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто питання забезпечення стійкого керування нелінійними об'єктами з варіативною структурою динаміки в умовах сучасних виробничих систем, орієнтованих на концепцію Індустрії 5.0. Проаналізовано особливості поведінки складних технічних об'єктів, параметри яких змінюються під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. Обґрунтовано необхідність використання адаптивних та інтелектуальних підходів до синтезу систем керування, здатних забезпечувати стабільність функціонування за умов невизначеності та нелінійності. Розглянуто принципи побудови систем керування з урахуванням зміни структури динамічних моделей, а також підходи до забезпечення їх робастності та стійкості.

Ключові слова: стійке керування, нелінійний об'єкт, варіативна динаміка, адаптивна система керування, робастність, Індустрія 5.0.

STABLE CONTROL OF NONLINEAR OBJECTS WITH VARIABLE DYNAMICS STRUCTURE IN THE CONTEXT OF INDUSTRY 5.0

A. Kitchenko, A. Berbenets

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: artur.kitchenko@nure.ua, andrii.berbenets@nure.ua

Annotation: The article examines the problem of ensuring stable control of nonlinear objects with variable dynamic structures in the context of modern production systems aligned with the Industry 5.0 paradigm. The behavioral features of complex technical systems whose parameters vary under internal and external influences are analyzed. The necessity of applying adaptive and intelligent control approaches capable of maintaining system stability under uncertainty and nonlinearity is substantiated. The principles of designing control systems that account for structural changes in dynamic models are considered, along with methods for ensuring robustness and stability.

Key words: stable control, nonlinear system, variable dynamics, adaptive control system, robustness, Industry 5.0.

Концепція Індустрії 5.0 запроваджує нові підходи до організації робочих процесів, де основний фокус зміщується на спільну діяльність людини та технічних засобів. На відміну від повної автоматизації, цей етап розвитку передбачає використання інтелектуальних систем, які здатні гнучко реагувати на дії оператора та зміни виробничого середовища. В таких умовах технічні вимоги до систем керування стають значно жорсткішими. Якщо раніше основна увага приділялася стабільності роботи у вузькому діапазоні сталих параметрів, то тепер на перше місце виходить здатність підтримувати задані показники якості при постійних змінах зовнішніх факторів.

Промислове обладнання, яке працює в межах сучасних мережевих структур, постійно стикається з варіативністю навантажень та режимів. Стійкість керування є критичною характеристикою, оскільки будь-яке відхилення від норми в нелінійних об'єктах може

призвести до швидкого зростання помилки регулювання. Це особливо помітно в системах з високою динамікою, де інерційні процеси та нелінійні зв'язки між компонентами не дозволяють використовувати прості методи стабілізації. Виникає ситуація, коли регулятор повинен не просто відпрацьовувати завдання, а й враховувати можливу зміну поведінки самого об'єкта під час роботи.

У сучасних виробничих лініях часто використовуються об'єкти, структура яких є змінною. Це можуть бути маніпуляційні системи, характеристики яких змінюються залежно від ваги вантажу або положення у просторі, або ж технологічні установки, де фізико-хімічні властивості середовища змінюються в реальному часі. У таких випадках необхідно впроваджувати алгоритми, що здатні компенсувати зміни динаміки та підтримувати стійкість контуру керування незалежно від поточного стану системи.

Індустрія 5.0 також передбачає широке використання кіберфізичних систем, де фізична частина об'єкта тісно пов'язана з його цифровим описом. Це дає можливість отримувати значно більший обсяг даних про стан обладнання, ніж раніше. Проте наявність великої кількості інформації потребує нових інструментів для її обробки. Система керування має виділяти корисні сигнали на фоні шумів та завад, що виникають у промислових мережах. Надійність передачі даних та швидкість реакції на зміни структури об'єкта стають вирішальними для забезпечення безпечної взаємодії людини та техніки.

Нелінійні об'єкти зі змінною динамікою мають схильність до накопичення похибок, якщо система керування не має достатнього запасу робастності. У сучасних гнучких виробництвах, де переналагодження обладнання відбувається дуже часто, неможливо кожного разу проводити повний цикл ручного тестування стійкості. Система має самостійно адаптуватися до нових умов, зберігаючи стабільність перехідних процесів. Впровадження інтелектуальних компонентів у контур керування дозволяє вирішити низку технічних складнощів. Сучасні вимірювальні перетворювачі та виконавчі механізми стають частиною єдиної інформаційної структури, де кожен елемент розуміє свою роль у загальному процесі. Це дозволяє реалізувати багаторівневе керування, де нижній рівень відповідає за швидку стабілізацію фізичних величин, а верхній - за корекцію стратегії поведінки при зміні структури об'єкта. Такий підхід мінімізує ризики виходу системи з ладу через непередбачувані поштовхи або зміну параметрів навколишнього середовища.

Технічні об'єкти, які експлуатуються в сучасних виробничих циклах, рідко підпорядковуються законам лінійної динаміки в усьому діапазоні робочих режимів. Нелінійність проявляється через складні взаємозв'язки між вхідними сигналами та реакцією системи, що часто зумовлено фізичними обмеженнями, тертям, зонами нечутливості або ефектами насичення виконавчих механізмів. В промисловому обладнанні нелінійні властивості можуть бути як статичними, так і динамічними. Статичні нелінійності зазвичай пов'язані з конструктивними особливостями елементів, наприклад, характеристиками клапанів або підсилювачів, а динамічні виникають через зміну енергетичних потоків усередині системи під час перехідних процесів.

Важливою характеристикою таких об'єктів є змінність параметрів у часі. На відміну від стаціонарних систем, де коефіцієнти передачі та сталі часу вважаються константами, реальні системи демонструють дрейф характеристик. Це може відбуватися внаслідок нагрівання компонентів, зміни в'язкості мастильних матеріалів або природного зносу механічних вузлів. Коли параметри об'єкта відхиляються від розрахункових значень, налаштований регулятор перестає бути оптимальним, що призводить до затягування перехідних процесів або виникнення перерегулювання. Для нелінійних систем цей ефект посилюється, оскільки зміна одного параметра може нелінійно впливати на загальну стійкість усього контуру. Наприклад, у робототехнічному комплексі під час захоплення вантажу маніпулятором відбувається

миттєва зміна маси та інерційних характеристик ланок, що фактично створює нову динамічну модель. Аналогічні процеси спостерігаються в автоматизованих конвеєрних лініях при зміні кількості підключених приводів або в енергетичних установках при переході з режиму холостого ходу до повного навантаження.

Невизначеності зазвичай поділяють на параметричні та структурні. Параметрична невизначеність виникає тоді, коли відома структура моделі, але точні значення коефіцієнтів визначені з похибкою. Структурна невизначеність є більш небезпечною, оскільки вона охоплює процеси, які взагалі не були враховані під час математичного опису об'єкта. Це можуть бути високочастотні коливання пружних зв'язків, запізнення в каналах зв'язку або мікроміни геометрії при температурних деформаціях. Наявність невизначеностей призводить до того, що реальна траєкторія руху системи відхиляється від бажаної. У нелінійних об'єктах навіть незначне початкове відхилення через механізми позитивного зворотного зв'язку може призвести до автоколивань.

Для аналізу таких об'єктів часто використовують апарат фазових портретів або методи функції Ляпунова, але для систем зі змінною структурою ці методи потребують суттєвого ускладнення. Потрібно враховувати, що енергія системи в момент перемикання структури не завжди змінюється безперервно. Виникають ефекти стрибків стану, які система керування повинна демпфувати. Якщо не враховувати ці особливості на етапі проектування алгоритму, то навіть при ідеальних датчиках і виконавчих механізмах отримати високу якість керування неможливо. Додатковим фактором є завади, які супроводжують роботу промислових систем. У нелінійних об'єктах шум вимірювання може детектуватися та зміщувати робочу точку системи, що в умовах змінної динаміки призводить до непередбачуваних дрейфів. Взаємодія невизначеностей моделі та зовнішніх збурень створює кумулятивний ефект, що знижує динамічну точність. Тому опис об'єкта лише на основі номінальних параметрів є недостатнім для побудови сучасних систем автоматизації. Необхідно використовувати інтервальні оцінки або ймовірнісні моделі, що дозволяють охопити весь спектр можливих станів динаміки.

Нелінійні об'єкти з варіативною структурою представляють собою складні динамічні системи, де зміна властивостей є природним процесом функціонування. Основна задача при роботі з такими об'єктами полягає у створенні описів, які б враховували не лише базові режими роботи, а й динаміку перехідних процесів між різними структурними станами, що є основою для подальшого синтезу робастних та адаптивних регуляторів. Одним із базових підходів є метод функцій Ляпунова, який дозволяє аналізувати стійкість нелінійних систем без розв'язування диференціальних рівнянь. На практиці це означає пошук такого закону керування, який би забезпечував постійне зменшення енергії помилки системи. Однак для об'єктів зі змінною структурою це завдання ускладнюється тим, що функція Ляпунова має залишатися від'ємно визначеною для всіх можливих конфігурацій об'єкта. Це змушує використовувати загальні функції Ляпунова або методи перемикання між різними функціями, що дозволяє утримувати систему в межах стійкості під час структурних переходів.

Робастні методи керування займають особливе місце у вирішенні завдань стабілізації. Суть робастного підходу полягає в тому, щоб синтезувати такий регулятор, який забезпечить задану якість роботи не лише для номінальної моделі, а й для цілого сімейства моделей, що описують об'єкт у різних станах. Робастні регулятори часто мають високий порядок, що створює труднощі при їх реалізації на мікропроцесорній техніці з обмеженими ресурсами.

Адаптивні методи керування дозволяють системі підлаштовувати свої параметри безпосередньо в процесі роботи. Адаптивні системи з еталонною моделлю порівнюють реальну реакцію об'єкта з бажаною і на основі отриманої помилки коригують коефіцієнти регулятора. Для об'єктів з варіативною структурою це особливо ефективно, оскільки дозволяє автоматично відпрацьовувати зміну динаміки, наприклад, при завантаженні або розвантаженні

маніпулятора. Існують також адаптивні системи з ідентифікацією, де спочатку уточнюються параметри математичної моделі об'єкта в реальному часі, а потім на їх основі перераховуються параметри керування.

Варіативність структури динаміки вимагає використання багаторівневих стратегій. Наприклад, комбінування робастного регулятора для нижнього рівня стабілізації з адаптивним алгоритмом на верхньому рівні дозволяє досягти балансу між швидкою реакцією та точністю. Така гібридна архітектура є найбільш перспективною для складних технічних систем, що працюють у змінних умовах. Ще є прогнозує керування, в рамках якого, на кожному кроці розв'язується задача оптимізації. Система прораховує, як зміниться стан об'єкта при різних варіантах керування з урахуванням обмежень на напругу, струм чи швидкість. Це потребує значних обчислювальних витрат, але дозволяє ефективно працювати з нелінійностями та структурними обмеженнями, оскільки вони безпосередньо закладаються в математичну модель прогнозу.

Процес інтелектуалізації систем керування в сучасних умовах базується на впровадженні алгоритмів, здатних обробляти великі масиви даних у реальному часі для прийняття рішень щодо корекції параметрів регуляторів. Використання елементів штучного інтелекту та машинного навчання стає необхідним саме для нелінійних об'єктів, де побудова точної аналітичної моделі є занадто складною або неможливою. Зокрема, нейронні мережі застосовуються як апроксиматори нелінійних функцій. В контурі керування нейромережевий блок може виконувати роль компенсатора, який на основі попереднього досвіду передбачає виникнення похибки і вносить відповідну правку в сигнал керування. Для об'єктів з варіативною структурою важливо вчасно розпізнати момент переходу від однієї динамічної моделі до іншої. Використання методів навчання з підкріпленням дозволяє системі самостійно шукати оптимальну стратегію керування в умовах високої невизначеності, постійно вдосконалюючи закон регулювання.

Таким чином, вибір конкретного методу забезпечення стійкості залежить від інформації про об'єкт та доступних обчислювальних ресурсів. Для простих нелінійностей достатньо робастних методів, а складна варіативна динаміка вимагає впровадження адаптації або спостерігачів збурень. Головним критерієм залишається здатність системи підтримувати стабільність у перехідних режимах, коли структура об'єкта зазнає трансформацій. Поєднання розглянутих методів дозволяє створювати гнучкі та надійні системи автоматизації, які здатні ефективно функціонувати в умовах промислової невизначеності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Система автоматичного управління з нейромережевими регуляторами для підвищення якості ВВКМ / Гурін І.В., Невлюдов І.Ш., Овчаренко В.Є., Токарева О.В. // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2024, №2, с. 104-116.
3. Terminal control tasks in robotic systems / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XVIII International scientific and practical conference «Theoretical and applied aspects of the development of science», May 09 – 12, 2023, Bilbao, Spain. International Science Group. 2023. P.451-452.
4. Control in System Dynamics: Comparative Analysis of Feedback Strategies [Electronic resource] / Alain Oustaloup. – John Wiley and Sons Ltd, 2024. – 464 p.
5. Application of nonlinear systems theory to enhance the accuracy of automatic control systems in technological processes / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XII International scientific and practical

conference «Prospective directions of modern science and education in the world», November 19-22, 2024, Rotterdam, Netherlands. International Science Group.2024. P. 373-375.

6. Neural network adaptive control system for a vacuum diffusion furnace / V. Ovcharenko, O. Tokarieva // XVI International scientific and practical conference «New ways of improving outdated methods and technologies», December 17 – 20, 2024, Copenhagen, Denmark. International Science Group.2024. P. 317-319.

7. Yevsieiev, V., & Holod, I. (2026). HARDWARE-SOFTWARE MODULE FOR INTELLIGENT MICROCLIMATE CONTROL IN INDUSTRIAL FACILITIES. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series: “Computer Engineering and Automation”, 4(6(38)), 7–17. [https://doi.org/10.32782/2786-9024/v4i6\(38\).359113](https://doi.org/10.32782/2786-9024/v4i6(38).359113)

8. Nevliudov, I. ., Omarov, M. ., Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Jabrayilzade, E. . (2026). MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTORIES CONSTRUCTION, MOVEMENT OF THE GRIPPING DEVICE OF A COLLABORATIVE ROBOT. Advanced Information Systems, 10(1), 11–20. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2026.1.02>

9. Yevsieiev V. Digital Twin in Modeling and Control of Collaborative Robots: Analysis, Comparison and Application Recommendations / V. Yevsieiev, S. Starikova // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2026 : Proceedings of III st All-Ukrainian Conference, May 14-15, 2026. - Kharkiv .: [electronic version], 2026. - P. 89-92.

10. Industry 5.0 та колаборативна робототехніка: динамічний опис навколишнього середовища роботів-маніпуляторів з використанням мови Python: монографія / І. Ш. Невлюдов, В. В. Євсєєв, С. С. Максимова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2026. – 279 с.

11. Yevsieiev V. Development of a model for constructing the optimal trajectory of the gripping device of a collaborative robot-manipulator taking into account the influence of the cargo mass and energy consumption / V. Yevsieiev, D. Gurin // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – 2026. - № 107. – С. 224-240. - DOI: 10.32620/oikit.2026.107.15.

12. Yevsieiev V. Intelligent Collaborative Control of Mobile Robots for Emergency and Rescue Operations Within the Industry 5.0 Paradigm / V. Yevsieiev // Yevsieiev V. Intelligent Collaborative Control of Mobile Robots for Emergency and Rescue Operations Within the Industry 5.0 Paradigm / V. Yevsieiev // Intelligent Civil Safety Technologies and Robotic Systems for Emergency and Rescue Operations (ICSTRO-2026) : Proceedings of I-st All-Ukrainian Conference, February 12-23, 2026. – Kharkiv, 2026. - P. 144-147.

13. Using Quantum Computings During Collaborative Mobile Robot Trajectory Constructing / V. V. Yevsieiev, S. S. Maksymova, M. G. Starodubcev, N. P. Demska // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. - Серія: Технічні науки. - 2025. - Т. 36 (75), № 6, частина 2. - P. 111-118. - DOI : <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.2/16>

14. Yevsieiev V. Features of the Use of Quantum Computing in Constructing Trajectory of Collaborative Mobile Robot / V. Yevsieiev, N. Demska // Information Technologies and Automation - 2025 : Proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference, October 30-31, 2025. - Odessa : ONUT Publishing House, 2025 – P. 893-895.

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