

РОБАСТНЕ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ЗА УМОВ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ТА СТРУКТУРНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

А.Р. Рожко, А.В. Бербенець

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: anna.rozhko@nure.ua, andrii.berbenets@nure.ua

Анотація: У роботі досліджено особливості побудови систем робастного керування для розподілених технологічних процесів, що функціонують в умовах параметричної та структурної невизначеності. Проаналізовано вплив невизначеностей на стійкість та якість керування. Розглянуто методи забезпечення робастності шляхом формування інваріантних характеристик системи.

Ключові слова: робастне керування, розподілений процес, параметрична невизначеність, структурна невизначеність, стійкість системи, адаптація.

ROBUST CONTROL OF DISTRIBUTED TECHNOLOGICAL PROCESSES UNDER PARAMETRIC AND STRUCTURAL UNCERTAINTY

A. Rozhko, A. Berbenets

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: anna.rozhko@nure.ua, andrii.berbenets@nure.ua

Annotation: The paper investigates the design features of robust control systems for distributed technological processes operating under parametric and structural uncertainty. The impact of uncertainties on system stability and control performance is analyzed. Methods for ensuring robustness through the formation of invariant system characteristics are considered.

Key words: robust control, distributed process, parametric uncertainty, structural uncertainty, system stability, adaptation.

Сучасні розподілені технологічні процеси характеризуються високим рівнем складності, багатокомпонентною структурою та тісною взаємодією між окремими підсистемами, що функціонують у єдиному виробничому середовищі. У таких умовах ефективність керування значною мірою залежить від точності математичного опису об'єкта та стабільності його параметрів у часі. Однак у реальних виробничих системах повна визначеність параметрів практично недосяжна, оскільки на функціонування технологічних процесів впливає велика кількість факторів, що мають стохастичний або змінний характер. Це зумовлює виникнення параметричної та структурної невизначеності, яка істотно ускладнює процес синтезу ефективних систем керування.

Розподілений характер сучасних технологічних процесів передбачає наявність великої кількості взаємопов'язаних елементів, між якими здійснюється обмін матеріальними, енергетичними та інформаційними потоками. Кожен із цих елементів може мати власні динамічні характеристики, які змінюються під впливом зовнішніх умов або внутрішніх процесів деградації. В результаті загальна модель об'єкта керування набуває змінного характеру, що ускладнює використання класичних методів аналізу та синтезу систем керування, які базуються на припущенні про сталість параметрів.

Параметрична невизначеність проявляється у зміні числових значень коефіцієнтів математичної моделі об'єкта, що може бути зумовлено коливаннями технологічних режимів,

зміною навантаження або впливом зовнішніх збурень. Структурна невизначеність, у свою чергу, пов'язана зі зміною самої структури об'єкта керування, наприклад, появою нових взаємозв'язків між підсистемами або відмовою окремих елементів. Обидва типи невизначеності можуть одночасно впливати на систему, що значно ускладнює забезпечення стабільного функціонування технологічного процесу.

Вплив невизначеностей на ефективність керування проявляється у зниженні точності регулювання, погіршенні динамічних характеристик системи та зменшенні її стійкості до зовнішніх збурень. В таких умовах традиційні підходи до синтезу систем керування, які не враховують змінність параметрів, можуть виявитися недостатньо ефективними або навіть непридатними для практичного застосування. Це особливо актуально для складних виробничих комплексів, де навіть незначні відхилення параметрів можуть призводити до суттєвого зниження якості продукції або порушення технологічного процесу. З огляду на це, особливого значення набуває розробка підходів до робастного керування, які забезпечують здатність системи зберігати необхідні показники якості функціонування в умовах невизначеності. Робастні системи керування орієнтовані на забезпечення стійкості та працездатності об'єкта навіть при значних відхиленнях його параметрів від номінальних значень, що досягається шляхом використання спеціальних методів синтезу, які враховують можливі варіації моделі та забезпечують заданий рівень якості керування у широкому діапазоні умов.

Параметрична та структурна невизначеність у технологічних системах є багатовимірними явищами, що формують складні умови функціонування розподілених процесів і безпосередньо впливають на ефективність систем керування. Для коректного аналізу таких явищ доцільно розглядати їх у межах певної класифікації, яка дозволяє виділити основні типи невизначеності та визначити характер їх впливу на динаміку об'єкта. У загальному випадку параметрична невизначеність пов'язана зі зміною числових значень параметрів математичної моделі, тоді як структурна невизначеність відображає зміну самої структури взаємодії між елементами системи.

Параметрична невизначеність є найбільш поширеним видом відхилень у технологічних системах і виникає внаслідок змін умов експлуатації, коливань навантаження, зношування обладнання або впливу зовнішніх факторів. Вона проявляється у варіації коефіцієнтів, що описують динаміку об'єкта, при цьому загальна структура моделі залишається незмінною. Такий тип невизначеності може мати як повільний, так і швидкоплинний характер, що суттєво ускладнює його врахування при синтезі систем керування. У разі повільних змін параметрів можливе використання адаптивних методів корекції, тоді як швидкі зміни вимагають застосування більш стійких, робастних підходів.

Структурна невизначеність є більш складним явищем, оскільки вона пов'язана зі зміною самої конфігурації системи або її внутрішніх зв'язків. Це може бути наслідком відмови окремих елементів, введення нових технологічних вузлів або зміни логіки взаємодії між підсистемами. У таких умовах змінюється не лише кількісне описання об'єкта, але й його якісна структура, що робить неможливим використання фіксованих моделей. Структурна невизначеність особливо характерна для розподілених технологічних процесів, де взаємодія між елементами може змінюватися залежно від режиму роботи системи.

Джерела виникнення невизначеності можна умовно поділити на внутрішні та зовнішні. Внутрішні джерела пов'язані з особливостями самого технологічного процесу, такими як старіння обладнання, деградація матеріалів або нестабільність параметрів виконавчих механізмів. Зовнішні джерела включають вплив навколишнього середовища, зміни у постачанні ресурсів, коливання енергетичних параметрів або втручання інших систем. У

реальних умовах ці фактори діють одночасно, створюючи складну картину невизначеності, яка має стохастичний характер і важко піддається точному моделюванню.

Вплив параметричної та структурної невизначеності на динаміку системи проявляється у зміні її перехідних і усталених режимів. Зокрема, можуть спостерігатися відхилення від заданих траєкторій, збільшення часу встановлення рівноваги, поява коливальних процесів або навіть втрата стійкості. У випадку параметричної невизначеності ці ефекти зазвичай мають плавний характер, тоді як структурні зміни можуть викликати різкі та непередбачувані порушення динаміки системи.

Особливістю розподілених технологічних процесів є те, що невизначеність може поширюватися між підсистемами, посилюючи свій вплив на загальну поведінку об'єкта, що створює ефект накопичення похибок, який ускладнює забезпечення стабільного функціонування системи керування.

Принципи побудови робастних систем керування базуються на необхідності забезпечення стійкого функціонування технологічних процесів за умов суттєвої невизначеності параметрів та можливих структурних змін об'єкта. На відміну від традиційних підходів, які орієнтовані на точне математичне описання системи, робастне керування передбачає врахування множини можливих варіацій моделі та забезпечення заданих показників якості для всього допустимого діапазону змін. Одним із базових принципів робастного керування є орієнтація на забезпечення стійкості системи в широкому діапазоні зміни її параметрів. Система повинна зберігати здатність повертатися до рівноважного стану після дії зовнішніх або внутрішніх збурень незалежно від конкретних значень параметрів об'єкта. Важливим елементом побудови робастних систем є формування інваріантних властивостей, які забезпечують незалежність основних характеристик системи від змін параметрів об'єкта. Інваріантність означає здатність системи зберігати задані співвідношення між вхідними та вихідними змінними незалежно від впливу невизначеностей. Досягнення таких властивостей можливе шляхом спеціального структурування системи керування та вибору відповідних алгоритмів регулювання, які мінімізують вплив варіацій параметрів на кінцевий результат.

В процесі синтезу робастних систем треба проводити аналіз чутливості, який дозволяє оцінити ступінь впливу зміни окремих параметрів на загальну поведінку системи. Зниження чутливості до параметричних змін є одним із ключових завдань, оскільки воно безпосередньо пов'язане зі здатністю системи зберігати стабільність у реальних умовах експлуатації. Для цього використовуються підходи, які передбачають розподіл впливу невизначеностей між різними елементами системи з метою їх часткової компенсації. Структура системи керування повинна бути організована таким чином, щоб забезпечувати стійкість не лише до параметричних, але й до структурних змін. Це досягається шляхом використання модульних або ієрархічних архітектур, у яких окремі підсистеми можуть функціонувати автономно, зберігаючи при цьому загальну узгодженість роботи. Така організація дозволяє локалізувати вплив невизначеностей і зменшити їх поширення по всій системі.

Робастні системи також характеризуються використанням спеціальних алгоритмів керування, які враховують найгірші сценарії зміни параметрів об'єкта, що дозволяє забезпечити гарантований рівень якості функціонування навіть у складних умовах експлуатації. При цьому важливим є баланс між жорсткістю вимог до стійкості та ефективністю керування, оскільки надмірна консервативність може призводити до зниження продуктивності системи.

Методи адаптації та компенсації невизначеностей у розподілених технологічних процесах формують окремий клас підходів, спрямованих на підвищення стійкості та ефективності систем керування в умовах змінності параметрів і можливих структурних трансформацій об'єкта. Їх ключова особливість полягає у здатності системи змінювати власні налаштування у

процесі функціонування, реагуючи на поточний стан процесу та виявлені відхилення від очікуваної поведінки, що дозволяє частково компенсувати вплив невизначеностей без необхідності повної перебудови структури керування.

Одним із базових напрямів є використання адаптивних алгоритмів, які передбачають постійне оцінювання параметрів об'єкта в режимі реального часу. Такі алгоритми дозволяють виявляти повільні або раптові зміни характеристик технологічного процесу та відповідно коригувати параметри регулятора. У розподілених системах цей підхід набуває особливого значення, оскільки зміни можуть відбуватися локально в окремих підсистемах і не завжди одразу відображатися на загальній поведінці об'єкта. Це вимагає використання розподілених механізмів адаптації, які здатні працювати автономно на різних рівнях системи.

Іншим напрямом є застосування алгоритмів компенсації невизначеностей, які базуються на використанні додаткових моделей або спостерігачів стану. Такі механізми дозволяють відновлювати відсутню або спотворену інформацію про об'єкт керування, що є критично важливим у випадках структурних змін або часткових відмов елементів системи. Завдяки цьому забезпечується більш повне уявлення про поточний стан процесу, що підвищує точність формування керуючих впливів.

В розподілених технологічних системах значну роль відіграють також ієрархічні підходи до адаптації, коли коригування параметрів здійснюється на різних рівнях керування. На нижчому рівні можуть працювати локальні адаптивні регулятори, які реагують на швидкі зміни в окремих ділянках процесу, тоді як на верхньому рівні здійснюється координація та узгодження загальної поведінки системи. Також важливою складовою є забезпечення стабільності системи в умовах адаптації, оскільки зміна параметрів регулятора у реальному часі може призводити до виникнення небажаних коливань або втрати стійкості. Для запобігання цьому використовуються спеціальні обмеження на швидкість зміни налаштувань, а також методи аналізу стійкості адаптивних систем, що дозволяють гарантувати збереження працездатності навіть у складних умовах. Особливу увагу приділяють забезпеченню узгодженості між різними рівнями адаптації, щоб уникнути конфліктів між локальними та глобальними алгоритмами керування.

Перспективи розвитку робастних систем керування в сучасних виробничих середовищах безпосередньо пов'язані з подальшим розвитком промислових технологій у напрямі цифровізації, децентралізації та інтелектуалізації процесів керування. Зростання складності технологічних систем, підвищення вимог до їхньої продуктивності та надійності, а також збільшення рівня невизначеності в умовах реального виробництва зумовлюють необхідність переходу до нових принципів побудови систем керування. Робастні підходи поступово інтегруються з методами штучного інтелекту та сучасними інформаційними технологіями, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності керування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Z. H. Wu, H. C. Zhou et al, Review and new theoretical perspectives on active disturbance rejection control for uncertain finite-dimensional and infinite-dimensional systems / *Nonlinear Dyn.* 101, 935–959 (2020).
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. N. Liu, Y. S. Liu, and Q. Yang, “Robust adaptive control of nonlinear systems with uncertainties,” Appl. Mech. Mater. 568-570, 1108–1112 (2014).

7. Yevsieiev, V. V., & Holod, I. V. (2026). HARDWARE-SOFTWARE MODULE FOR INTELLIGENT MICROCLIMATE CONTROL IN INDUSTRIAL FACILITIES. Scientific Papers of Donetsk National Technical University. Series:“Computer Engineering and Automation”, 7-17.

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.

9. Yevsieiev V. Classification of Digital Twins in Collaborative Robot Modeling Problems / V. Yevsieiev, K. Luchaninov // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2026 : Proceedings of III st All-Ukrainian Conference, May 14-15, 2026. - Kharkiv .: [electronic version], 2026. - P. 93-96.

10. Yevsieiev V. Mathematical Methods for Environment Representation in Collaborative Robotics: Comparative Analysis and Application Recommendations / V. Yevsieiev // Computer-integrated technologies, automation and robotics 2026 : Proceedings of III st All-Ukrainian Conference, May 14-15, 2026. - Kharkiv .: [electronic version], 2026. - P. 85-88.

11. 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.

12. 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.

13. Yevsieiev V. Digital Twins of Collaborative Robotic Systems for Decision Support in Emergency Situations / V. Yevsieiev, S. Svetlana // 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. 153-156.

14. Yevsieiev V. Multi-Agent Collaborative Robots With Adaptive Sensor Fusion for Monitoring and Mitigation of Emergency Situations / V. Yevsieiev, N. Demska // Інтелектуальні технології цивільної безпеки та робототехнічні системи аварійно-рятувальних робіт 2026 : матеріали I-ої Всеукраїнської конфер.12-13 лютого 2026 р. - Харків: [електронний друк], 2026. – С. 162-165.

15. Yevsieiev, V., Gurin, D., Kulish, S., & Voloshyn, Y. (2025). Development of a partially supervised Markov decision-making model for a 3-link collaborative robot-manipulator. Radioelectronic and Computer Systems, 2025(4), 83-94. doi:<https://doi.org/10.32620/reks.2025.4.06>

16. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Gopejenko, V., & Kosenko, V. (2025). DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL SUPPORT FOR ADAPTIVE CONTROL FOR THE INTELLIGENT GRIPPER OF THE COLLABORATIVE ROBOT MANIPULATOR. Advanced Information Systems, 9(3), 57–65. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.3.07>

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