УДК 681.5:517.977

СИНТЕЗ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ З ТРАНСПОРТНИМ ЗАПІЗНЕННЯМ У РОЗПОДІЛЕНИХ ВИРОБНИЧИХ ЛІНІЯХ

Д.П. Ткачов, С.О. Кравченко
Харківський національний університет радіоелектроніки
Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14
E-mail: denys.tkachov@nure.ua, serhii.kravchenko@nure.ua

Анотація: У роботі розглянуто задачі синтезу систем керування для об'єктів із транспортним запізненням, характерних для розподілених виробничих ліній. Проаналізовано вплив запізнення на динамічні характеристики системи та якість керування. Визначено особливості побудови регуляторів з урахуванням просторового розподілу технологічного процесу. Розглянуто підходи до компенсації запізнення та підвищення стійкості системи.

Ключові слова: система керування, розподілена система, технологічний процес, транспортне запізнення, компенсація запізнення, синтез системи.

SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS FOR OBJECTS WITH TRANSPORT DELAY IN DISTRIBUTED PRODUCTION LINES

D. Tkachov, S. Kravchenko
Kharkiv National University of Radio Electronics
Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14
E-mail: denys.tkachov@nure.ua, serhii.kravchenko@nure.ua

Annotation: The paper addresses the problem of synthesizing control systems for objects with transport delay typical of distributed production lines. The influence of delay on system dynamics and control quality is analyzed. The specific features of controller design considering the spatial distribution of technological processes are determined. Approaches to delay compensation and system stability improvement are considered.

Key words: control system, distributed system, technological process, transport delay, delay compensation, system synthesis.

Сучасні виробничі системи все частіше набувають ознак просторово розподілених структур, у межах яких технологічні операції виконуються на різних ділянках, пов'язаних між собою матеріальними та інформаційними потоками. Така організація виробництва зумовлена необхідністю підвищення гнучкості, масштабованості та ефективності функціонування промислових підприємств. У цих умовах системи керування повинні забезпечувати узгоджену роботу окремих підсистем, що функціонують у різних точках простору та взаємодіють між собою через канали зв'язку і транспортні механізми. Однією з характерних особливостей таких систем є наявність транспортного запізнення, яке виникає внаслідок переміщення матеріальних об'єктів, передавання сигналів або обробки інформації.

Транспортне запізнення суттєво впливає на динамічні властивості систем керування, ускладнюючи процес формування керуючих впливів та знижуючи ефективність регулювання. На відміну від об'єктів без затримок, у яких реакція на керуючий сигнал є практично миттєвою, у розподілених системах спостерігається відставання між моментом подачі сигналу та отриманням відповідної реакції. Це призводить до виникнення додаткових фазових зсувів, що можуть негативно впливати на стійкість системи, викликати коливальні процеси або збільшувати час встановлення режиму. Особливо складною є ситуація, коли величина

запізнення є змінною і залежить від поточних умов функціонування, таких як швидкість транспортних потоків, завантаженість виробничих ліній або стан комунікаційних каналів.

На сучасних виробничих лініях транспортне запізнення проявляється у різних формах, зокрема при переміщенні сировини або продукції між окремими технологічними вузлами, а також при передаванні вимірювальної та керуючої інформації між елементами системи. Зростання рівня автоматизації та використання розподілених систем керування призводить до збільшення кількості таких затримок, що ускладнює процес синтезу ефективних алгоритмів керування. Традиційні методи, орієнтовані на об'єкти з незначними або постійними затримками, виявляються недостатньо ефективними у випадку складних розподілених систем, де запізнення має істотний вплив на поведінку об'єкта.

Актуальність дослідження процесу керування об'єктами з транспортним запізненням зумовлена необхідністю забезпечення стабільної та ефективної роботи сучасних виробничих комплексів. Урахування запізнення на етапі синтезу систем керування дозволяє підвищити точність регулювання, зменшити перехідні процеси та уникнути небажаних коливань, що сприятиме більш раціональному використанню ресурсів та підвищенню продуктивності виробництва. В умовах зростаючої складності технологічних процесів та інтеграції різних рівнів керування виникає потреба у розробці нових підходів, здатних ефективно враховувати транспортні запізнення та їх змінний характер.

Наявність транспортного запізнення у системах керування призводить до суттєвої зміни їх динамічних властивостей, що безпосередньо впливає на показники якості регулювання. Часова затримка між формуванням керуючого впливу та реакцією об'єкта фактично ускладнює процес оцінювання поточного стану системи, оскільки інформація, на основі якої приймаються рішення, вже не повністю відповідає реальним умовам. Це створює передумови для виникнення додаткових похибок і зниження ефективності керування, особливо у випадках швидкоплинних технологічних процесів. У замкнених контурах такі затримки проявляються у вигляді фазових зсувів, які можуть призводити до погіршення запасів стійкості та виникнення небажаних коливальних режимів.

Одним із основних наслідків наявності транспортного запізнення є зменшення швидкодії системи керування. Затримка у передаванні сигналів обмежує можливість оперативного реагування на зміни стану об'єкта, що призводить до збільшення часу перехідних процесів. У результаті система повільніше досягає встановленого режиму, а її реакція на зовнішні збурення стає менш ефективною. Особливо це проявляється у розподілених виробничих лініях, де затримки можуть накопичуватися внаслідок послідовного проходження матеріальних або інформаційних потоків через декілька технологічних вузлів.

Вплив запізнення на точність керування проявляється у вигляді збільшення статичних та динамічних похибок. Оскільки керуючі сигнали формуються на основі застарілої інформації, виникає відхилення між заданим та фактичним значенням регульованої величини, що може призводити до систематичних помилок, особливо у випадках змінних режимів роботи. Крім того, при значних затримках можливе виникнення перерегулювання, що негативно позначається на якості продукції або ефективності технологічного процесу.

Особливості поведінки систем із транспортним запізненням у замкнених контурах визначаються також характером зміни затримки у часі. Якщо запізнення є постійним, його вплив можна врахувати на етапі синтезу системи керування шляхом відповідного налаштування параметрів регулятора. Проте у реальних умовах величина запізнення часто є змінною і залежить від низки факторів, зокрема швидкості транспортних потоків, навантаження на виробничі лінії або стану комунікаційних каналів. У таких випадках система керування повинна функціонувати в умовах невизначеності, що ускладнює забезпечення її стійкості.

Наявність змінного запізнення може призводити до появи нестійких режимів роботи, навіть якщо система була налаштована на стабільне функціонування за номінальних умов. Це пов’язано з тим, що зміна затримки змінює ефективні параметри системи, впливаючи на її динамічні характеристики. У результаті можуть виникати автоколивання або значні відхилення регульованих величин. У складних розподілених системах такі ефекти можуть посилюватися за рахунок взаємодії між окремими підсистемами, що ускладнює їх аналіз та прогнозування.

Врахування транспортного запізнення на етапі синтезу систем керування зумовлює необхідність перегляду традиційних підходів до побудови регуляторів та вибору їх параметрів. На відміну від систем без затримок, де структура регулятора формується з орієнтацією на поточний стан об’єкта, у випадку наявності запізнення виникає потреба враховувати часовий інтервал між подачею керуючого сигналу та отриманням відповідної реакції. Це означає, що процес прийняття рішень має базуватися не лише на фактичних вимірюваннях, але й на прогнозуванні поведінки об’єкта у майбутньому. Такий підхід дозволяє частково компенсувати негативний вплив затримки та забезпечити більш узгоджене функціонування системи.

Однією з ключових особливостей синтезу регуляторів для об’єктів із запізненням є необхідність вибору адекватної структури керування, здатної забезпечити стійкість та прийнятну якість перехідних процесів. Для цього широко застосовуються модифіковані структури класичних регуляторів, які доповнюються елементами, що враховують часову затримку. Вибір структури визначається як характером самого запізнення, так і властивостями об’єкта керування. При цьому важливим є досягнення компромісу між складністю реалізації алгоритму та його ефективністю, оскільки надмірне ускладнення структури може призводити до зниження надійності системи та підвищення вимог до обчислювальних ресурсів.

Важливим етапом є налаштування параметрів регулятора, яке у випадку об’єктів із запізненням має свої специфічні особливості. Традиційні методи налаштування, орієнтовані на швидке досягнення заданого режиму, можуть виявитися неприйнятними через підвищену чутливість системи до коливань та ризик втрати стійкості. У зв’язку з цим застосовуються підходи, що передбачають більш обережне формування керуючих впливів, з урахуванням інерційності системи та можливих затримок у зворотному зв’язку. Це дозволяє зменшити амплітуду перехідних процесів і уникнути перерегулювання, яке є характерним для систем із запізненням. Також необхідно враховувати розподілений характер виробничих процесів, у межах яких окремі елементи системи можуть мати різні часові затримки. Це ускладнює синтез єдиного регулятора та потребує використання ієрархічних або децентралізованих підходів до керування. У таких системах регулятори можуть функціонувати на різних рівнях, забезпечуючи локальне керування окремими ділянками процесу та координацію їх взаємодії. Вибір параметрів у цьому випадку здійснюється з урахуванням як локальних, так і глобальних характеристик системи, що дозволяє досягти узгодженого функціонування всіх її компонентів.

При синтезі систем керування також необхідно враховувати можливу змінність транспортного запізнення, що вимагає підвищеної гнучкості регулятора. Це може досягатися шляхом використання алгоритмів, здатних адаптувати свої параметри залежно від поточних умов роботи. Це дозволить зберігти стабільність та ефективність керування навіть у випадках, коли характеристики запізнення змінюються у широких межах. У результаті забезпечується більш надійне функціонування системи в умовах невизначеності.

В розподілених системах керування транспортне запізнення розглядається як один із ключових факторів, що обмежує досягнення високої якості регулювання, тому значна увага приділяється методам його компенсації. Основна ідея таких підходів полягає у зменшенні негативного впливу затримок на динаміку системи шляхом модифікації структури керування

або корекції інформаційних сигналів, які використовуються для формування керуючих впливів. При цьому компенсація запізнення не передбачає його фізичного усунення, а спрямована на мінімізацію його впливу на стійкість, швидкодію та точність системи.

Одним із поширених напрямів є використання прогнозуючих підходів, які базуються на оцінюванні майбутнього стану об'єкта керування. У таких методах система керування формує сигнал не на основі поточних вимірювань, а з урахуванням прогнозованого значення вихідної змінної на момент надходження керуючого впливу, що дозволяє частково компенсувати часову затримку та зменшити розбіжність між бажаним і фактичним станом системи. Ефективність прогнозуючих методів значною мірою залежить від точності моделі об'єкта керування та здатності алгоритму адекватно відображати його динамічну поведінку.

Іншим важливим напрямом є корекція сигналів у контурі зворотного зв'язку. У цьому випадку використовуються спеціальні алгоритми, які враховують наявність затримки при обробці інформації та формуванні керуючих дій. Корекція може здійснюватися шляхом введення додаткових компенсуючих ланок, що змінюють фазові та амплітудні характеристики системи, або через модифікацію структури регулятора. Такий підхід дозволяє підвищити запас стійкості системи та зменшити чутливість до змін транспортного запізнення.

Важливу роль у компенсації транспортного запізнення відіграють також методи, що базуються на адаптації параметрів системи керування. У цьому випадку алгоритми автоматично змінюють налаштування регулятора залежно від поточної величини затримки, яка може змінюватися у часі. Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальні умови керування навіть у випадках нестабільних або непередбачуваних затримок, що є характерним для реальних виробничих систем. Також ефективним є використання комбінованих методів, які поєднують прогнозування, корекцію сигналів та адаптивне налаштування параметрів. Інтеграція різних підходів дозволяє досягти більш високого рівня компенсації запізнення та підвищити стійкість системи до зовнішніх і внутрішніх збурень. У таких системах забезпечується баланс між точністю керування та стійкістю, що є особливо важливим у складних розподілених виробничих середовищах.

Подальший розвиток систем керування з урахуванням транспортного запізнення у розподілених виробничих лініях безпосередньо пов'язаний із загальними тенденціями цифрової трансформації промисловості та переходом до інтелектуалізованих виробничих середовищ.

Таким чином, перспективи розвитку систем керування з урахуванням транспортного запізнення у виробничих лініях визначаються поєднанням удосконалення теоретичних методів синтезу та широкого впровадження сучасних цифрових технологій, що дозволяє підвищити ефективність, надійність та адаптивність систем керування, що є важливим для сучасних високотехнологічних виробничих середовищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарєва. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.

2. Кваско, М. З. Математичне моделювання та ідентифікація одно- і багатовимірних систем: навч. посіб. / М. З. Кваско, Л. Р. Ладієва,М. С. Піргач. – К.: НТУУ «КПІ», 2006, – 308с.

3. Içmez, Y.; Can, M.S. A New Smith Predictor Controller Design Based on the Coefficient Diagram Method for Time-Delay Systems. Electronics 2026, 15, 1290.

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. 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

8. Невлюдов, І., Євсєєв, В., Максимова, С., & Артюх, Р. (2025). Математична модель адаптивного ієрархічного високорівневого керування триланкового колаборативного робота-маніпулятора. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості, (2 (32)), 58-68.

9. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Remote monitoring system of patient status in social IoT environments using amazon web services technologies and smart health care. International Journal of Crowd Science, 9(2), 110-125.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

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. 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.

15. 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. https://doi.org/10.30837/978-617-8332-95-2

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