

МЕТОДИ КОМПЕНСАЦІЇ НЕВИЗНАЧЕНОГО ЗАПІЗНЕННЯ У ЗАМКНЕНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

С.О. Кравченко, Д.П. Ткачов

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: serhii.kravchenko@nure.ua, denys.tkachov@nure.ua

Анотація: У роботі розглянуто методи компенсації невизначеного запізнення у замкнених системах автоматичного керування. Проаналізовано вплив змінного запізнення на стійкість та динамічні характеристики системи. Досліджено підходи до ідентифікації та компенсації часових затримок у реальному часі. Розглянуто можливості використання адаптивних та предиктивних методів для зменшення негативного впливу запізнення.

Ключові слова: запізнення, система автоматичного керування, компенсація, замкнений контур, адаптивне керування, предиктивне керування.

METHODS FOR COMPENSATION OF UNCERTAIN DELAY IN CLOSED-LOOP AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

S. Kravchenko, D. Tkachov

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: serhii.kravchenko@nure.ua, denys.tkachov@nure.ua

Annotation: The paper considers methods for compensating uncertain delay in closed-loop automatic control systems. The impact of variable delay on system stability and dynamic performance is analyzed. Approaches to real-time identification and compensation of time delays are investigated. The use of adaptive and predictive methods to reduce the negative effects of delay is discussed.

Key words: delay, automatic control system, compensation, closed-loop system, adaptive control, predictive control.

У замкнених системах автоматичного керування наявність часових затримок є одним із ключових факторів, що визначає складність забезпечення стабільного та якісного функціонування технологічних процесів. В реальних умовах експлуатації запізнення виникає практично на всіх етапах обробки та передавання інформації, починаючи від вимірювання вихідних змінних і закінчуючи формуванням та реалізацією керуючих впливів. Особливу складність становить випадок невизначеного запізнення, коли його величина не є сталою і може змінюватися під впливом зовнішніх або внутрішніх факторів, що значно ускладнює аналіз і синтез систем керування, оскільки традиційні методи розрахунку базуються на припущенні про фіксовані або відомі затримки.

Функціонування замкнених систем за наявності часових затримок характеризується порушенням синхронності між станом об'єкта керування та реакцією системи. В результаті інформація, яка використовується для формування керуючого сигналу, вже не відповідає фактичному стану процесу на момент її застосування, що призводить до виникнення додаткових похибок та ускладнює досягнення заданих показників якості керування. Особливо критичним є вплив запізнення на динамічні характеристики системи, оскільки воно безпосередньо впливає на стійкість, швидкодію та точність регулювання.

Невизначене запізнення може проявлятися у вигляді змінної затримки, яка залежить від умов функціонування системи, навантаження на канали передавання даних або характеристик технологічного процесу. Така змінність робить систему більш чутливою до зовнішніх збурень і ускладнює забезпечення стабільності в широкому діапазоні режимів роботи. У деяких випадках навіть незначні коливання величини затримки можуть призводити до суттєвого погіршення якості керування або виникнення нестійких режимів.

Вплив невизначеного запізнення на якість керування проявляється у збільшенні часу перехідних процесів, виникненні коливань та зниженні точності відпрацювання заданих траєкторій. У замкнених системах це особливо небезпечно, оскільки негативний ефект запізнення накопичується у зворотному зв'язку, що може призводити до самопідсилення похибок. В результаті система втрачає здатність ефективно реагувати на зміни стану об'єкта, що негативно впливає на загальну ефективність технологічного процесу.

Актуальність даної теми зумовлена широким впровадженням складних автоматизованих систем у промисловості, енергетиці та інших галузях, де вимоги до точності та надійності керування постійно зростають. В таких умовах традиційні підходи до синтезу систем керування виявляються недостатніми, оскільки не враховують змінний характер затримок та їхній вплив на динаміку системи.

Наявність невизначеного запізнення у замкнених системах автоматичного керування суттєво змінює їхні динамічні властивості, впливаючи на всі основні показники якості регулювання. Одним із найбільш критичних наслідків є зниження стійкості системи, оскільки часові затримки в контурі зворотного зв'язку призводять до додаткових фазових зсувів, які можуть порушувати баланс між вхідними та вихідними сигналами. У випадку змінного запізнення цей ефект стає ще більш вираженим, оскільки система постійно перебуває в умовах неповної узгодженості між фактичним станом об'єкта та інформацією, що використовується для керування. Вплив запізнення на стійкість проявляється у зменшенні запасів стійкості системи, що підвищує її чутливість до зовнішніх збурень і внутрішніх коливань. При певних значеннях затримки може виникати перехід системи у нестійкий режим, що характеризується наростанням коливань або їх незгасанням у часі. Особливо небезпечними є ситуації, коли величина запізнення змінюється в процесі функціонування системи, оскільки це ускладнює прогнозування її поведінки та унеможливорює використання фіксованих налаштувань регулятора.

Швидкодія системи також зазнає суттєвого впливу в умовах невизначеного запізнення. Затримка у передачі інформації призводить до уповільнення реакції системи на зміну стану об'єкта, що збільшує час перехідних процесів. У результаті система повільніше досягає заданого режиму роботи, а її здатність швидко компенсувати зовнішні збурення знижується. При змінному характері запізнення цей ефект може мати нерівномірний характер, що додатково ускладнює аналіз динаміки системи. Точність регулювання також погіршується під впливом невизначеного запізнення. Оскільки керуючі сигнали формуються на основі застарілої інформації, виникає розбіжність між бажаним та фактичним станом об'єкта керування. Це призводить до появи як статичних, так і динамічних похибок, які можуть накопичуватися у процесі роботи системи. У замкнених контурах такі похибки мають тенденцію до самопідсилення, що ще більше знижує якість регулювання.

Особливості поведінки замкнених систем при варіації часу запізнення полягають у зміні характеру перехідних процесів та можливій появі нелінійних ефектів. Навіть незначні коливання величини затримки можуть призводити до суттєвих змін у динаміці системи, включаючи виникнення коливальних режимів або погіршення демпфування. Це свідчить про високу чутливість таких систем до параметрів запізнення та необхідність їх детального врахування при аналізі та синтезі керуючих алгоритмів. У складних автоматизованих

системах, де взаємодіє декілька контурів керування, вплив невизначеного запізнення може поширюватися між підсистемами, що призводить до виникнення комплексних динамічних ефектів. В таких умовах поведінка системи стає важко передбачуваною, а її аналіз потребує використання спеціалізованих методів дослідження, які враховують змінність параметрів у часі.

Методи ідентифікації часових затримок у системах автоматичного керування є важливою складовою забезпечення ефективного функціонування замкнених контурів в умовах невизначеного запізнення. Їх основне призначення полягає у визначенні поточної або оцінюванні змінної величини затримки, яка впливає на динаміку системи та якість регулювання. Оскільки у реальних умовах експлуатації затримка не є сталою та може змінюватися під впливом зовнішніх і внутрішніх факторів, виникає необхідність у використанні методів, здатних працювати в режимі реального часу та забезпечувати оперативне оновлення інформації про параметри системи. Одним із підходів до ідентифікації часових затримок є використання моделей об'єкта керування, які дозволяють порівнювати реальну поведінку системи з її математичним описом. В цьому випадку затримка оцінюється як параметр, що забезпечує найкращу відповідність між експериментальними даними та результатами моделювання. Такий підхід потребує наявності адекватної моделі об'єкта, яка достатньо точно відображає його динамічні властивості, однак при цьому дозволяє враховувати можливі відхилення у вигляді невизначеності параметрів.

Ще одним важливим напрямом є аналіз сигналів у часовій та частотній областях. В цьому випадку затримка визначається на основі дослідження взаємного зв'язку між вхідними та вихідними сигналами системи. Використання кореляційного аналізу дозволяє оцінити часовий зсув між сигналами, що відповідає величині запізнення. Такі методи є особливо ефективними в умовах наявності шумів та збурень, оскільки дозволяють виділити основні закономірності поведінки системи на фоні випадкових коливань.

В сучасних системах керування все більшого поширення набувають методи, які базуються на адаптивному оцінюванні параметрів у реальному часі. Такі підходи передбачають постійне оновлення оцінок затримки на основі поточної інформації про стан системи. Це дозволяє враховувати змінний характер запізнення та оперативно реагувати на його коливання. Адаптивні алгоритми зазвичай інтегруються у структуру системи керування, що забезпечує їх безперервну роботу без необхідності зовнішнього втручання. Особливу роль відіграють методи ідентифікації, засновані на використанні спостерігачів стану, які дозволяють оцінювати не лише вимірювані змінні, але й приховані параметри системи, включаючи часові затримки. Такі підходи забезпечують більш повне уявлення про динаміку об'єкта та дозволяють підвищити точність оцінювання в умовах обмеженої інформації. Вони є особливо ефективними у складних розподілених системах, де пряме вимірювання затримки може бути ускладненим або неможливим.

Важливою особливістю сучасних методів ідентифікації є їхня здатність працювати в умовах невизначеності та змінних параметрів, що досягається шляхом використання комбінованих підходів, які поєднують моделювання, статистичний аналіз та адаптивні алгоритми. Така інтеграція дозволяє підвищити стійкість оцінювання та зменшити вплив шумів і зовнішніх збурень на результати ідентифікації.

Методи компенсації запізнення на основі адаптивних та предиктивних підходів становлять один із найбільш ефективних напрямів підвищення якості керування у замкнених системах з невизначеними часовими затримками. Їх застосування дозволяє не лише зменшити негативний вплив запізнення, але й суттєво покращити динамічні характеристики системи за рахунок використання інформації про поточний та прогнозований стан об'єкта керування. В таких підходах ключовим є поєднання механізмів адаптації параметрів системи та прогнозування

майбутньої поведінки процесу, що забезпечує більш узгоджену реакцію на зміни в реальному часі. Адаптивні методи компенсації базуються на принципі безперервного коригування параметрів регулятора відповідно до поточних умов функціонування системи. У випадку наявності змінного запізнення це дозволяє враховувати його варіації та відповідно змінювати структуру або налаштування алгоритму керування. Адаптація може здійснюватися як на основі локальних вимірювань, так і з використанням оцінок стану системи, отриманих за допомогою спостерігачів або моделей. Це забезпечує підвищення стійкості системи та зменшення похибок регулювання, що виникають через затримки у зворотному зв'язку.

Предиктивні методи компенсації ґрунтуються на використанні прогнозування майбутнього стану об'єкта керування з урахуванням його динамічних властивостей. Основна ідея полягає у формуванні керуючих впливів з урахуванням не поточного, а прогнозованого стану системи на момент, коли ці впливи реально подіють на об'єкт, що дозволяє частково компенсувати часову затримку та зменшити розбіжність між заданими і фактичними значеннями вихідних змінних. Ефективність таких методів значною мірою залежить від точності моделі об'єкта та якості прогнозування.

В реальних системах керування часто використовується поєднання адаптивних та предиктивних підходів, що дозволяє отримати більш гнучкі та стійкі алгоритми компенсації. В таких комбінованих системах адаптивна складова забезпечує корекцію параметрів регулятора відповідно до змін умов функціонування, тоді як предиктивна складова відповідає за формування випереджаючих керуючих впливів, що дозволяє досягти більш високого рівня точності та швидкодії керування навіть за умов значних і змінних затримок. Важливим аспектом реалізації таких методів є забезпечення стабільності замкненого контуру. Оскільки введення прогнозування та адаптації змінює структуру системи, необхідно враховувати можливі ефекти переналаштування, які можуть впливати на її стійкість. Для цього використовуються спеціальні обмеження на швидкість адаптації та механізми згладжування керуючих сигналів, що дозволяє уникнути виникнення небажаних коливальних процесів.

Сучасні підходи також передбачають використання обчислювальних методів високої точності та алгоритмів оптимізації, які дозволяють підвищити ефективність компенсації запізнення в складних динамічних системах. Інтеграція таких методів у структуру систем керування забезпечує можливість їх застосування в умовах високої невизначеності та змінної структури об'єкта.

Перспективи розвитку методів компенсації запізнення у сучасних системах автоматичного керування тісно пов'язані з подальшим ускладненням технологічних процесів та зростанням вимог до їх точності, швидкодії та надійності. Умови функціонування сучасних виробничих і технічних систем характеризуються високою динамічністю, значною розподіленістю компонентів та наявністю багатьох каналів передавання інформації, що неминуче призводить до виникнення складних часових затримок. У зв'язку з цим розвиток методів компенсації запізнення набуває стратегічного значення для забезпечення ефективного керування.

Подальший розвиток цифрових технологій також створює нові можливості для вдосконалення методів компенсації запізнення. Використання розподілених обчислювальних систем, хмарних технологій та промислового Інтернету речей дозволяє забезпечити оперативний обмін даними між різними рівнями керування та підсистемами об'єкта. Це сприяє підвищенню точності оцінювання стану системи та забезпечує більш швидке реагування на зміни умов її функціонування.

ЛІТЕРАТУРА

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

2. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами: навч. посіб. / Сільвестров А. М., Островерхов М. Я., Шефер О. В., Ладік Н. А., Зіменков Д. К.; – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 386 с.
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. Feedback Control of Dynamic Systems. 9th Edition [Electronic resource] / J David Powell, Abbas F. Emami-Naeini, Christina M. Ivler. – Pearson, 2025. – 1046 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. Yevsieiev V. Development of a program for modeling the control of a mobile manipulation robot in the unity environment / V. Yevsieiev, N. Starodubcev // Science in Environment of Rapid Changes : proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Brussels, Belgium, February 6-8, 2023. - Brussels : De Boeck, 2023. - Scientific Collection «InterConf» . - № 141. - P. 331-334.
7. Gurin, D., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2024). MobileNetv2 Neural Network Model for Human Recognition and Identification in the Working Area of a Collaborative Robot. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 4(8), 5-12.
8. Проектування мобільних маніпуляційних роботів : монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв та ін. ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 427 с
9. 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.
10. 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.
11. 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.
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. 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.

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