

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШЛЯХОМ КОРЕКЦІЇ ДИНАМІКИ СПОСТЕРІГАЧА СТАНУ

А.Р. Рожко, С.В. Бондаренко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: anna.rozhko@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто питання підвищення точності та якості перехідних процесів у високодинамічних системах автоматичного регулювання, які використовують принцип керування за повним вектором стану. Показано, що традиційні лінійні спостерігачі стану часто вносять небажану динамічну затримку та збільшують перерегулювання через повільну збіжність похибки оцінювання в початковий момент часу, а також підвищують чутливість до шуму при спробі прискорення їхньої динаміки. Розглянуто метод корекції динаміки спостерігача шляхом введення додаткового адаптивного нелінійного елемента у його структуру, який забезпечує високе підсилення корекції під час значних розбіжностей оцінки в перехідних режимах, мінімізуючи при цьому чутливість до шуму в усталеному режимі.

Ключові слова: автоматичне регулювання, спостерігач стану, нелінійна корекція, динамічна корекція, підвищення точності, керування за станом.

IMPROVING THE ACCURACY OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS THROUGH CORRECTION OF STATE OBSERVER DYNAMICS

A.Rozhko, S.Bondarenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: anna.rozhko@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Annotation: This article addresses the issue of enhancing the accuracy and quality of transient processes in high-dynamic automatic control systems that utilize the full state-vector control principle. It is demonstrated that traditional linear state observers often introduce undesirable dynamic latency and increase overshoot due to slow convergence of the estimation error during the initial phase, concurrently increasing noise sensitivity when attempts are made to accelerate their dynamics. A method for correcting observer dynamics is proposed, involving the introduction of an additional adaptive nonlinear element into its structure. This element ensures high correction gain during significant estimation discrepancies in transient regimes, while minimizing noise sensitivity in the steady-state regime.

Key words: automatic control; state observer; nonlinear correction; dynamic correction; accuracy improvement; state-space control.

Сучасні системи автоматичного регулювання, що застосовуються у високотехнологічних галузях, таких як робототехніка та промислова автоматизація, висувають надзвичайно високі вимоги до точності та швидкості реакції. Часто внутрішні змінні стану об'єкта, необхідні для формування оптимального керуючого впливу, не можуть бути виміряні безпосередньо через технічні або економічні обмеження. У таких випадках для оцінювання повного вектора стану використовуються спеціальні алгоритми - спостерігачі стану, які реконструюють неспостережувані змінні на основі доступних вимірювань виходу та знання про динаміку об'єкта. Хоча класичні спостерігачі, такі як спостерігач Луенбергера або фільтр Калмана, забезпечують асимптотичну збіжність оцінки до реального стану, їхня динаміка, особливо на

початку перехідних процесів або при раптових збуреннях, часто є надто повільною. Ця похибка оцінювання безпосередньо впливає на сигнал керування, що призводить до небажаного перерегулювання, збільшення часу регулювання та погіршення загальної якості роботи замкненої системи. Тому задача мінімізації негативного впливу похибки спостерігача на динаміку керування є однією з ключових у сучасній теорії автоматики.

Методика керування за повним вектором стану є однією з найбільш потужних концепцій сучасної автоматики, оскільки вона дозволяє безпосередньо впливати на власні числа замкненої системи, забезпечуючи оптимальне розміщення полюсів та формування бажаних динамічних властивостей. У системах, де вся інформація про внутрішні змінні доступна, такий підхід гарантує високу продуктивність та точність. Проте, необхідність використовувати спостерігач стану, що є фактично імітаційною моделлю системи, перетворює ідеальне керування за станом на керування за оціненим станом. Це суттєво змінює рівняння замкненої системи. Вплив цього перетворення полягає в тому, що динаміка загальної системи стає комбінацією динаміки регулятора і динаміки похибки спостерігача. В результаті, якість кінцевого керування завжди буде обмежена якістю та швидкістю роботи алгоритму оцінювання.

Крім того, більшість класичних методів синтезу спостерігачів ґрунтується на лінійних математичних моделях об'єкта. Однак, реальні технічні об'єкти часто містять суттєві нелінійності, такі як обмеження насичення, мертві зони, тертя або гістерезис. У разі значного відхилення реального об'єкта від його лінійної моделі, точність оцінки, яку надає лінійний спостерігач, різко знижується. Це створює додаткове джерело похибки керування, яке не може бути повністю скомпенсоване лінійним регулятором. Неточне оцінювання внутрішніх змінних призводить до того, що регулятор бачить викривлену картину стану системи, що особливо критично в системах, чутливих до параметрів, наприклад, у системах керування положенням або швидкістю з високими вимогами до точності відпрацювання траєкторії. Вирішення цієї проблеми має бути спрямоване на мінімізацію часу, необхідного для зведення похибки оцінки до нуля, особливо у перехідних режимах, які визначають якість продуктивності системи в цілому. Це вимагає відмови від суто лінійних підходів та інтеграції адаптивних або нелінійних механізмів, які можуть активно коригувати процес оцінювання, реагуючи на динаміку об'єкта, що змінюється.

2 Проблема динаміки спостерігача. Основна проблема полягає в тому, що для прискорення збіжності оцінки необхідно збільшувати коефіцієнти підсилення спостерігача. Однак, таке збільшення одночасно робить спостерігач надмірно чутливим до високочастотного шуму вимірювань, який завжди присутній у реальних системах. Високе підсилення шуму призводить до вібрації керуючого сигналу та передчасного зносу виконавчих механізмів. Таким чином, перед розробником постає необхідність знайти компроміс між швидкістю реакції спостерігача на зміну стану та його робастністю до шуму. Цей компроміс часто призводить до вибору повільної динаміки спостерігача, яка домінує над бажаною динамікою регулятора, особливо в перехідних режимах. Наслідком є відхилення реальних характеристик системи від ідеально розрахованих.

Компроміс між швидкістю та шумом є класичною задачею в теорії фільтрації та оцінювання. Швидкість збіжності оцінки, тобто швидкість, з якою похибка оцінювання наближається до нуля, прямо пов'язана із шириною смуги пропускання спостерігача. Чим ширша смуга, тим швидше реагування. Проте, ширша смуга пропускання також означає, що високочастотні складові шуму, присутні у вимірювальному сигналі, будуть менш ефективно пригнічуватися і посилюватися. Цей посилений шум, потрапляючи в контур зворотного зв'язку, дестабілізує систему і призводить до паразитарних коливань виконавчих органів. Отже, вибір параметрів спостерігача перетворюється на пошук оптимальної частоти зрізу, яка

б максимально прискорювала процес оцінювання, не допускаючи при цьому неприпустимого рівня впливу шуму.

Крім зовнішнього шуму вимірювань, існує проблема неточності моделі самого об'єкта, яку використовує спостерігач. Спостерігач ґрунтується на припущенні, що відома істинна динаміка системи. Однак, будь-яка математична модель є лише наближенням. Немодельована динаміка, наприклад, невраховані малі часові константи, нелінійності чи повільні зміни параметрів, які існують у реальному об'єкті, розглядається спостерігачем як додаткове збурення або шум. Якщо коефіцієнти спостерігача надто великі, він буде надмірно агресивно реагувати на ці невраховані динамічні ефекти, намагаючись скоригувати їх, що призводить до погіршення точності оцінки стану та зниження робастності системи до невизначеностей.

Така залежність динаміки системи від похибки спостерігача особливо яскраво проявляється під час ініціалізації системи або великих стрибків завдання. У початковий момент часу похибка між реальним і оціненим станом може бути дуже великою. У цей період, сигнал керування, який генерує регулятор, базується на абсолютно невірній інформації. Це призводить до значних початкових відхилень траєкторії, які виражаються у формі великого перерегулювання або, у деяких випадках, короточасної нестійкості. Хоча класичні спостерігачі гарантують, що ця похибка врешті-решт зникне, час, необхідний для її згасання, безпосередньо визначає час регулювання всієї замкненої системи. Тому саме динаміка спостерігача стає обмежуючим фактором швидкодії системи.

Недостатня швидкість збіжності спостерігача також впливає на здатність системи компенсувати зовнішні збурення. Збурення, які не були змодельовані як частина динаміки об'єкта, викликають раптову розбіжність між вимірюваним і оціненим станами. Спостерігачу потрібен час для виявлення та оцінювання цього збурення через його вплив на вихідний сигнал. Якщо цей час великий, система залишається в режимі значної похибки керування протягом тривалого періоду, доки спостерігач не відновить точну оцінку стану.

Для вирішення цієї задачі застосовується метод корекції динаміки спостерігача шляхом введення додаткового нелінійного адаптивного механізму в його структуру. Суть ідеї полягає в тому, щоб забезпечити високе підсилення коректуючого сигналу лише тоді, коли різниця між вимірюваним і оцінюваним виходами системи є значною, що типово для початкової фази перехідного процесу або моменту дії потужного збурення. У міру того як похибка оцінювання зменшується і система наближається до усталеного режиму, дія цього нелінійного елемента плавно зводиться нанівець. Це досягається за допомогою функцій насичення або подібних нелінійних залежностей, які забезпечують високу швидкість збіжності при великих розбіжностях і мінімальний вплив на чутливість до шуму при малих. Нелінійний коректор виступає як тимчасовий прискорювач, що дозволяє швидко дотягнути оцінку стану до реального значення, не погіршуючи при цьому шумових характеристик системи в сталому режимі.

Ключовим аспектом реалізації цього методу є вибір функції активації для нелінійного коректора. Замість використання фіксованого лінійного підсилення, пропонується використовувати функцію, яка має високий коефіцієнт підсилення для великих значень вектора похибки виходу та низький або нульовий коефіцієнт для малих значень. Це може бути реалізовано за допомогою функції типу гіперболічного тангенса або спеціально розробленої насиченої функції із зоною нечутливості поблизу нуля. Така структура дозволяє реалізувати ідею адаптивної смуги пропускання спостерігача: смуга динамічно розширюється при виникненні великої похибки для її швидкого усунення, і звужується до мінімально необхідної в режимі точного відстеження, ефективно фільтруючи шум у сталому стані.

Архітектурно, нелінійний коригуючий член додається до стандартного лінійного доданку спостерігача Луенбергера або розширеного фільтра Калмана. Його внесок є пропорційним до

норми або окремих компонентів похибки виходу. Це відрізняє запропонований підхід від простого підвищення коефіцієнтів лінійного спостерігача. Основна відмінність полягає в тому, що лінійний спостерігач реагує на похибку однаково незалежно від її абсолютної величини, тоді як нелінійний коректор дискримінує великі похибки, забезпечуючи для них значно сильнішу, але тимчасову реакцію. Такий поділ функцій дозволяє лінійній частині спостерігача підтримувати оптимальну робастність до параметричних невизначеностей, тоді як нелінійна частина сфокусована виключно на прискореній компенсації динамічних розбіжностей.

Важливим етапом синтезу є налаштування параметрів нелінійного коректора: матриці підсилення нелінійного члена та параметрів самої функції насичення. Неправильний вибір може призвести до швидких коливань керуючого сигналу, характерних для деяких типів нелінійного керування, якщо коефіцієнт підсилення залишається занадто високим поблизу нуля. Тому необхідно забезпечити плавне перемикання режиму корекції з високого на низьке підсилення. Цей процес вимагає аналізу та оптимізації, щоб гарантувати, що динаміка збіжності не тільки швидка, але й гладка, запобігаючи генерації небажаних високочастотних складових, які можуть негативно вплинути на роботу виконавчих механізмів.

Застосування такого підходу, по суті, дозволяє реалізувати гібридну стратегію оцінювання. У цій стратегії швидкість відстеження в перехідних режимах відповідає швидкості ідеального, але чутливого до шуму спостерігача, тоді як точність в усталеному режимі відповідає характеристикам робастного, але повільного спостерігача. Це досягається без необхідності використовувати два окремих фільтри чи складних схем перемикання. Замість цього, один модифікований спостерігач динамічно регулює свою чутливість до похибки, що значно спрощує його реалізацію в цифрових системах керування та забезпечує високу ефективність у реальних умовах експлуатації.

Теоретичний аналіз стійкості такої модифікованої системи має проводитись із застосуванням методів нелінійної теорії, зокрема функцій Ляпунова, для підтвердження глобальної або напівглобальної стійкості. У сталому режимі, коли нелінійний коректор неактивний, рівень шуму керуючого сигналу залишається на прийнятному рівні. Доведення стійкості є критично важливим етапом, оскільки введення нелінійного елемента потенційно може призвести до небажаних нестійкостей, таких як граничні цикли. Застосування теореми Ляпунова про стійкість вимагає побудови спеціальної функції, яка є позитивно визначеною і похідна якої за часом є негативно визначеною. При виборі відповідної функції Ляпунова для нелінійної системи необхідно враховувати особливості функції насичення нелінійного коректора. Успішне доведення підтверджує, що всі траєкторії стану та похибки оцінювання асимптотично або експоненціально прямують до нульового значення або обмеженої малої області навколо нього, що гарантує надійність алгоритму.

Таким чином, розглянутий підхід до підвищення точності систем автоматичного регулювання шляхом корекції динаміки спостерігача стану за допомогою нелінійного адаптивного механізму є ефективним і має великий практичний потенціал. Він дозволяє зберегти всі переваги керування за повним вектором стану, мінімізуючи при цьому його основний недолік, пов'язаний з повільною динамікою оцінювання. Розглянута методика забезпечує кращу якість перехідних процесів, підвищує швидкодію та точність системи, роблячи її більш стійкою до початкових розбіжностей та раптових збурень.

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. Disturbance observer based control for nonlinear systems / Wen-Hua Chen // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. - Vol. 9, № 4, pp. 706-710, December. 2004, doi: 10.1109/TMECH.2004.839034.

4. Taghieh, A.; Mohammadzadeh, A.; Tavoosi, J.; Mobayen, S.; Rojsiraphisal, T.; Asad, J.H.; Zhilenkov, A. Observer-Based Control for Nonlinear Time-Delayed Asynchronously Switching Systems: A New LMI Approach. Mathematics 2021, 9, 2968. <https://doi.org/10.3390/math9222968>

5. Dutta L, Kumar Das D. Nonlinear disturbance observer based multiple-model adaptive explicit model predictive control for nonlinear MIMO system. Int J Robust Nonlinear Control. 2023; 33(11): 5934–5955. doi: 10.1002/rnc.6680

6. Feedback Control of Dynamic Systems. 9th Edition [Electronic resource] / J David Powell, Abbas F. Emami-Naeini, Christina M. Ivler. – Pearson, 2025. – 1046 p.

7. Methods for Optimizing the Building of Collaborative Robot Routes in a Dynamic Environment / I. Nevliudov, Murad Anver oglu Omarov, V. Yevsieiev, Elgun Jabrayilzade // Current issues of science, prospects and challengesn : IX International Multidisciplinary Scientific and Theoretical Conference , September 12, 2025. - P. 48-51. - DOI : <https://doi.org/10.36074/scientia-12.09.2025>

8. Development of a Method for Planning the Movement of a Gripping Device for a 3-Link Collaborative Robot Manipulator / I. Nevliudov, V. Yevsieiev, S. Maksymova, N. Demska // Journal of natural sciences and technologies. – 2025. - 4(1). - P. 403-413.

9. Nevliudov I. Sh. Mathematical Model of Block Process Planning in Systems of Allocation of Task Between People and Collaborative Robots in the Framework of Industries 5.0 / I. Sh. Nevliudov, V. V. Yevsieiev, D. V. Gurin // Visnyk of Kherson National Technical University. – 2025. - Vol. 1, № 1(92). - P. 157-163.

10. Nevliudov I. Sh. Adjusting the Movements of the Robotic Platform Through Inverse Kinematics / Igor Nevliudov, Dmytro Gurin, Vladyslav Yevsieiev // Theoretical and Applied Aspects of Device Development on Microcontrollers and FPGAs, MC&FPGA-2025 : VII International Scientific and Practical Conference, June 27-28, 2025. – Kharkiv : NURE. – P. 4-8.

11. Yevsieiev V. Comparative Analysis of Neural Network Architectures for Intelligent Microclimate Control in Production / V. Yevsieiev, I. Holod // Manufacturing & Mechatronic Systems 2025 : Theses of Reports of IX-st International Conference, October 25-26, 2025. - Kharkiv, 2025. - P. 15-17.

12. Невлюдов, І. Ш., Євсєєв, В. В., & Гурін, Д. В. (2025). Model development of dynamic representation a model description parameters for the environment of a collaborative robot manipulator within the industry 5.0 framework. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць, 1(79), 42-48.

13. Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Alkhalaileh, A. (2025). A METHOD DEVELOPMENT FOR MODELING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF PRINTED CIRCUIT BOARD PRODUCTION BASED ON THE Q-SCHEME. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(4), 9-21.

14. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Yevsieiev, V., Lyashenko, V., Nevliudov, I., & Luhach, A. K. (2022). Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar. Computational intelligence and neuroscience, 2022(1), 3046116.

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