

ВПЛИВ НЕЛІНІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ НА ДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТА МЕТОДИ ЇХ КОМПЕНСАЦІЇ

О.А. Коваленко, С.В. Бондаренко

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: oleh.kovalenko@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Анотація: У статті розглядається вплив нелінійних характеристик виконавчих механізмів на динамічні властивості систем автоматичного регулювання. До таких нелінійностей належать зони нечутливості, люфти, насичення та сухе тертя, які зумовлюють погіршення точності, збільшення часу перехідних процесів та можливість виникнення автоколивань. Проаналізовано основні прояви цих нелінійностей, їх роль у зміні якості регулювання та методи компенсації негативного впливу, що ґрунтуються на корекції зворотних зв'язків, використанні елементів із змінною структурою та застосуванні лінеаризації за зворотним зв'язком.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, виконавчий механізм, нелінійна характеристика, зона нечутливості, люфт, насичення, компенсація, якість, корекція.

INFLUENCE OF NONLINEAR CHARACTERISTICS OF ACTUATING MECHANISMS ON THE DYNAMIC PROPERTIES OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS AND METHODS OF THEIR COMPENSATION

O. Kovalenko, S. Bondarenko

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: oleh.kovalenko@nure.ua, serhii.bondarenko@nure.ua

Annotation: The article examines the influence of nonlinear characteristics of actuating mechanisms on the dynamic properties of automatic control systems. Such nonlinearities include dead zones, backlash, saturation, and dry friction, which lead to a decrease in control accuracy, an increase in transition time, and the possibility of self-oscillations. The main manifestations of these nonlinearities, their role in altering control quality, and methods for compensating their negative effects are analyzed. The considered compensation approaches are based on feedback correction, the use of variable-structure elements, and feedback linearization techniques.

Key words: automatic control system, actuating mechanism, nonlinear characteristic, dead zone, backlash, saturation, compensation, control quality, correction.

Системи автоматичного регулювання широко застосовуються у промисловості, транспорті, енергетиці, приладобудуванні та інших галузях, де необхідно забезпечити стабільне та точне керування технологічними процесами. Якість їх функціонування визначається не тільки вибором закону керування, але й реальними властивостями технічних елементів, що входять до складу системи. Одним із ключових компонентів таких систем є виконавчі механізми, які перетворюють сигнал регулятора у фізичний вплив на об'єкт керування, і саме на цьому етапі часто виникають явища, що ускладнюють або спотворюють процес регулювання.

На практиці виконавчі механізми рідко мають ідеально лінійну характеристику. У більшості випадків вони характеризуються низкою нелінійних властивостей, які не враховуються під час побудови спрощених математичних моделей. До них належать зони

нечутливості, люфти в кінематичних передачах, обмеження швидкості переміщення, насичення потужності, а також явища сухого тертя та гістерезису в приводах. Ці ефекти зумовлені фізичною природою матеріалів, механічними зазорами, технологічними допусками та експлуатаційним зносом обладнання.

Наявність нелінійностей у виконавчих ланках може суттєво змінити динаміку системи регулювання навіть за правильно налаштованого регулятора. Такі системи можуть показувати повільніші перехідні процеси, виникнення залишкової похибки встановлення, нерівномірність переміщень або навіть нестабільність. У деяких випадках нелінійності призводять до появи автоколивань або малих обмежених циклів, які не залежать від зовнішніх збурень і спричинені внутрішніми властивостями привода. Вплив нелінійностей стає особливо критичним для систем, що працюють у широкому діапазоні режимів. Якщо регулятор налаштований лише для невеликої області близько до робочої точки, то він не враховує зміну поведінки привода при малих або максимальних сигналах керування. В такому випадку система може бути стабільною у номінальному режимі, але нестійкою або неточною при наявності зовнішніх збурень, перевантаження чи швидких перехідних впливів.

Під час моделювання та експериментального визначення характеристик система перебуває в умовах, де нелінійності проявляються незначно, тому отримана модель виглядає лінійною та простою. В реальних умовах експлуатації, коли система працює з більшими амплітудами сигналів або в умовах зниженого ресурсу механізмів, поведінка виявляється відмінною від очікуваної. У зв'язку з цим одним із важливих напрямів розвитку сучасної теорії та практики автоматичного керування є аналіз впливу нелінійних характеристик виконавчих механізмів і розробка методів їх компенсації. Ефективні підходи до врахування нелінійностей дозволяють не лише покращити точність регулювання, але й забезпечити передбачуваність поведінки системи в умовах змінного навантаження, тривалого використання та дії зовнішніх факторів, що є важливим для забезпечення стабільності та безпеки в технічних системах різного призначення.

Одним із найпоширеніших видів нелінійностей у виконавчих механізмах є мертва зона. Вона проявляється тоді, коли невеликі зміни керуючого сигналу не спричиняють ніякої реакції механізму через механічні зазори або еластичність елементів передачі. Такий ефект особливо помітний у сервоприводах, гідравлічних клапанах та електроприводах із редукторами. Наявність мертвої зони спричиняє виникнення залишкової похибки, а також може призводити до циклічного перерегулювання при намаганні регулятора компенсувати цю нечутливість. Іншим важливим нелінійним фактором є насичення виконавчого механізму, коли керуючий сигнал досягає фізичних або енергетичних обмежень привода. У режимі насичення механізм не може збільшувати вихідний вплив пропорційно зростанню сигналу, що різко знижує маневреність і швидкодію системи. Особливо критичним це стає у високошвидкісних або аварійних режимах, коли від системи вимагається максимально швидка реакція. Насичення також часто спричиняє затримки або інерційність відновлення керування після виходу із граничного режиму.

Нерідко у виконавчих механізмах спостерігається люфт, зумовлений механічними зазорами між зубчастими передачами, шарнірами або тросовими приводами. Цей ефект проявляється у вигляді проміжку, в якому зворотний рух не передається на вихід механізму. Люфт призводить до ривків, неможливості точно відтворювати малорухомі сигнали та появи автоколивань у замкненій системі. Для виробничих і роботизованих систем люфт стає серйозним джерелом погіршення точності позиціонування та стабілізації. До значущих нелінійних проявів також належить сухе тертя, яке створює ефект прилипання та зісковзування під час руху елементів привода. У таких умовах рух відбувається не плавно, а стрибкоподібно, що негативно впливає на рівномірність регулювання і може викликати

механічні вібрації. При низьких швидкостях сухе тертя стає домінуючим фактором, зменшуючи точність керування навіть при високій роздільній здатності сигналу.

Гістерезис проявляється в тих системах, де реакція залежить не лише від поточного значення вхідного сигналу, але й від історії його зміни. Гістерезис зустрічається, зокрема, у магнітних та гідравлічних виконавчих пристроях, а також у матеріалах із пам'яттю форми. Наявність гістерезису ускладнює процес ідентифікації та моделювання системи, а також потребує спеціальних підходів до побудови коригуючих алгоритмів керування, здатних передбачити його вплив.

Розглянемо вплив цих нелінійностей на динамічні властивості системи. Наявність мертвої зони у виконавчому механізмі призводить до зниження точності регулювання та появи статичних похибок. Навіть при правильно налаштованому регуляторі система не здатна повністю компенсувати відхилення, що залишаються в межах нечутливості привода, що змушує систему працювати в режимі перерегулювання або підсилення керуючого сигналу, що створює додаткові коливання та порушення стабільності. У випадках прецизійного керування мертва зона є критичним фактором, який може повністю зруйнувати необхідну точність позиціонування.

Ефект насичення призводить до суттєвих нелінійних спотворень перехідного процесу. У режимах, коли потрібна висока швидкість, система виявляється не здатною забезпечити потрібний розгін або гальмування, оскільки вихід виконавчого механізму обмежений максимальними значеннями. Це призводить до затягування часу регулювання, появи фазових затримок і збільшення коливань у замкненому контурі. Крім того, при виході із режиму насичення спостерігається «інерційність» відновлення керування, що призводить до зривання системи з оптимальної траєкторії керування. Люфт створює ефект запізненого та ривкового відгуку системи. У замкнених системах регулювання це часто призводить до самозбуджених автоколивань, навіть якщо сама система була синтезована як стійка в лінійному наближенні. Внаслідок люфту керуючий сигнал втрачає безперервний характер впливу, і замість плавної компенсації відхилень спостерігається чергування фаз накопичення і різкого відновлення руху, що погіршує як точність стабілізації, так і плавність керування, що особливо критично в системах з високою частотою корекції.

Сухе тертя робить перехідний процес нерівномірним та потенційно нестійким на малих швидкостях. З точки зору системної динаміки це означає появу додаткової енергії коливань, яку регулятор повинен компенсувати, витрачаючи додаткові ресурси. У результаті система може працювати з підвищеним енергоспоживанням, більшою шумовою активністю і меншим ресурсом механічних елементів. Гістерезис у виконавчих механізмах ускладнює передбачуваність реакції системи на зміну керуючого сигналу. Оскільки відгук залежить від попередніх станів, стандартні методи синтезу регуляторів, що базуються на статичній характеристиці, стають недостатніми. Це призводить до погіршення точності регулювання в умовах змінних режимів роботи. У контурі зворотного зв'язку гістерезис проявляється як додаткове джерело фазової затримки, що може зменшувати запас стійкості та підвищувати ризик виникнення коливань у системі.

Для дослідження впливу нелінійних елементів на динаміку системи необхідно мати математичні моделі, що адекватно відображають їх поведінку. Найпростішим підходом є використання апроксимаційних моделей, де нелінійність замінюється еквівалентною лінійною ділянкою залежно від режиму роботи. Це дозволяє застосовувати класичні методи аналізу стійкості, але обмежує точність опису. Такий підхід застосовується на етапі попереднього аналізу, коли важливо визначити загальний вплив нелінійності і з'ясувати, чи потребує система спеціальних засобів компенсації. Більш точним методом моделювання є використання сегментно-лінійних апроксимацій. У цьому випадку характеристика виконавчого механізму

розбивається на кілька діапазонів, кожному з яких відповідає своя лінійна модель, що дозволяє відтворити властивості мертвої зони, люфту, насичення або гістерезису з достатньою точністю для подальшого аналізу.

У випадках, коли необхідно отримати максимально реалістичну модель, застосовуються фізичні або феноменологічні моделі, що будуються з урахуванням конкретної механічної або електромеханічної структури привода. Наприклад, при моделюванні сухого тертя враховується залежність сили тертя від швидкості руху, температури та ступеня зносу поверхонь. Такі моделі дозволяють відтворювати складні перехідні режими, включаючи ефекти прилипання і зісковзування, але потребують значно більших обчислювальних ресурсів і часто є складними для алгоритмізації в регуляторах реального часу.

Важливе місце займають методи ідентифікації нелінійностей за експериментальними даними. Вони використовуються тоді, коли теоретичні характеристики виконавчого механізму невідомі або істотно змінюються в процесі експлуатації. Ідентифікація дозволяє зафіксувати реальні параметри системи та адаптувати модель під конкретний об'єкт керування. Такий підхід забезпечує вищу відповідність моделі реальній динаміці привода та підвищує точність прогнозування його реакції на керуючі сигнали. Для складних або змінних у часі нелінійностей ефективним є застосування методів спостерігачів параметрів або адаптивної фільтрації. Вони дають змогу оцінювати внутрішні стани і параметри виконавчих механізмів у реальному часі, навіть коли напряму їх виміряти неможливо.

Компенсація нелінійних характеристик виконавчих механізмів є важливим завданням при забезпеченні стабільності та точності систем автоматичного регулювання. Одним із найбільш поширених підходів є включення коригувальних елементів у зворотний зв'язок, які мають протилежну за формою характеристику до наявної нелінійності. Такий спосіб дозволяє зменшити вплив мертвої зони, люфту або насичення, однак вимагає точного знання параметрів цих викривлень. Недоліком цього методу є чутливість до змін у часі, наприклад до зносу механічних вузлів. Ефективним підходом також є використання лінеаризації за зворотним зв'язком, що передбачає перетворення нелінійної системи на еквівалентну лінійну шляхом введення додаткового керуючого сигналу, який нівелює ефект нелінійності на виході виконавчого механізму.

Для компенсації гістерезису і сухого тертя ефективно використовуються спеціалізовані компенсаційні моделі з попереднім передбаченням майбутнього стану механізму. Суть цих методів полягає в корекції керуючого сигналу до того, як система увійде в область нелінійної реакції. Це дозволяє запобігти характерним коливанням і стрибкам вихідної величини, які часто виникають при переході між ділянками різної жорсткості характеристики. Такий підхід особливо корисний для точних сервоприводів, де навіть незначні відхилення можуть призвести до кумулятивних помилок. Адаптивні методи компенсації дозволяють системі автоматично змінювати свої параметри у процесі роботи залежно від характеру нелінійності.

Практична реалізація компенсаційних алгоритмів у промислових системах часто супроводжується ситуаційними обмеженнями, такими як обмежена розрядність сигналів, затримки вимірювання або шум у датчиках. Тому під час розробки компенсаторів особливу увагу приділяють роботі у реальних умовах експлуатації, і в багатьох випадках застосовують гібридні методи, які поєднують моделювання, адаптацію і фільтрацію сигналів, що дозволяє забезпечити баланс між точністю та надійністю.

Таким чином, вибір методу компенсації нелінійностей визначається характером виконавчого механізму, вимогами до точності регулювання та умовами експлуатації. Для систем з високими вимогами до точності зазвичай використовуються адаптивні або прогнозуючі методи компенсації, а у системах де важливі проста реалізація і висока надійність, перевага надається лінеаризаційним або сегментно-коригувальним методам.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Feedback Control of Dynamic Systems. 9th Edition / J David Powell, Abbas F. Emami-Naeini, Christina M. Ivler. – Pearson, 2025. – 1046 p.
3. Системи автоматичного керування технологічними комплексами: підручник / А. М. Сільвестров, М. Я. Островерхов, О. В. Шефер, Н. А. Ладік, Д. К. Зіменков. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 538 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/73320>.
4. Теорія автоматичного керування: навчальний посібник / П. В. Леонтєв та ін.; за заг. ред. П. В. Леонтєва. – Суми: Сумський державний університет, 2024. – 296 с.
5. Control in System Dynamics: Comparative Analysis of Feedback Strategies / Alain Oustaloup. – John Wiley and Sons Ltd, 2024. – 464 p.
6. НЕВЛЮДОВ, І., ЄВСЄВ, В., & ГУРІН, Д. (2025). МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО ПРОЦЕСНОГО ПЛАНУВАННЯ В СИСТЕМАХ АЛОКАЦІЇ ЗАВДАНЬ МІЖ ЛЮДЬМИ ТА КАЛАБОРАТИВНИМИ РОБОТАМИ В РАМКАХ ІНДУСТРІЙ 5.0. Вісник Херсонського національного технічного університету, 1(1 (92)), 157-163.
7. Невлюдов, І., Євсєв, 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.
8. Demska, N., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Ababneh, J. (2025). DECISION-MAKING MODEL FOR CONTROLLING A COLLABORATIVE ROBOT-MANIPULATOR BASED ON THE SENSOR FUSION METHOD AND CNN APPROACH TO RULE FORMATION. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(6), 846-859.
9. Yevsieiev, V., Maksymova, S., Abu-Jassar, A., & Ababneh, J. (2025). MATHEMATICAL MODEL OF LOCAL DECISION-MAKING FOR COLLABORATIVE ROBOTS USING EDGE COMPUTING. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(6), 34-46.
10. Yevsieiev, V., Ababneh, J., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR SIMULATING A DECENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR COLLABORATIVE ROBOT NETWORKS. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(5), 1187-1202.
11. 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.
12. Yevsieiev, V., Hamdan, M., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). A human-centric approach to control collaborative robots within Industry 5.0. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(5), 351-361.
13. Maksymova, S., Hamdan, M., Yevsieiev, V., & Abu-Jassar, A. (2025). A Mathematical Model Development for an Automated Control System for Packaging and Sorting Products Closed Area. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(5), 149-164.
14. Chala, O., Yevsieiev, V., Maksymova, S., & Abu-Jassar, A. (2025). Using the Human Face Recognition Method Based on the MobileNetV2 Neural Network in Authentication Systems. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(3), 882-895.
15. Yevsieiev, V., & Starodubcev, N. (2023). Development of a control algorithm for a small-sized mobile manipulation robot. Scientific Collection «InterConf», (140), 648-651.

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