

ЗАСТОСУВАННЯ ПРИНЦИПУ ІНВАРІАНТНОСТІ ДЛЯ КОМПЕНСАЦІЇ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

С.О. Кравченко, Д.С. Кобець

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

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

Анотація: У статті розглянуто застосування принципу інваріантності для компенсації зовнішніх збурень у системах автоматичного регулювання, який дозволяє зменшити або повністю усунути вплив дестабілізуючих факторів на роботу системи, забезпечуючи збереження заданих характеристик якості незалежно від змін зовнішнього середовища. Розглянуто основні підходи до побудови інваріантних структур керування та показано роль зворотних зв'язків і коригувальних ланок у досягненні стійкості. Висвітлено типові області застосування інваріантного керування та наведено аналіз ефективності методів компенсації збурень у технічних системах різного призначення.

Ключові слова: система автоматичного регулювання, інваріантність, компенсація збурень, стійкість, зворотний зв'язок, коригувальна ланка, робастність.

APPLICATION OF THE INVARIANCE PRINCIPLE FOR EXTERNAL DISTURBANCE COMPENSATION IN AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

S. Kravchenko, D. Kobets

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

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

Annotation: This article examines the application of the invariance principle for external disturbance compensation in automatic control systems. The principle allows for reducing or completely eliminating the influence of destabilizing factors on system performance, thus ensuring that specified quality characteristics are maintained regardless of changes in the external environment. The core approaches to building invariant control structures are considered, and the role of feedback loops and corrective links in achieving stability is demonstrated. Typical application areas of invariant control are highlighted, and an analysis of the effectiveness of disturbance compensation methods in technical systems of various purposes is provided.

Key words: automatic control system, invariance, disturbance compensation, stability, feedback, corrective link, robustness.

У сучасних системах автоматичного регулювання проблема впливу зовнішніх збурень залишається однією з ключових, оскільки реальні технічні об'єкти рідко функціонують у стабільних і передбачуваних умовах. Навіть незначні зміни навантаження, температури, властивостей середовища або механічних параметрів можуть суттєво змінити поведінку системи, погіршуючи її точність, швидкодію чи стабільність. Саме тому виникає потреба у використанні таких методів побудови систем керування, які дозволяють мінімізувати або повністю компенсувати вплив дестабілізуючих факторів.

Принцип інваріантності розглядається як підхід, що забезпечує відносну незалежність вихідної величини системи від зовнішніх впливів певного класу. Його сутність полягає у такій організації структури та сигналів керування, за якої вплив збурення або компенсується, або не проходить через динамічні ланки регулюючого контуру. Фактично це означає, що система

здатна підтримувати задану траєкторію або значення параметра навіть тоді, коли умови її роботи істотно змінюються.

Інваріантність має як теоретичне, так і прикладне значення. Теоретично вона дозволяє формально описати умови, за яких вихідна змінна не залежить від певного збурення, а отже, визначити необхідні структурні або параметричні вимоги до системи. З прикладної точки зору принцип інваріантності є основою для побудови регуляторів у відповідальних і високоточних системах, де неприпустимі навіть короткочасні відхилення керованих величин.

Актуальність цього підходу особливо зростає з переходом до автоматизованих та інтелектуалізованих комплексів управління. Сучасні системи працюють з великою кількістю сенсорних, виконавчих та обчислювальних компонентів, що робить їх чутливими до завад і невизначеностей. Для роботизованих систем, мобільних платформ, енергетичних установок та промислового обладнання забезпечення інваріантності означає не лише підвищення точності, але й гарантування надійності та безпечності роботи.

Крім того, принцип інваріантності тісно пов'язаний із концепціями робастного та адаптивного керування. Хоча ці напрями мають різний підхід до врахування невизначеностей, вони переслідують спільну ціль - збереження бажаної якості управління. Інваріантність дозволяє знизити чутливість системи до зовнішніх впливів, тоді як адаптивні методи дозволяють враховувати зміни параметрів у часі. У поєднанні ці підходи забезпечують високий рівень автономності регулюючих систем, що дозволяє значною мірою підвищити якість керування, забезпечуючи стійкість вихідних характеристик при наявності дестабілізуючих впливів різної природи.

У науково-технічній літературі принцип інваріантності розглядається як один із базових методологічних підходів до побудови систем автоматичного керування, починаючи з класичних робіт з теорії регулювання. В основі цього принципу лежить ідея організації структури керування таким чином, щоб вплив збурювального фактора був погашений або ізольований ще до того, як він вплине на вихідні змінні системи. Одним із важливих напрямів досліджень, пов'язаних з інваріантністю, стало вивчення умов структурної компенсації збурень. Для досягнення повної незалежності вихідного сигналу від збурення необхідно сформулювати таку схему керування, де канали впливу збурення і керуючого сигналу мають взаємно протилежну дію на контрольовану величину. Це дозволяє забезпечувати стійку роботу системи при різкій зміні зовнішніх впливів, однак потребує точних знань про характер і точку прикладення збурення.

Подальший розвиток теорії інваріантності пов'язаний із розробкою технік компенсації збурень на основі зворотних зв'язків. Введення додаткових контурів регулювання дозволяє автоматично коригувати керуючий вплив у відповідь на виявлені відхилення від бажаного стану системи, що дозволяє реалізувати інваріантні режими навіть у тих випадках, коли збурення є змінним у часі або неповністю відоме.

В епоху цифрової автоматизації, інваріантність стала активно застосовуватися разом із алгоритмами спостереження стану системи. Завдяки цьому стало можливим реалізувати компенсацію збурень навіть у таких випадках, коли вони не піддаються безпосередньому вимірюванню. Системи зі спостерігачами та прогнозуючими моделями дозволяють оцінювати вплив збурень опосередковано, за змінами динаміки вихідних параметрів, і формувати керуючий сигнал відповідної корекції.

Особливу увагу привертає проблема інваріантності в нелінійних та багатовимірних системах. У таких системах вплив збурень має складніший характер, а канали взаємодії параметрів можуть бути неоднозначними. Це зумовлює необхідність пошуку узагальнених підходів, що враховують не тільки структуру системи, але і її функціональні залежності. Саме тому сучасні наукові роботи спрямовані на адаптацію принципу інваріантності до складних

технічних об'єктів, включаючи системи зі змінною структурою та значними нелінійностями, що є ключовим для забезпечення їхньої високої надійності та якості керування в умовах експлуатації. Принцип інваріантності розглядається не лише як теоретична концепція, але й як інструмент практичного проектування систем автоматичного регулювання, здатних нейтралізувати вплив широкого спектру зовнішніх збурень. Особливий інтерес становить можливість використання даного принципу при розробці автономних технічних систем, що функціонують у мінливих та непередбачуваних умовах.

На практиці в системах автоматичного регулювання ключовою задачею є своєчасне виявлення зовнішніх збурень та визначення характеру їх дії. Для цього застосовують підходи, що базуються на аналізі відхилень контрольованих параметрів від очікуваної траєкторії. Якщо система функціонує у номінальному режимі, то її вихідні величини змінюються відповідно до заданих динамічних характеристик. Поява збурення, навпаки, призводить до відхилення реальних значень від розрахункових. Одним із найбільш поширених методів виявлення збурень є використання залишкових сигналів, які формуються на основі оцінок внутрішніх станів системи. Якщо залишковий сигнал виходить за допустимі межі, це свідчить про появу збурювального впливу, що дозволяє не тільки фіксувати факт порушення, але й оцінити його інтенсивність та напрямок дії. Системи цього типу зазвичай включають елементи фільтрації та адаптивного налаштування порогів чутливості.

Для більш складних об'єктів, де характер збурень може змінюватися в часі або мати випадкову природу, застосовуються методи класифікації збурень, які базуються на аналізі спектральних, стохастичних або часових характеристик відхилень. Такі методи дозволяють розрізняти різні типи збурень, наприклад, короточасні імпульсні впливи, повільні квазістатичні зміни або випадкові флуктуації. Завдяки цьому система може адаптувати алгоритм компенсації для найбільш ефективної реакції. Особливе місце займають моделі прогнозування збурень, які дають можливість не лише реагувати на зміну стану системи постфактум, але й передбачати можливе відхилення ще до того, як воно вплине на керований параметр. Такі моделі будуються на основі апарату оцінювачів стану, машинного навчання або статистичного аналізу попередніх даних. Прогнозування дозволяє випереджувально формувати коригувальний сигнал, що значно підвищує ефективність роботи системи.

Важливим етапом у формуванні механізму компенсації є визначення точок прикладення збурень. Для деяких систем збурення діє безпосередньо на об'єкт керування, для інших – на канали вимірювання або передачі сигналів. Від правильного визначення місця дії збурення залежить вибір структури компенсуючого контуру: чи це буде додатковий зворотний зв'язок, чи корекція основного закону керування, чи введення допоміжного каналу впливу.

Розробка алгоритмів компенсації зовнішніх збурень передбачає врахування обмежень, пов'язаних із фізичною реалізованістю керуючих сигналів, інерційністю виконавчих механізмів та наявністю шумів у системі. Тому створювані алгоритми часто поєднують у собі як коригувальні впливи швидкої дії, так і згладжувальні компенсатори, що забезпечують стійкість та безперервність керування. Такий комплексний підхід дозволяє досягти високої якості регулювання в умовах змінного середовища. Використання інваріантного керування знаходить поширення у стабілізації руху мобільних платформ, роботизованих маніпуляторів, технологічних установок і систем регулювання енергоспоживання.

Таким чином, принцип інваріантності є фундаментальним інструментом підвищення робастності систем автоматичного регулювання та забезпечує стабільність характеристик навіть у непередбачуваних умовах, інтеграція інваріантних принципів з адаптивними та інтелектуальними алгоритмами керування, що дозволить збільшити автономність і надійність сучасних технічних систем.

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 [Electronic resource] / J David Powell, Abbas F. Emami-Naeini, Christina M. Ivler. – Pearson, 2025. – 1046 p.
3. Performance recovery of dynamic feedback-linearization methods for multivariable nonlinear systems / Wu Y, Isidori A, Lu R, et al. // IEEE Trans. Automatic Control, 2020, AC–65, p. 1365–1380.
4. On a method for robust stabilization of invertible multivariable nonlinear systems / Isidori A. // Proceedings of the 13rd IFAC Symposium NOLCOS, Reykjavik (Iceland), 23–25 July, 2025.
5. On the Control of Invertible Multivariable Nonlinear Systems / Isidori A. // J Syst Sci Complex 38, p. 513–532 (2025).
6. H. Attar, A. T. Abu-Jassar, V. Yevsieiev, V. Lyashenko, I. Nevliudov and A. K. Luhach, "Zoomorphic mobile robot development for vertical movement based on the geometrical family caterpillar", Comput. Intell. Neurosci., vol. 2022, pp. 3046116, 2022.
7. Nevliudov, I., Yevsieiev, V., Baker, J. H., Ahmad, M. A., & Lyashenko, V. (2020). Development of a cyber design modeling declarative Language for cyber physical production systems. J. Math. Comput. Sci., 11(1), 520-542.
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. 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.
10. 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.
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. 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.
13. Maksymova, S., Yevsieiev, V., & Abu-Jassar, A. (2025). A Prototype Development for an Automated Control System for Production Checkpoints. Multidisciplinary Journal of Science and Technology, 5(3), 287-297.
14. НЕВЛЮДОВ, І., ЄВСЄЄВ, 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.

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