

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЯКОСТІ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ З УРАХУВАННЯМ ЗАПІЗНЕННЯ

І.О. Андрюхін, Д.О. Коротаєв

Харківський національний університет радіоелектроніки

Україна, 61166, Харків, пр. Науки 14

E-mail: illia.andriukhin@nure.ua, denys.korotaiev@nure.ua

Анотація: У статті розглянуто особливості аналізу стійкості та якості автоматичних систем керування нелінійними об'єктами з урахуванням запізнення. Проаналізовано вплив часових затримок на динамічні та частотні характеристики, наведено типові підходи до апроксимації запізнення та використання коригувальних пристроїв. Розглянуто практичні приклади в галузі радіоелектронного приладобудування з використанням методів частотного аналізу та критеріїв стійкості.

Ключові слова: нелінійний об'єкт керування, запізнення, система автоматичного регулювання, стійкість, якість, частотні характеристики, регулятор.

INVESTIGATION OF STABILITY AND QUALITY OF AUTOMATIC CONTROL OF NONLINEAR OBJECTS WITH TIME DELAY

I. Andriukhin, D. Korotaiev

Kharkiv National University of Radio Electronics

Ukraine, 61166, Kharkiv, Nauky ave., 14

E-mail: illia.andriukhin@nure.ua, denys.korotaiev@nure.ua

Annotation: The article considers the features of stability and quality analysis of automatic control systems for nonlinear objects with delay consideration. The influence of time delays on dynamic and frequency characteristics is analyzed, and typical approaches to delay approximation and the use of corrective devices are presented. Practical examples in the field of radio-electronic instrument engineering using frequency analysis methods and stability criteria are considered.

Key words: nonlinear control object, delay, automatic control system, stability, quality, frequency characteristics, controller.

У сучасних автоматизованих технічних системах все частіше зустрічаються об'єкти керування з нелінійною динамікою та часовими затримками. До таких об'єктів належать різні процеси в радіоелектронному приладобудуванні, телекомунікаційних системах, а також в робототехніці, де сигнал управління може передаватися через канали з обмеженою пропускною здатністю або затримкою обробки. Запізнення в системах керування є однією з причин зниження стійкості, погіршення якості регулювання та появи коливального характеру перехідних процесів. Особливо це критично для об'єктів з високим коефіцієнтом підсилення або з інерційною нелінійністю.

Запізненням у системі називають часовий проміжок між моментом прикладання керуючого впливу та моментом, коли цей вплив починає змінювати стан об'єкта. Типовим прикладом є передача керуючого сигналу на виконавчий механізм, який має часову затримку у відповіді через фізичні, електромеханічні або обчислювальні обмеження.

При синтезі систем автоматичного регулювання нелінійних об'єктів є необхідність забезпечення стійкості та прийнятної якості регулювання за наявності апаратних чи алгоритмічних затримок. Такі затримки можуть бути спричинені передачею сигналу мережею, інерційністю датчиків або часовими втратами при обробці інформації.

Математично запізнення часто описується як мультиплікативна експонента у передавальній функції. Оскільки аналіз таких експоненційних передавальних функцій у частотній області ускладнений, широко застосовується апроксимація Паде, яка дозволяє виразити запізнення у вигляді раціональної функції. Запізнення вводить в систему нелінійну функціональну залежність, яка порушує припущення про локальність реакції та значно ускладнює аналіз стійкості. Методи Ляпунова в класичному вигляді тут не застосовні, тому все частіше використовують методики на основі розширених функціоналів або частотні критерії стійкості з урахуванням фазового запасу.

Нелінійність об'єкта управління у поєднанні із запізненням може призвести до складної динаміки системи. Такий об'єкт не завжди описується лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами, тому для його моделювання використовують спрощені лінеаризовані моделі у робочій точці. Наприклад, типовим об'єктом є радіочастотний підсилювач з нелінійністю типу сатурації або гістерезису, який реагує із затримкою на вхідний сигнал внаслідок обмежень по швидкодії або температурного впливу.

Розглянемо загальну структуру системи автоматичного регулювання з об'єктом керування, в якому присутнє запізнення типу Паде:

$$W(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-s\tau},$$

де τ — величина запізнення.

При моделюванні такого об'єкта у середовищах MATLAB/Simulink використовують апроксимацію запізнення за допомогою розкладу Паде 1-го або 2-го порядку. На рисунку 1 представлена діаграма Бode, яка показує вплив запізнення (апроксимація Паде 1-го порядку) на амплітудно-фазові характеристики нелінійного об'єкта.

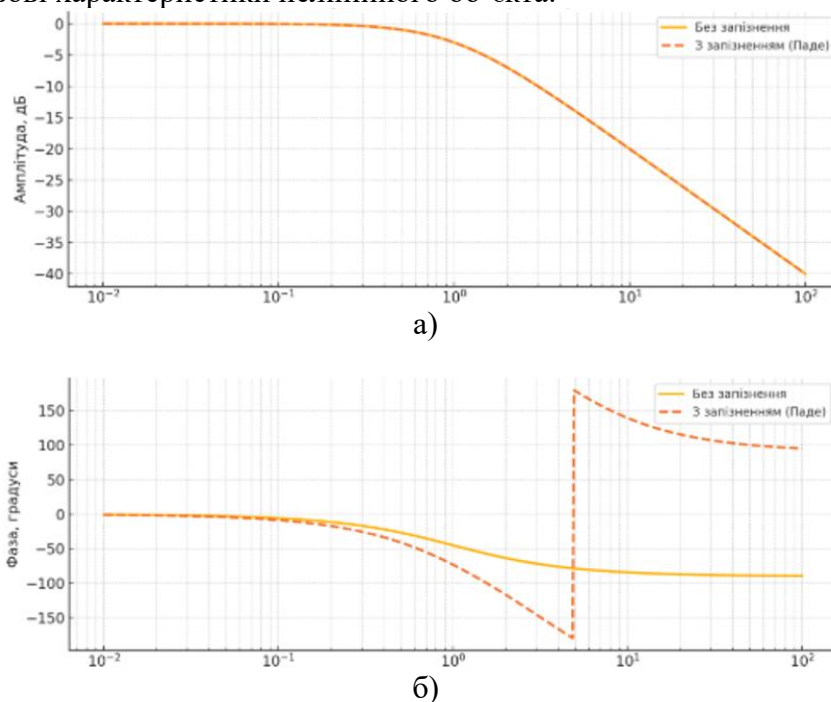


Рисунок 1 – Вплив запізнення на частотні характеристики системи: а) амплітудно-частотна характеристика; б) фазо-частотна характеристика

Дослідження показують, що навіть незначне запізнення в петлі зворотного зв'язку може викликати зменшення фазового запасу і, як наслідок, зниження стійкості. Особливо це критично для швидкодіючих систем, наприклад у сервоприводах робототехнічних систем, де навіть мілісекунди можуть призвести до генерації коливань або втрати точності позиціонування.

В таких випадках необхідно застосовувати компенсатори запізнення. Одним із поширених рішень є впровадження опережаючих коригуючих ланок або цифрових регуляторів з предиктивною моделлю. Предиктивне управління дозволяє враховувати ефекти запізнення через включення динаміки об'єкта у вікно прогнозу.

У частотній області аналіз стійкості та якості систем автоматичного керування, що містять запізнення, здійснюється за допомогою частотних характеристик. Частотні методи дозволяють з високою точністю оцінити вплив запізнення на фазові та амплітудні характеристики, а також визначити критичні точки, що можуть призвести до нестійкості. Введення затримки у контур керування проявляється у вигляді фазового зсуву, який лінійно зростає з частотою, що особливо чітко відображається на характеристиках Боде. Такі зміни істотно знижують фазовий запас системи, створюючи загрозу переходу до автоколивального режиму.

З метою виявлення граничних умов стійкості широко застосовуються критерій Найквіста, а також логарифмічні критерії стійкості з урахуванням запасів по фазі та амплітуді. Визначення мінімально допустимого фазового запасу є критично важливим етапом проєктування, особливо при роботі в умовах зовнішніх збурень або швидкозмінного навантаження.

В нелінійних об'єктах керування ситуація ускладнюється через наявність змінних або невизначених параметрів, які можуть залежати від режиму роботи, температури, старіння елементної бази або зовнішніх впливів. В таких умовах класичні лінійні методи частотного аналізу часто виявляються недостатніми або навіть непридатними. Тому актуальним напрямом є впровадження нечітких регуляторів та адаптивних алгоритмів, здатних перебудовувати логіку керування в режимі реального часу.

Адаптивні схеми керування дозволяють враховувати змінність характеристик об'єкта та оновлювати параметри регулятора на основі поточних даних, зберігаючи необхідні показники якості. Такі системи здатні автоматично здійснювати ідентифікацію об'єкта, визначити нові передавальні функції та відповідним чином перебудовувати структуру керування. Наприклад, у системах стабілізації положення антенних пристроїв при дії змінного вітрового навантаження класичні ПІД-регулятори не забезпечують належної якості через інерційність та непередбачуваність впливів. У таких випадках використання адаптивних регуляторів з можливістю оновлення коефіцієнтів дозволяє підтримувати стабільну динаміку навіть за суттєвих змін збурень, забезпечуючи неперервну компенсацію впливів.

Застосування цифрових методів моделювання дозволяє ефективно аналізувати САР з затримками. Інструменти на кшталт MATLAB Control System Toolbox, MapleSim, Dymola надають змогу проводити дослідження характеристик стійкості з урахуванням реальних значень запізнень. Це особливо корисно для розробки електронних пристроїв із вбудованими процесорами..

В галузі радіоелектронного приладобудування високі вимоги до точності та швидкодії вимагають не лише компенсації запізнення, а й активного використання частотного моделювання. Наприклад, в системах фазового автопідстроювання частоти затримки можуть призвести до втрати захоплення сигналу, тому необхідне точне узгодження характеристик керування з параметрами коливального контуру. Наявність запізнень погіршує показники якості та стійкості, однак застосування сучасних цифрових методів аналізу, адаптивних і коригуючих структур дозволяє ефективно компенсувати ці впливи. Для промислових систем, зокрема в радіоелектроніці та робототехніці, важливо застосовувати комплексний підхід, що включає моделювання, експериментальну перевірку та ітеративне вдосконалення регуляторів.

Таким чином, запізнення є суттєвим фактором, який обмежує стійкість та якість автоматичних систем керування, особливо в умовах нелінійності об'єкта. Використання сучасних методів, таких як Паде-апроксимація, адаптивне регулювання, прогнозуючі моделі

та нечітка логіка, дозволяє компенсувати негативні ефекти та забезпечити стійкість та відповідну якість.

ЛІТЕРАТУРА

1. Невлюдов, І.Ш. Автоматичне управління технологічними об'єктами [Текст]: підручник / І.Ш. Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2018.–190 с.
2. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: Либідь, 2007. – 656 с..
3. Невлюдов, І.Ш. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навчальний посібник / І.Ш.Невлюдов, О.В.Токарева. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 240 с.
4. 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.
5. 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.
6. Attar, H., Abu-Jassar, A. T., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Khosravi, M. R. (2022). Control system development and implementation of a CNC laser engraver for environmental use with remote imaging. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 9140156.
7. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Yevsieiev, V., Amer, A., Demska, N., Luhach, A. K., & Lyashenko, V. (2022). Electronic user authentication key for access to HMI/SCADA via unsecured internet networks. *Computational intelligence and neuroscience*, 2022(1), 5866922.
8. 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.
9. 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.
10. Abu-Jassar, A. T., Attar, H., Amer, A., Lyashenko, V., Yevsieiev, V., & Solyman, A. (2025). Development and Investigation of Vision System for a Small-Sized Mobile Humanoid Robot in a Smart Environment. *International Journal of Crowd Science*, 9(1), 29-43.
11. Yevsieiev, V., Maksymova, S., Alkhalaileh, A., & Gurin, D. (2025). Development of a program for processing 3d models of objects in a collaborative robot workspace using an HD camera. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 194-210.
12. Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., Maksymova, S., & Demska, N. (2025). Development of a model for recognizing various objects and tools in a collaborative robot workspace. *ACUMEN: International journal of multidisciplinary research*, 2(1), 224-239.
13. Yevsieiev, V., Abu-Jassar, A., & Maksymova, S. (2024). Calculation of the Distance to Objects in Collaborative Robots Workspace Using Computer Vision. *Journal of universal science research*, 2(11), 240-255.

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