

УДК 681.5:621.375.826

## **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЛАЗЕРОМ НА ОСНОВІ ДАНИХ СЕНСОРІВ**

Половинко М.В.

e-mail: [mykola.polovynko@nure.ua](mailto:mykola.polovynko@nure.ua)

Науковий керівник – к.т.н., Герасименко М.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ФОЕТ  
м. Харків, Україна

The paper analyzes intelligent laser control systems based on sensor data. Modern approaches to laser control, including classical PID regulators and intelligent methods based on fuzzy logic, are considered. The types of sensors used in laser installations are analyzed, and a generalized structure of an intelligent control system using a fuzzy PID controller for adaptive parameter tuning is proposed. The system integrates optical power, temperature, and beam position measurements to improve stability and control accuracy. The proposed architecture can be implemented on embedded microcontroller platforms to perform real-time data acquisition, signal processing, and adaptive control of laser parameters.

Лазерні системи широко застосовуються у промисловості, медицині, наукових дослідженнях та телекомунікаційних технологіях. Ефективне керування лазерним випромінюванням вимагає точного контролю низки параметрів у реальному часі, зокрема потужності випромінювання, температури активного середовища та просторового положення пучка. Нестабільність цих параметрів може призводити до погіршення якості технологічних процесів або зниження ефективності роботи лазерної установки.

Додатковою складністю є нелінійний характер фізичних процесів у лазерних джерелах випромінювання, що ускладнює побудову точних математичних моделей для традиційних систем керування.

Одним із найпоширеніших підходів до керування лазерними системами є використання пропорційно-інтегрально-диференціальних (PID) регуляторів, що формують керуючий сигнал на основі поточної похибки регулювання.

Однак у складних нелінійних системах із зовнішніми збуреннями ефективність класичного PID-керування може знижуватися [1]. У таких випадках перспективним є використання інтелектуальних методів керування, зокрема нечіткої логіки та нейро-нечітких систем. Подібні підходи дозволяють враховувати невизначеність параметрів системи та адаптивно змінювати алгоритм керування відповідно до поточного режиму роботи лазерної установки.

Нечіткий PID-регулятор (Fuzzy PID) дозволяє адаптивно змінювати коефіцієнти  $\Delta K_P$ ,  $\Delta K_I$ ,  $\Delta K_D$  залежно від поточної помилки та швидкості її зміни.

Такий підхід підвищує стійкість системи та зменшує перерегулювання. Зокрема, у роботі [2] показано, що застосування нечіткого PID-регулятора для стабілізації температури напівпровідникового лазера забезпечує точність стабілізації температури до  $\pm 0.005$  °C і струму до  $\pm 0.01$  mA, що перевищує характеристики класичних регуляторів. Перспективним напрямком розвитку інтелектуальних систем керування є також використання нейронних мереж та нейро-нечітких алгоритмів, здатних навчатися на експериментальних даних та підвищувати точність регулювання складних оптоелектронних систем.

Важливою складовою інтелектуальної системи керування є сенсорна підсистема, яка забезпечує перетворення фізичних параметрів у електричні сигнали. Для контролю оптичної потужності широко застосовуються фотодіоди.

Кремнієві фотодіоди працюють у спектральному діапазоні приблизно 200–1100 нм, тоді як фотодіоди на основі InGaAs дозволяють реєструвати випромінювання в ближньому інфрачервоному діапазоні до 1700 нм [3]. Для визначення положення лазерного пучка використовуються позиційно-чутливі детектори (PSD), які дозволяють вимірювати відхилення центру пучка з високою просторовою роздільною здатністю.

Температурний режим активного середовища контролюється за допомогою термісторів або платинових датчиків (PT100), які разом з термоелектричними модулями Пельтьє формують контур стабілізації температури лазерного елемента. У технологічних лазерних системах також застосовуються інфрачервоні пірометри для безконтактного контролю температури у зоні обробки матеріалу.

Структурно інтелектуальна система керування лазером може складатися з декількох функціональних блоків: блоку збору сенсорних даних, блоку попередньої обробки сигналів, інтелектуального модуля прийняття рішень та виконавчого блоку.

Сенсорні сигнали оцифровуються аналого-цифровим перетворювачем, після чого виконуються фільтрація та нормалізація даних. Інтелектуальний модуль реалізує алгоритм нечіткого PID-керування, який формує корекцію коефіцієнтів регулятора залежно від поточного стану системи.

На етапі попередньої обробки можуть застосовуватися цифрові методи фільтрації та виявлення аномальних значень сигналів, що дозволяє підвищити надійність роботи системи керування.

Реалізація подібних систем можлива на базі сучасних вбудованих платформ із використанням мікроконтролерів. Вбудовані системи забезпечують збір даних від сенсорів, їх попередню обробку, аналіз та

формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів у режимі реального часу.

Використання мікроконтролерів дозволяє інтегрувати алгоритми цифрової обробки сигналів, реалізувати адаптивні методи керування та забезпечити взаємодію з комп'ютерними системами моніторингу [4, 5]. Як апаратну платформу може бути використано мікроконтролери сімейства STM32, які мають багатоканальні аналого-цифрові перетворювачі, достатню обчислювальну продуктивність та широкий набір периферійних інтерфейсів. Завдяки цьому можливе виконання алгоритмів керування з частотою дискретизації порядку кількох кілогерц, що є достатнім для більшості задач стабілізації параметрів лазерного випромінювання.

Таким чином, використання інтелектуальних алгоритмів обробки сенсорних даних у поєднанні з можливостями сучасних вбудованих систем дозволяє підвищити точність та стійкість керування лазерними установками порівняно з класичними підходами. Подальші дослідження передбачають апаратну реалізацію запропонованої системи та експериментальну перевірку ефективності алгоритмів керування.

#### Список використаних джерел:

1. Chhabra M. et al. A comparative study of intelligent control techniques // *Neurocomputing*, 2020.
2. Zhao Y. et al. High-precision semiconductor laser current drive and temperature control system design // *Sensors*. 2022. Vol. 22. P. 9989.
3. Zhang H. et al. Photon detector technology for laser ranging: A review // *Coatings*. 2025. Vol. 15(7). P. 798.
4. Mozgova I., Yanchevskyi I., Gerasymenko M., Lachmayer R. (2018). Mobile automated diagnostics of stress state and residual life prediction for a component under intensive random dynamic loads // *Procedia Manufacturing*. 2018. Vol. 24. P. 210-215.
5. Gerasymenko M. A mobile real-time system for stress state diagnostics and residual life prediction of structural components // *Grundlagen Der Modernen Wissenschaftlichen Forschung, IX Internationalen Wissenschaftlich-Praktischen Konferenz, Zurich, Switzerland*. 2026. P. 156-158.