

УДК 621.375.826:681.5

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ЛАЗЕРНОГО ПРОЦЕСУ З КОРЕКЦІЄЮ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Пташинський О.О.

e-mail: oleksii.ptashynskyi@nure.ua

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

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

The paper presents an intelligent real-time monitoring and control system for laser processing based on frequency analysis of plasma optical emission. The correlation between keyhole stability and spectral characteristics of the emitted signal is applied to evaluate process quality. An ESP32-based hardware-software architecture performs signal acquisition, short-time Fourier transform processing, and calculation of a stability parameter for adaptive feedback control. Real-time correction of the laser beam focus position ensures stable penetration depth and improved weld quality. The proposed system enhances process stability, reduces defects, and enables integration into smart manufacturing environments.

Лазерні технології обробки матеріалів (різання, зварювання, гравіювання, нанесення покриттів) широко застосовуються у сучасному виробництві завдяки високій точності, локалізованому тепловому впливу та можливості автоматизації. Якість лазерного процесу суттєво залежить від стабільності потужності випромінювання, швидкості переміщення променя, положення фокусу та імпульсних параметрів. Навіть незначні відхилення можуть призводити до дефектів зварного шва, нестабільної глибини проплавлення та зниження міцності з'єднання.

Актуальною задачею є розробка систем моніторингу [1, 2] з адаптивним зворотним зв'язком у реальному часі. У роботі запропоновано інтелектуальну систему контролю лазерного процесу на основі аналізу спектральних характеристик оптичного випромінювання плазми.

Під час лазерного зварювання у матеріалі формується замкова щілина (keyhole), стабільність якої визначає глибину проплавлення. Коливання інтенсивності світлового сигналу плазмового факела корелюють із динамікою ключового отвору. Неглибоке проплавлення характеризується переважанням низькочастотних складових у спектрі, тоді як глибоке - рівномірним розподілом амплітуд у широкому частотному діапазоні [3].

Для кількісної оцінки використовується параметр S – сума квадратів залишків лінійної регресії нормованого спектра:

$$S = \sum_{i=1}^N (y_i - (ax_i + b))^2,$$

де y_i – нормована амплітуда спектра; x_i – частота; a , b – коефіцієнти регресії. Менше значення S відповідає більш стабільному процесу та глибшому проникненню. Параметр ϵ універсальним для різних типів лазерів і матеріалів та придатним для систем адаптивного керування [3, 4].

Структурно система складається з фотодетектора, світлофільтра, мікроконтролера, комп'ютера та виконавчого механізму корекції (рис. 1). Фотодетектор реєструє зміну інтенсивності випромінювання, світлофільтр обмежує небажані спектральні складові. Мікроконтролер виконує оцифровування сигналу, спектральний аналіз та формування керуючого сигналу. Комп'ютер забезпечує візуалізацію й архівування даних, а виконавчий механізм змінює положення фокусу лазерного променя.

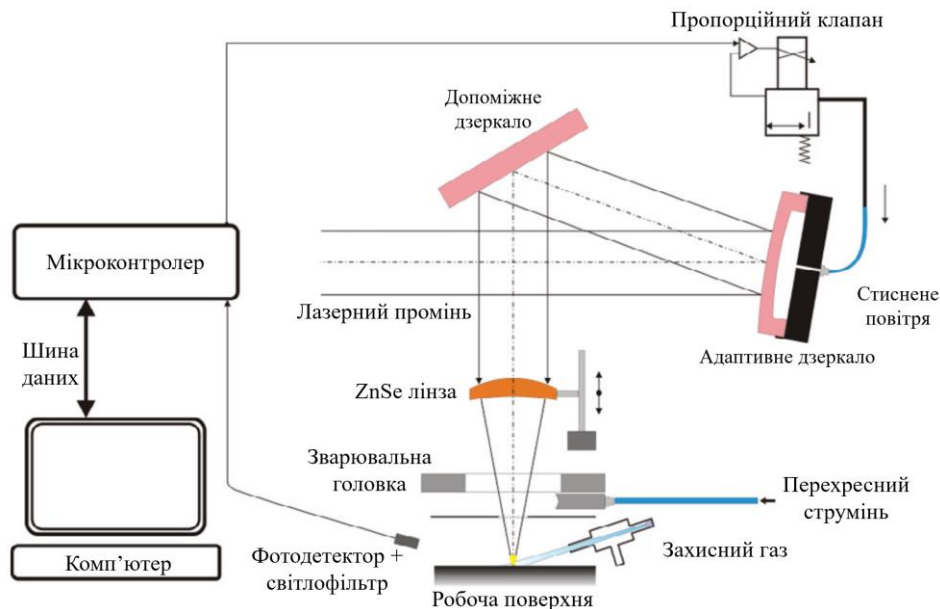


Рисунок 1 – Структурна схема лазерної установки з інтегрованою системою моніторингу та зворотного зв'язку на базі мікроконтролера

Для аналізу нестационарного сигналу використовується дискретне короткочасне перетворення Фур'є:

$$X(f, \tau) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t) w(t - \tau) e^{-2\pi jft/N},$$

де $x(t)$ – вибірка сигналу; $w(t - \tau)$ – віконна функція; τ – часовий зсув; f – частота [5]. Результатом є спектрограма розподілу енергії сигналу в

площині «час-частота». Ширина вікна визначає компроміс між часовою та частотною роздільністю.

Апаратна реалізація системи базується на мікроконтролері ESP32 на основі двоядерного процесора Tensilica Xtensa LX6 (до 240 МГц) з 18-канальним 12-бітним аналого-цифровим перетворювачем, що забезпечує оцифровування сигналу фотодетектора, виконання алгоритму дискретного короткочасного перетворення Фур'є та формування керуючих сигналів у реальному часі. Вбудований модуль Wi-Fi стандарту 802.11 b/g/n забезпечує бездротову передачу даних до комп'ютера для відображення та архівування результатів. У разі перевищення порогового значення параметра S формується керуючий сигнал для виконавчого механізму, який коригує положення адаптивного дзеркала та стабілізує процес [3].

Запропонована система забезпечує безперервний моніторинг, оперативну корекцію параметрів лазерного процесу та інтеграцію в автоматизовані інтелектуальні виробничі системи. Подальший розвиток передбачає впровадження алгоритмів машинного навчання для предиктивного керування та підвищення стабільності обробки матеріалів.

Список використаних джерел:

1. Mozgova I., Yanchevskyi I., Gerasymenko M., Lachmayer R. 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.
2. 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, 2026. P. 156–158.
3. Mrňa L., Kaščák Ľ., Mrňová Z. Correlation between the keyhole depth and the frequency characteristics of light emissions in laser welding // *Physics Procedia*. 2013. Vol. 41. P. 469–477.
4. Mrňa L., Kaščák Ľ., Spišák E. Feedback control of laser welding based on frequency analysis of light emissions and adaptive beam shaping // *Physics Procedia*. 2012. Vol. 39. P. 784–791.
5. Jeon H., Lee J., Kim S. Area-efficient short-time Fourier transform processor for time-frequency analysis // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, No. 20. P. 7208.