

УДК 621.982:621.389.119

Сус С. П., Суботін О. В.

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ГАРЯЧОГО ПРОКАТУ ОПТИЧНИМ МЕТОДОМ

При гарячій прокатці існує гостра потреба визначення місця розташування прокату в методичних печах, на підході до клітей і в районі гідрозбиву накипу.

Сучасні безконтактні засоби контролю дозволяють виявити нагрітий метал [1], однак через високу (1300–1700 °С) температуру в методичних печах, значну концентрацію водяної пари в районі гідрозбиву накипу, наявності оптичних та інших перешкод вірогідність вказаного виявлення не задовольняє потребам, що часто призводить до втрати необхідної інформації та виникнення аварійних ситуацій.

Метою даної роботи є вибір методу контролю і знаходження інформативних параметрів при визначенні місця розташування гарячого прокату.

Аналіз існуючих методів [2] показав, що для вказаного контролю найбільш сприятливим являється оптичний метод. Однак через високу температуру і значну концентрацію водяної пари відбувається суттєве ослаблення інформаційного оптичного сигналу (ІОС) у зоні контролю.

Оскільки зона контролю є оптичним каналом зв'язку (ОКЗ), властивості якого відрізняються від властивостей добре вивченої атмосфери, то, з одного боку ОКЗ подавляє інформаційний сигнал, що визначає робочий оптичний діапазон пристрою контролю, а з іншого – є потужним джерелом оптичних завад, а це накладає обмеження на параметри ІОС та способи його обробки.

Як відомо [2, 3], поглинання оптичних хвиль у видимому та інфрачервоному діапазонах залежить від тиску, температури та концентрації поглинаючої речовини і має яскраво виражений селективний характер. Якщо робоча температура в методичній печі створюється шляхом горіння рідкого або газоподібного палива, то хімічний склад ОКЗ визначається компонентами приземної атмосфери і продуктами горіння. В місцях гідрозбиву накипу основним поглинаючим компонентом є водяна пара.

Процес поширення ІОС можна представити в диференціальній формі [3]:

$$dI_{\lambda} = -I_{\lambda} \alpha_n(\lambda) \rho(l) dl, \quad (1)$$

де I_{λ} – інтенсивність оптичного сигналу з довжиною хвилі λ ;

$\alpha_n(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт поглинання;

$\rho(l)$ – густина поглинаючої речовини;

dl – елемент шляху, по якому поширюється оптичний сигнал.

Спектральний коефіцієнт поглинання можна визначити, знаючи інтенсивності ІОС $I_0(\lambda)$, $I_l(\lambda)$ відповідно на вході й виході ОКЗ.

$$\alpha_n(\lambda) = \frac{I_0(\lambda) - I_l(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (2)$$

Реальний ІОС займає певний частотний діапазон $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Отже, коефіцієнт поглинання α_n можна знайти через інтегрування виразу (2).

$$\alpha_n = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [I_0(\lambda) - I_l(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_0(\lambda) d\lambda}. \tag{3}$$

На практиці найчастіше для характеристики середовища використовують коефіцієнт пропускання τ_n , який визначається формулою [3]:

$$\tau_n = 1 - \alpha_n. \tag{4}$$

Якщо припустити, що щільність ІОС на інтервалі $\Delta\lambda$ постійна, то коефіцієнт поглинання, використовуючи формули (2) і (3), визначиться виразом:

$$\alpha_n = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \{1 - \exp[-\int_{(l)} \alpha_n(\lambda) \rho(l) dl]\} d\lambda, \tag{5}$$

де $\int_{(l)}$ – криволінійний інтеграл, який необхідно обчислювати по шляху поширення оптичного сигналу.

Відомо, що спектральний коефіцієнт поглинання випромінювання частотою \mathcal{G} визначається як сума коефіцієнтів поглинання окремих спектральних ліній [3]:

$$\alpha(\mathcal{G}, l) = \sum_i S_i(l) b_i(\mathcal{G}, l), \tag{6}$$

де S_i і b_i – загальна інтенсивність та контур i -тої спектральної лінії.

Підсумовування по формулі (6) може бути виконане тільки чисельне.

Згідно з теорією Лоренца спектральний коефіцієнт поглинання для групи перехресних спектральних ліній буде [4]:

$$\alpha(\mathcal{G}, l) = \sum_i \frac{S_i[T(l)]}{\pi} \cdot \frac{\gamma_i[T(l), P(l)]}{(\mathcal{G} - \mathcal{G}_{0i})^2 + \gamma_i^2[T(l), P(l)]}, \tag{7}$$

де $T(l)$ і $P(l)$ – температура та ефективний тиск у точці l ;

γ_i – півширина i -ої спектральної лінії.

Підставляючи (7) в (5), отримаємо вираз для коефіцієнта поглинання ІОС у частотному інтервалі $\Delta\mathcal{G} = \mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1$:

$$\alpha_n = \frac{1}{\mathcal{G}_2 - \mathcal{G}_1} \int_{\mathcal{G}_1}^{\mathcal{G}_2} \{1 - \exp[-\sum_i \int_{(l)} \rho(i) \frac{S_i[T(l)]}{\pi} \cdot \frac{\gamma_i[T(l), P(l)]}{(\mathcal{G} - \mathcal{G}_{0i})^2 + \gamma_i^2[T(l), P(l)]} dl]\} d\mathcal{G}. \tag{8}$$

Для переходу до інтервалу $\Delta\lambda$ необхідно використовувати співвідношення:

$$\lambda = \frac{C}{\nu},$$

де C – швидкість поширення світла у вакуумі.

Як випливає із (8), для визначення коефіцієнта поглинання ІОС необхідно мати наступні дані:

- розподіл концентрації, температури і ефективного тиску в зоні контролю;
- положення спектральних ліній, які впливають на поглинання;
- інтенсивність і півширину цих ліній при відповідних температурі і тиску.

Основні труднощі при розрахунках поглинання полягають у визначенні інтенсивності та півширини спектральних ліній.

Використовуючи рівняння (1) і лінії поглинання H_2O , CO_2 , CO і O_2 [3, 4] встановлено, що найбільш вагомою і широкою є смуга поглинання водяною парою, що займає по довжині хвилі діапазон від 5,5 до 7,5 мкм.

Отримано ряд областей оптичного діапазону, в яких поглинання оптичного сигналу буде мінімальним (від 0,7 до 0,9; від 0,95 до 1,05; від 1,2 до 1,3; від 1,5 до 1,8; від 2,1 до 2,4; від 3,3 до 4,2; від 4,5 до 5,0 мкм). Таким чином мінімальне поглинання ІОС буде в діапазоні від 1,2 до 5,0 мкм. В діапазоні від 0,7 до 1,05 мкм існує небезпека потрапити в смугу поглинання CO_2 , CO або O_2 .

В отриманих діапазонах, згідно з теорією Кабанна-Релея [3], молекулярне розсіювання не перевищує 3 %, а основним буде аерозольне ослаблення, частина якого у вигляді розсіяного “вперед” випромінювання потрапить на вхід приймача та спотворить інформацію. Проведені дослідження показали, що при кутовому полі приймача менше 10^0 розсіюванням “вперед” практично можна зневажити.

Коливання температури по довжині ОКЗ призводять до появи неоднорідних утворень і до зміни показника скривлення, що позначається на величині потужності ІОС на вході приймача.

На моделі ОКЗ проведені дослідження і встановлено, що максимальне кутове відхилення оптичного променя при довжині хвилі 0,6328 і 0,95 мкм не перевищує 4,5 кутових хвилин. Виходячи з цього, отримана залежність потужності ІОС P_{SO} на вході приймача від співвідношення діаметрів прийомної оптичної системи D_n і оптичного променя в місці прийому D_l (рис. 1).

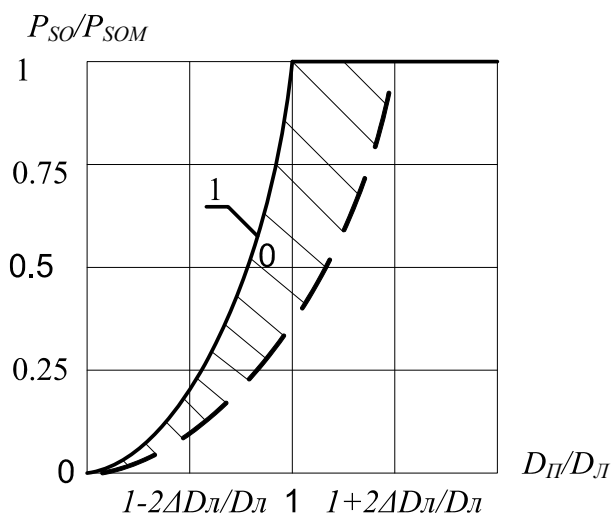


Рис. 1. Розподіл потужності на вході приймача в залежності від співвідношення діаметрів прийомної оптичної системи D_n і оптичного променя в місці прийому D_l

Крива 1 на рис. 1 відповідає умові, при якій кутове відхилення ІОС відсутнє. Область випадкової зміни P_{S0} (заштрихована на рис. 1) означає паразитну модуляцію сигналу, яка виникає внаслідок відхилення оптичного променя. Уникнути такої модуляції можливо при виконанні наступних умов:

$$D_n \geq D_a + 2 \cdot \Delta D_a = 2 \cdot L_k \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\Omega_u}{2} + 8 \cdot 10^{-4} \right), \quad (9)$$

$$D_n \leq D_a - 2 \cdot \Delta D_a = 2 \cdot L_k \cdot \left(\operatorname{tg} \frac{\Omega_u}{2} - 8 \cdot 10^{-4} \right), \quad (10)$$

де Ω_u – плоский кут розкриву оптичного променя;

L_k – відстань від приймача до джерела (довжина оптичного променя);

ΔD_a – максимальне відхилення оптичного променя в місці прийому.

Оскільки виконати умову (9) при $L_k > 15$ м технічно неможливо, то мінімальний діаметр оптичного променя в місці прийому визначається умовою (10):

$$D_{a \min} = 16 \cdot 10^{-4} \cdot L_k + D_n.$$

В результаті теоретичних досліджень отримано вираз, що дозволяє визначити потужність оптичних перешкод P_{ξ_0} у місці прийому.

$$P_{\xi_0} = \frac{1}{4 \cdot L_k} \cdot \Delta \lambda \cdot \Theta_n \cdot D_n^2 \cdot \tau_k \cdot \int_0^{L_k} W(\lambda, L_k) \cdot dL_k, \quad (11)$$

де $\Delta \lambda$ – робочий діапазон;

τ_k – коефіцієнт пропускання каналу;

$W(\lambda, L_k)$ – спектральна інтенсивність щільності перешкоджаючого випромінювання, максимум якої перебуває в діапазоні від 1,7 до 2,0 мкм.

Використовуючи центральну граничну теорему Ляпунова [2] і враховуючи стаціонарність оптичної перешкоди, розрахований її енергетичний спектр $G_{\xi}(f)$, який представлений на рис. 2.

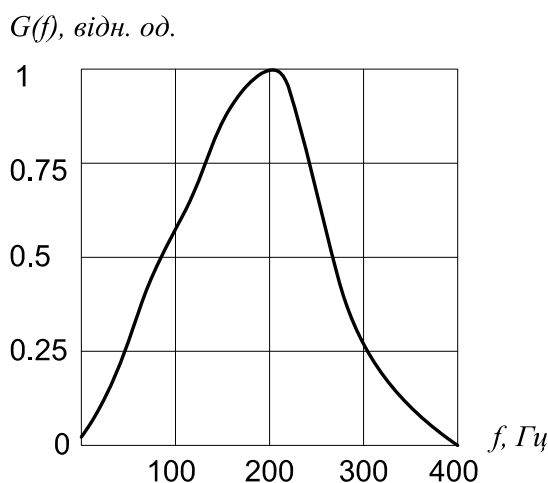


Рис. 2. Енергетичний спектр оптичної перешкоди

Результати виконаних досліджень дозволили вибрати параметри ІОС. Виходячи з мінімального ослаблення та отримання максимальної відмінності між перешкодами та інформаційним сигналом, робочим слід вибрати оптичний діапазон від 0,7 до 1,05 мкм. Для ефективного використання енергії сигналу його необхідно формувати у вигляді оптичних імпульсів тривалістю від 1 до 10 нс і частотою не менше ніж 500 Гц.

Виконана оптимізація параметрів оптичних систем пристрою контролю та отримано вираз для визначення потужності ІОС на вході приймача:

$$P_{S0} = \frac{P' \cdot D_u^2 \cdot \tau_{01} \cdot \tau_k \cdot D_n^2}{16 \cdot L_k^2 \cdot d_{\text{ож}}^2}, \quad (12)$$

де P' – сумарна потужність джерела ІОС;

D_u^2 – діаметр передавальної оптичної системи;

τ_{01} – коефіцієнт пропускання передавальної оптичної системи;

$d_{\text{ож}}$ – розмір джерела ІОС.

Із (12) випливає, що для ізотропного джерела фокусу відстань передаючої оптичної системи можна вибрати якою завгодно. Це пояснюється тим, що коливання потужності на вході приймача P_{S0} , які відбуваються за рахунок зміни фокусної відстані при $D_u = \text{const}$, компенсуються змінами потужності, яка надходить від джерела на передаючу оптичну систему.

В результаті теоретичних досліджень отримано вираз, що дозволяє визначити потужність оптичних перешкод P_{ξ_0} у місці прийому:

$$P_{\xi_0} = \frac{1}{4 \cdot L_k} \cdot \Delta\lambda \cdot \Theta_n \cdot D_n^2 \cdot \tau_k \cdot \int_0^{L_k} W(\lambda, L_k) \cdot dL_k, \quad (13)$$

де $\Delta\lambda$ – робочий діапазон;

τ_k – коефіцієнт пропускання каналу;

$W(\lambda, L_k)$ – спектральна інтенсивність щільності перешкод, максимум якої знаходиться в межах від 1,7 до 2,0 мкм.

Основним завданням синтезу структури пристрою контролю є забезпечення достатньої надійності його роботи. Для прийняття оптимального рішення пристрій повинний протягом часу дії очікуваного сигналу визначити відношення правдоподібності Λ й порівняти його із граничним значенням [2].

Оскільки при відомих параметрах ІОС випадковий характер адитивної суміші корисного сигналу й перешкоди $S(t) + \xi(t)$ визначається тільки перешкодою $\xi(t)$, а на інтервалі $0 \leq t \leq t_u$ $S(t) = \text{const} = A$ (прямокутний імпульс) і, враховуючи, що після фільтра з імпульсною характеристикою $h_\phi(t)$ буде згортка $[S(t) + \xi(t)] \otimes h_\phi(t)$, отримано співвідношення для визначення Λ .

$$\Lambda = \exp \left\{ \frac{A}{\sigma_\xi^2} \cdot \int_0^{t_u} \{ [S(t) + \xi(t)] \otimes h_\phi(t) \} \cdot dt - \frac{A^2}{2 \cdot \sigma_\xi^2} \right\}. \quad (14)$$

Із (14) випливає, що:

$$\int_0^{t_u} \{[S(t) + \xi(t)] \otimes h_\phi(t)\} dt \leq \frac{\sigma_\xi^2}{A} \cdot \ln \Lambda_0 + \frac{A}{2} = P_x, \quad (15)$$

де Λ_0 – граничне значення Λ .

Вираз (15) описує алгоритм роботи пристрою контролю, коли корисна інформація формується протягом кожного періоду проходження ІОС.

Для збільшення надійності можна розширити час обробки інформації до часу ухвали рішення T_{np} . Тоді алгоритм роботи пристрою буде наступним:

$$\sum_{i=1}^{T_{np}/T_u} \int_{T_u \cdot (i-1)}^{T_u \cdot (i-1) + t_u} \{[S(t) + \xi(t)] \otimes h_\phi(t)\} \cdot dt \leq P_x, \quad (16)$$

де T_u — період формування ІОС.

За результатами проведених досліджень виготовлені і випробувані декілька експериментальних зразків пристроїв контролю місця розташування гарячого прокату. Результати випробування підтвердили отримані раніше теоретичні положення [5, 6].

Експериментальний зразок пристрою контролю місця розташування гарячого прокату має наступні технічні характеристики:

- дальність виявлення об'єкта – до 20 м;
- кутове поле приймача - не більше 10°;
- вихідний сигнал – релейний безконтактний;
- напруга живлення – постійна 24 В ± 10 %;
- потужність споживання – не більше 2 Вт.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що для достовірного контролю місця розташування прокату в методичних печах оптичним методом джерелами ІОС можуть бути інфрачервоні випромінюючі діоди із широким (0,7...1,05 мкм) спектром випромінювання.

Для контролю наявності прокату в районі гідрозбиву накипу ІОС повинен формуватися в діапазоні 1,2...5,0 мкм, а в якості джерела оптичного сигналу можна застосовувати напівпровідникові лазерні діоди.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевченко В. А. Основы проектирования электронно-оптических систем с искусственным излучателем для фотодетекторов прокатываемого металла / В. А. Шевченко // Информационно-измерительные устройства и системы прокатных станков : сб. науч. работ. – К., 1997. – С. 9–15.
2. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов / Ю. Г. Якушенков. – М. : Логос, 1999. – 500 с.
3. Зуев В. Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере / В. Е. Зуев, М. В. Кабанов. – М. : Сов. радио, 1977. – 368 с.
4. Сус С. П. Особенности проектирования оптических средств контроля наличия изделий в термических установках / С. П. Сус // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – № 1 (43). – С. 92–97.
5. Сус С. П. Контроль положения нагретых изделий оптическим методом / С. П. Сус // Машинобудування очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво : Міжнародної науково-практичної конференції 31 жовтня – 02 листопада 2018 року / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2018. – С. 173–175.
6. Сус С. П. Контроль місцезнаходження нагрітих виробів в термічних установках / С. П. Сус // Міжнародна наукова інтернет-конференція "Інформаційне суспільство : технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 35)". – Тернопіль, 2019. – С. 32–33.