

УДК 621.375.826:621

Дубнюк В.Л., Котляров В.П., д.т.н. проф.; Ворончак Т.П.
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКІСНИХ ПОКАЗНИКІВ ОПЕРАЦІЙ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

Dubnyuk V., Kotlyarov V., Voronchak T.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (kotlyarovv@ukr.net)

APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURON NETWORKS FOR PREDICTION OF LASER TREATMENT OPERATION QUALITATIVE RESULTS

Наведено результати спроби застосування штучних нейронних мереж для прогнозування показників якості операції лазерного поверхневого гартування, зокрема, точності розмірних її результатів. Для рішення задачі використано тришарову мережу прямого поширення сигналів, синтаксис якої в середовищі Matlab має вигляд: Net=netff(minmax(X), [P, S, Q], {logsig, logsig, logsig}). Особливостями обраної парадигми мережі є: різноманітність синапсів за розмірністю та об'єктами діяння; можливість формування груп синапсів за об'єктом їх впливу та залежність рівня синапсів та їх ваг від режимних параметрів реалізації операції, точність якої прогнозується. Для тришарового перцептрон з прямим поширенням сигналів розроблено систему взаємозалежних входів та відповідних синаптичних зв'язків, що дозволило лінеаризувати моделі точності розмірних показників операції за різними схемами її організації. Хоча було отримано допустимий рівень похибки прогнозу, виконана спроба тренування мережі із використанням зворотного поширення сигналу для здійснення її само налагодження шляхом функціонального впливу на вагові коефіцієнти синапсів. Крім того, виявлена структура похибки операції дозволяє цілеспрямовано використовувати нережимні методи та засоби підвищення точності обробки або включати в оптимізаційну модель процесу додаткові функціонали нев'язок для пошуку оптимальних режимів обробки.

Ключові слова: лазер, технологія, точність, похибка, гартування, режими опромінення, нейронна мережа.

Вступ

Вивчення якісних характеристик операцій лазерної обробки, зокрема точності розмірних показників, незалежно від складності операції не може здійснюватися за традиційними методиками аналітичного або математичного опису процесу, які використовуються в процедурі проектування технологічного регламенту операції. Перша методика у будь-якому виконанні не володіє достатньою роздільною здатністю для прогнозування мінливості розмірних показників технологічних операцій лазерної обробки навіть в найпростішому їх виді за переліком складових явищ – операції лазерного зміцнювання поверхневого шару матеріалу заготовки [1, 2, 3]. Інша методика математичного опису процесу обробки за результатами обчислювальних експериментів [4] недостатньо чутлива для урахування коливань режимів обробки та їх впливу на розмірні показники операції, а використання експериментальних (натурних) досліджень процесу обробки для його моделювання відносно показників рівня відтворюваності розмірів оброблювальних елементів пов'язано з великим обсягом повторних іспитів для досягнення достатнього значення довірчої вірогідності α результатів [5].

Таким чином, жоден з відомих методів аналізу процесу лазерної обробки не може бути достатньо ефективним для передвіщення очікуваної точності технологічної операції на етапі її проектування.

Мета досліджень (постановка проблеми)

Необхідність в прогнозованому оцінюванні очікуваної точності операцій лазерної обробки під час їх проектування пов'язана з тим, що цей показник якості вважається найбільш низьким серед конкурентних (нетрадиційних) методів обробки [6]. На сумарну похибку операції впливає багато факторів, які за своїм станом принципово не можуть бути стабільними, в тому числі ті, які складають технологічний регламент операції. Крім того, в залежності від схеми утворення оброблювального елемента заготовки (отвору, пазу, різь або контуру, який вирізається, чи наноситься на її поверхню або в об'єм) в утворенні похибки приймають участь «розмитті» у часі або у просторі нестабільності, наприклад, темпу надання імпульсів випромінювання, швидкості переміщення променя або заготовки, її оптичних властивостей, структури та складу оброблювального матеріалу, тощо. Цей клас похибок можна вважати традиційним для будь-якої технологічної операції, для оцінки їх вкладу в сумарну похибку можна використовувати відомий принцип представлення Технологічної Системи, що Обробляє (ТОС) у вигляді системи, що перетворює її вхідні збудження в

нестабільність досліджуваного розміру (розмірів) [7]. Цей клас похибок майже відсутній в операціях одно імпульсної лазерної обробки отворів, лунок або рисок, в яких відсутні взаємні переміщення інструменту та заготовки під час операції, тому величина сумарної похибки розміру отворів характеризує процес їх формування лазерним променем. В операціях контурного вирізання виробів з листових заготовок або формування в останніх не круглих отворів або з попереком великого розміру за технологічною схемою трепанації, а також в операціях лазерного поверхневого зміцнення до цього додаються похибки реалізації технологічної схеми обробки, які детально розглянуто раніше, і наведені в [8, 9]. Більшу цікавість та цінність складає оцінка похибки обробки, яка пов'язана з діямням променя на заготовку і визначає якість використаного лазерного обладнання та вміння ефективного його застосування, тому наголос потрібно зробити на точності формування окремих елементів, з яких складається технологічний результат обробки. Для операцій лазерного поверхневого загартування цими елементами є зони термічного впливу (ЗТВ), подібні за формою на поверхні заготовки до попереку лазерного променя (кола, прямокутника – для імпульсного режиму його діяння) або подовжений вздовж його руху окремий слід шириною b , з формою та розмірами їх попереку, відповідними до режиму опромінення.

Вважаючи, що використаний в відомих розробках принцип суперпозиції окремих похибок в сумарну величину, за яким створено модель точності, об'єктивно діє спроможний, це дозволило його використати для прогнозування показників якості операцій лазерної обробки. Це підтверджується значенням показника точності $\Delta\Phi$ передвіщень $\Phi(X_i)$ у порівнянні з експериментальним значенням показника точності Y у вигляді середньоквадратичного відхилення $\Delta\Phi = [1/n \sum (\Phi(X_i) - Y)^2]^{1/2}$. Так, для операцій розмірної обробки [5] з шириною поля розсіяння розмірів оброблених отворів діаметром 0,25 мм $Y_d = 51,6$ мкм величина передвіщення похибки операції $\Delta d = 45,5 \pm 15,7$ мкм доводить, що похибка прогнозування склала $\Delta\Phi_d = 16,33$ мкм; для операції контурного вирізання імпульсним випромінюванням [9] за передвіщеною похибкою ширини різку $\Delta b = 48 \pm 23,2$ мкм та шириною експериментального поля розсіяння ширини різку $b = 0,25$ мм $Y_b = 66$ мкм похибка прогнозування склала $\Delta\Phi_b = 29,36$ мкм, а при безперервному опроміненні при $\Delta b = 45,9 \pm 93,6$ мкм та $b = 0,355$ мм $Y_b = 183$ мкм похибка дорівнювала $\Delta\Phi_b = 101,7$ мкм.

Таким чином, зважаючи на одержану точність передвіщення сумарної похибки операцій розмірної і контурної лазерної обробки та достатню інформативність їх моделей точності, розроблених за принципом суперпозиції складових від окремих учасників ТОС, необхідність у виконанні спроби залучення можливостей штучних нейронних мереж (ШНМ) пояснюється наступним:

- можливістю автоматизації процедури корекції технологічного регламенту за результатами зіставлення предикту та цільової функції;
- здатністю ШНМ до навчання шляхом послідовного впливу на чутливості її окремих каналів з оцінкою ступеня зближення предиктів та цільової функції і доведення їх різниці до прийнятно низького рівня.

Перевірка цих можливостей ШНМ присвячена представлена робота, для чого необхідно виконати та дослідити наступне:

- розробити проект ШНМ, мотивовано обираючи її тип, складність, принцип діяння та можливість навчання або самонавчання;
- обґрунтувати вид прогнозу, який найбільш доцільний до використання з метою отримання вірогідних прогнозів;
- наситити проект ШНМ складом взаємозалежних сигналів для вхідного шару нейронів та відповідними синаптичними зв'язками;
- обрати закономірність діяння активаційної функції (лінійну або стискуючу) для корекції вихідних аксонів в кожному з шарів ШНМ;
- виконати апробацію розробленої ШНМ в умовах реальних операцій лазерної поверхневої обробки.

Результати досліджень

1. Обґрунтування концепції структури ШНМ

Разом з традиційними методами прогнозування технологічних об'єктів [5, 7, 8] відносно недавно з'явилася і постійно розвивається теорія штучних нейронних мереж, яка зарекомендувала себе в області управління, там, де необхідне вживання людського інтелекту, зокрема при вирішенні завдань прогнозування

Для розробки проекту нейронної мережі для прогнозного оцінювання точності операцій лазерного поверхневого зміцнення використано пакет Matlab [10]. Нехай є N незалежних (одна від одної) змінних – показників нестабільності складових ТОС (інструменту, обладнання та методів її налагодження) та два залежних показника – сумарна похибка ширини Δb (діаметру Δd для імпульсного формування ЗТВ) та глибини Δz зміцненої зони. Для рішення задачі пропонується використати тришарову мережу прямого поширення сигналів. Сформуємо таку мережу, яка утримує P нейронів у вхідному шарі (за кількістю вхідних змінних), три нейрони у другому (прихованому) шарі та один нейрон у вихідному шарі (для кожного з вихідних показників $\Delta b(\Delta d)$ або Δz).

В середовищі Matlab синтаксис такої нейронної мережі записується наступним чином:

Net=netff(minmax (X), [P, S, Q],{ logsig, logsig, logsig

де:

- $\min\max(X)$ - масив мінімальних та максимальних значень для складових \vec{X} вектору входу;
 - N - кількість входів нейронної мережі (ШНМ);
 - P – кількість нейронів у вхідному шарі
 - S - кількість нейронів у прихованому шарі;
 - Q - кількість виходів ШНМ.
 - для кожного шару обрано активаційну логістичну (стискуючу або сігмоїдальну) функцію *logsig* .
- Методом розрахунку величини похибки ШНМ обрано метод найменших квадратів, тоді ця функція буде мати вигляд:

Net.performFcn='SSE'

На рис. 1 зображено перцептрон (предиктор типу P-S-Q) для виконання короткострокових прогнозів (предиктив), які будуються на фактичних даних матриці \vec{X}_ϕ , тому мають найвищу точність передвіщення.

Особливістю обраної парадигми є:

- різноманітність синапсів за розмірністю та напрямленістю діяння;
- можливість формування груп синапсів за об'єктом їх впливу;
- залежність рівня синапсів та їх ваг (синаптичних зв'язків) від загальних параметрів функціонування процесу, точність якого прогнозується;
- можливий зворотній зв'язок між виходом перцептрона або його складових шарів та відповідних синаптичних зв'язків, який необхідний для мінімізації середньоквадратичної похибки між виходом мережі OUT та встановленим критерієм $[OUT]: E = 0,5(OUT - [OUT])^2$;
- можливість оптимізації технологічного регламенту виконання операції зберігається не лише за рахунок використання нережимних шляхів діяння на процес обробки, а й застосуванням виходів OUT_1 ; OUT_2 та OUT_3 прихованого шару для їх мінімізації методами непрямої оптимізації [11] в якості додаткових напрямів впливу.

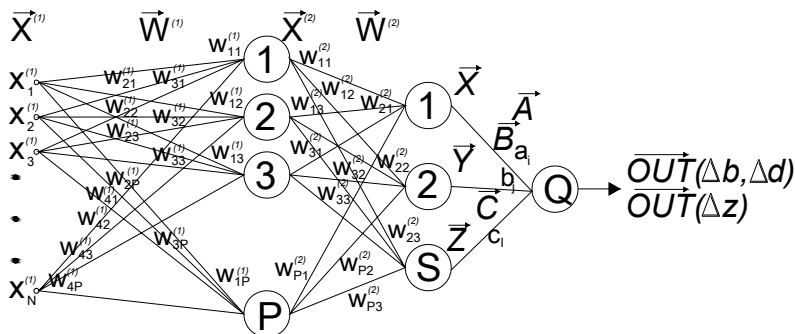


Рис. 1. Трьох шаровий перцептрон для прогнозування показників точності операції лазерного поверхневого зміцнення

Для надання обраній парадигмі нейронної мережі робочого стану необхідно її наситити, по перше, складом *взаємозалежних* входів (з вектором \vec{X}) для вхідного шару нейронів, тобто деякою сукупністю випадкових величин $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, за якими можливе спостереження та які в даному контексті є пророчими (або прогнозними) змінними, а також відповідними синаптичними зв'язками $\vec{W}_{ij}^{(1)}, \vec{W}_{ij}^{(2)}$ та $\vec{A}, \vec{B}, \vec{C}$.

2. Особливості інформаційного забезпечення мережі

Зважаючи на вимоги до умов функціонування нейронних мереж (ШНМ), зокрема, до синапсів вхідного шару $\vec{X}^{(1)}$ та їх синаптичних зв'язків потрібно визначити взаємно незалежні джерела нестабільностей учасників ТОС та їх ваги $\vec{W}^{(1)}$. Основними складовими сумарної похибки є похибки, що створюються недосконалістю і нестабільністю інструменту і устаткування, похибками технологічних прийомів, які використані в технологічній операції, та нестабільністю процесів взаємодії випромінювання з матеріалом заготовок внаслідок варіації властивостей останніх. В роботі [12] наведено схему формування сумарної похибки операцій лазерної поверхневої обробки, а також приведено джерела виникнення її складових.

Як видно із схеми формування сумарної похибки технологічної операції поверхневого зміцнення лазерним променем [12], її наявність визначається коливанням інтенсивності випромінювання в зоні опромінення ΔI_p , до якої також додаються похибки, що вносяться нестабільністю процесів, відповідних за створення зон термічного впливу (ЗТВ) в матеріалі заготовки, і які залежать від характеристик заготовки та властивостей її матеріалу. На підставі аналізу складових сумарної похибки можна визначити перелік вхідних сигналів $\vec{X}^{(1)}$ ($x_1^{(1)} \dots x_4^{(1)}$ - інструменту; $x_5^{(1)} \dots x_{13}^{(1)}$ - технологічних прийомів; $x_{14}^{(1)} \dots x_{16}^{(1)}$ - заготовки) у вигляді початкових збуджень ТОС через канали впливу на процес обробки інструментом, діями технологічного регламенту та

властивостями заготовки, які можна встановити із схеми накопичення їх недосконалостей:

1. Нестабільність комплексної характеристики процесу обробки, від рівня якої залежить вид взаємодії променя та матеріалу заготовки, - густини потужності теплового джерела $\Delta W_p = A\Delta I_p$ - визначається:

- варіацією довжини хвилі випромінювання λ під час обробки;
- величиною коливання імпульсної енергії ΔE і тривалості дії $\Delta t = \Delta t$ або потужності випромінювання ΔP (для безперервного режиму подачі випромінювання);
- нестабільністю просторово-кутових характеристик променя: його діаметру та кута розбіжності $\Delta D, \Delta\theta$;
- флуктуацією просторової структури променя;
- похибками технологічних прийомів та обладнання, на якому вони виконуються, що впливають на:
 - o стабільність форми і розмірів каустики перетвореного в інструмент променя $\sigma_{d\Delta F}$;
 - o положення в ній заготовки ΔF ;
 - o стабільність швидкості робочої подачі ΔV .

2. Нестабільності процесу формування ЗТВ в матеріалі заготовки також додають (за незмінного рівня інших умов обробки) нестабільності параметрів заготовки Δzag (її поверхні A , матеріалу і розмірів):

- нестабільність в межах поверхні, що обробляється, та в партії заготовок її оптичних властивостей, за якою варіюється густина потужності теплового джерела ΔW_p та результати його дії;
- таким же чином впливають нестабільності теплофізичних властивостей матеріалу заготовки (ρ, k, c та a), які відповідають за відведення та використання енергії теплового джерела;
- нестабільність теплових процесів в матеріалі заготовки, зокрема швидкості його нагрівання, призводить до невизначеності рівнів критичних температур $T_{кр}$, перевищення яких потрібні для забезпечення обраних структурних перетворень в матеріалі, тобто до коливання форми та розмірів ЗТВ.

3. Математичне моделювання показників точності розмірних характеристик технологічної операції лазерного зміцнення

Першим етапом побудови математичної моделі технологічної операції є вибір для неї вигляду залежності показника якості обробки від впливаючих чинників. Дана функція повинна відображати характерні зв'язки, властиві процесу, зокрема імовірнісний характер складових її параметрів і мати, по можливості, простий (у статистичному сенсі) вигляд.

Для її побудови з метою прогнозування показників точності та оптимізації технологічного регламенту операції було використано нейронну мережу у вигляді асинхронної, багатoshарової ШНМ прямого поширення сигналів у парадигмі (рис.2), яка відповідає коментаріям до ШНМ, зображеній на рис.1, та враховує структуру сумарної похибки та склад вектора – матриці вхідних сигналів відповідно до схеми її утворення, яку наведено в [12]. В результаті її діяння результати прогнозу будуть представлені у вигляді $OUT = F(NET)$, де F – активізаційна функція, яка перетворює вихідний сигнал суматорів NET ($NET = \vec{X} \cdot \vec{W}$ - лінеаризована функція на виході суматора останнього шару ШНМ) у вихідний сигнал нейронів OUT :

$$\Delta b (\Delta d); \Delta z = \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{j=1}^m b_j y_j + \sum_{l=1}^k c_l z_l \quad (1)$$

де: $\vec{X}^{(2)}(x_1...x_i...x_n), \vec{Y}^{(2)}(y_1...y_j...y_m), \vec{Z}^{(2)}(z_1...z_l...z_k)$ - вхідні змінні на синапсах прихованого шару ШНМ, тобто аксони першого шару та оцінюють вклад недоліків інструменту, технологічних прийомів та заготовок в партії в сумарну похибка. Використані в моделі синаптичні коефіцієнти прихованого шару:

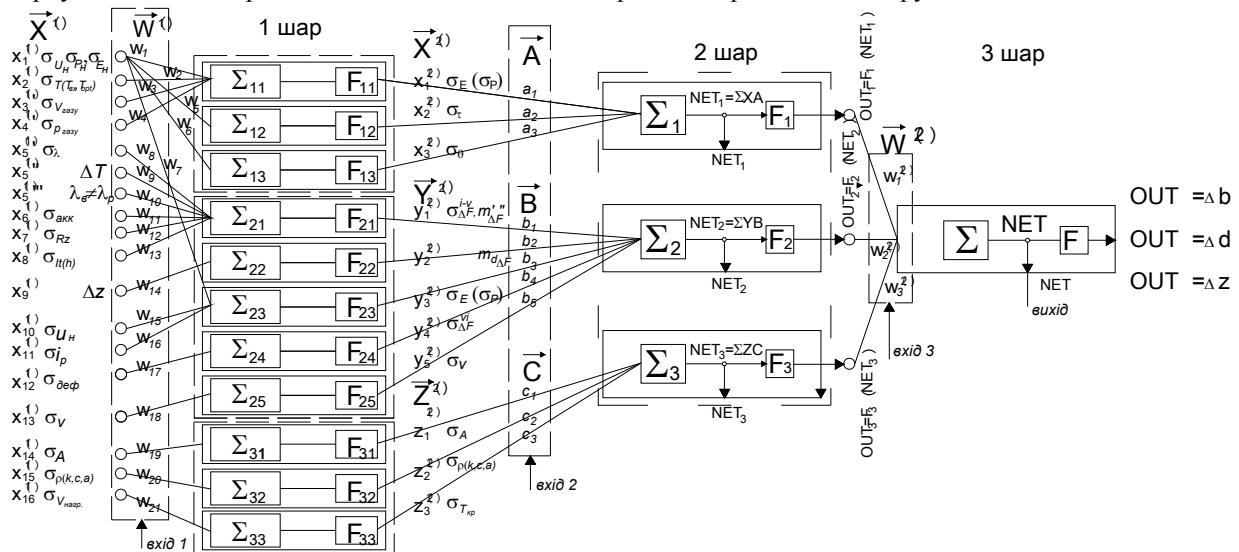


Рис. 2. Схема асинхронної багатoshарової ШНМ: перший шар – вхідний з одинадцятьма нейронами; другий шар – прихований з трьома нейронами; третій шар – вихідний з одним нейроном

$a_i; b_j; c_l$ є ваговими (та перетворюючими розмірність) коефіцієнтами, які разом з коефіцієнтами $\vec{W}^{(l)}$ вхідного шару ШНМ визначають вплив вхідних сигналів \vec{X} на предикти OUT.

Враховуючи випадковий характер величин синапсів та аксонів, модель (1) є лінійною функцією випадкових величин, її числові характеристики (математичне очікування $m\Delta b$ (Δd ; Δz) та дисперсія $D\Delta b$ (Δd ; Δz)) можуть бути визначені як для функції декількох взаємно незалежних випадкових аргументів [13] із рівнянь (2) та (3). Лінеаризація рівняння (1) за рахунок взаємної незалежності змінних $x_i; y_j; z_l$ досягається за умови достатнього рівня деталізації складових сумарної похибки і виявлення їх початкових джерел.

$$m\Delta b(\Delta d); m\Delta z = \sum_{i=1}^n a_i m x_i + \sum_{j=1}^m b_j m y_j + \sum_{l=1}^k c_l m z_l \quad (2)$$

$$D\Delta b(\Delta d); D\Delta z = \sum_{i=1}^n a_i^2 D x_i + \sum_{j=1}^m b_j^2 D y_j + \sum_{l=1}^k c_l^2 D z_l \quad (3)$$

які пов'язані співвідношенням (для нормального закону розподілу):

$$\Delta b(\Delta d, \Delta z) = m\Delta b(\Delta d, \Delta z) \pm 3[D\Delta b(\Delta d, \Delta z)]^{1/2} \quad (4)$$

4. Аналіз джерел складових сумарної похибки операції лазерної поверхневої зміцнюючої обробки

Джерела початкових нестабільностей були встановлено в результаті досліджень особливостей роботи лазерного технологічного устаткування, специфіки побудови технологічних операцій лазерної поверхневої зміцнюючої обробки та звичайних для заготовки властивостей, включаючи її матеріал (табл.1 та табл.2).

В таблиці прийняті наступні позначення:

- $\sigma_{U_n(E_n)} = m\bar{U}_{n\bullet}(E_n)/6$ стандартне відхилення напруги U_n (енергії E_n) накачування (m – точність вимірювача: вольтметра, калориметру), n_E – перевищення енергії накачування порогового рівня);

- $\sigma_T(\sigma_{T_{ак}}, \sigma_{V_{газ}}, \sigma_p, \sigma_\lambda, \sigma_{\Delta F}, \sigma_{I_p}, \sigma_A) = \Delta T/6(\Delta T_{вх}, \Delta V_{газ}, \Delta p, \Delta \lambda, (R_z, It(h)), \Delta I_p, \Delta A)$ – стандартне відхилення температури активного середовища та на вході в ГРК під час генерації; швидкості прокачування газу в ГРК лазера та тиску в ній; довжини хвилі променя; зміщення поверхні заготовки вздовж променя (Зм); розрядного струму в ГРК; поглинальної здатності поверхні заготовки (ΔT – інтервал змінення температури активного середовища під час дії імпульсу накачування ($\bar{E}_\bullet, \bar{T}_\bullet$) – середнє значення імпульсної енергії випромінювання та температури активного середовища, n_T – перевищення максимальної температури $T_{макс}$ активного середовища, за якої можлива генерація, над середнім її значенням (\bar{T}_\bullet)); $\Delta V_{газ}$ – нестабільність швидкості прокачування газу через ГРК; тиску в останній; ширини спектру генерації лазера $\Delta \lambda$; похибки позиціонування заготовки відносно променя (внаслідок шорсткості поверхні заготовки, допуску на замикаючу ланку розмірного ланцюгу, в який входить розмір заготовки між її базовими поверхнями); варіації розрядного струму в ГРК та поглинальної здатності поверхні заготовки в межах оброблювальної поверхні);

- $\sigma_{E_n(P_n, V_{деф})} = \delta_{E_n}(\delta_{P_n}, \delta_V, \delta_{деф}) \times \bar{E}_\bullet(\bar{P}_\bullet, \bar{V}_\bullet, L)/600$ – стандартне відхилення енергії (потужності) накачування, швидкості подачі та деформації заготовки (відносна нестабільність енергії та потужності накачування, швидкості подачі та не площинності поверхні заготовки (%));

- $\sigma_{ак, T_{ак}, \Gamma, A_n}$ – стандартне відхилення поверхні заготовки при її розташуванні відносно променя візуальним методом, величина акомодатії, збільшення наглядної системи, A_n – числа апертура об'єктиву;

- $\Delta U_{n\bullet}(\Delta I_p), \Delta U_{n\bullet}(\Delta I_p), \Delta U_{рег}(\Delta I_{рег})$ – похибка налагодження режиму (НР): рівня напруги накачування (розрядного струму), ціна поділу вольтметра (амперметра), дискретність регулювання напруги (струму);

- $m_{\Delta F}$ – математичне очікування положення поверхні заготовки в каустиці лазерного променя, перетвореного лінзою (об'єктивом) з фокусною відстанню F (θ кут розбіжності променя, $\chi = \chi_1 + \chi_2 + \chi_3$ – коефіцієнти температурної залежності показника заломлення матеріалу лінзи n , неоднорідності термічного розширення і пружно оптичного ефекту, β – коефіцієнт його об'ємного поглинання [14] та k – теплопровідність; d_l – товщина лінзи, D_l – її діаметр, Z – відстань від перетяжки каустики резонатора лазера w_0 до головної площини лінзи, w_z – радіус пучка на відстані Z ; Z_l – мінімальна відстань лінзи від резонатора, ΔZ – величина переміщення лінзи від мінімальної відстані Z_l ; L_e – довжина конфокального резонатора лазера, еквівалентного реальному ($L_e = (2RL - L^2)^{1/2}$ (R, L – радіус кривизни дзеркал резонатора, його довжина); $P_n, P_{ноп}$ – потужність накачування активного середовища та її пороговий рівень; $n_{\lambda_0}, n_{\lambda_0}$ – показники заломлення матеріалу лінзи для основного та додаткового лазерного променя, $n_{\lambda_\bullet}, n_{\lambda_\bullet \pm 3\sigma_\lambda}$ – показники заломлення матеріалу лінзи для середньої, найменшої та найбільшої довжини хвиль із спектру генерації лазера

- h_p, L_a – висота та довжина розрядної камери газового лазера; $\varepsilon, p_0, \eta_{eo}, \tau_\mu, \gamma, \pi, \xi, U_n, U_0, V_{ГРК}, T_{оп}, R$ – параметри ГРК газового лазера з конвективним охолодженням (див.[15]).

Аксони першого шару ШНМ за таким сполученням його синапсів та вагових коефіцієнтів складуть

систему залежних від вхідних нестабільностей показників варіації параметрів складових ТОС $\bar{X}^{(2)}, \bar{Y}^{(2)}, \bar{Z}^{(2)}$ (рис.2). Для їх об'єднання в групи похибок розмірів оброблених елементів заготовки відповідно до учасників ТОС матриця синаптичних коефіцієнтів прихованого шару (\bar{A}, \bar{B} і \bar{C}) повинні виконувати також роль перетворюючих величин, трансформуючи нестабільність параметрів обробки в похибку відповідного показника, в нашому випадку – розмірів ЗТВ (ширини b та глибини h) після лазерної обробки (табл.2).

Таблиця 1

Параметри синапсів та синаптичних коефіцієнтів першого шару ШНМ

$\bar{X}^{(1)}$	Початкові нестабільності (синапси)	$\bar{W}^{(1)}$	Синаптичні коефіцієнти	Примітки
Нестабільності характеристик інструменту (лазерного променя)				
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{U_n} = m \times \bar{U}_{n\bullet} / 600$	$w_1^{(1)}$	$2En_E(U_n \sigma_{U_n} + 3\sigma_{U_n}^2) / [U_n^2(n_E - 1)]$	імпульсні твердотільні лазери
$x_2^{(1)}$	$\sigma_T = \Delta T / 6$	$w_2^{(1)}$	$2\bar{E}_\bullet / [\bar{T}_\bullet(n_T^2 - 1)]$	
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{E_n} = \delta_{E_n} \times \bar{E}_{n\bullet} / 600$	$w_1^{(1)}$	$\{[(\varepsilon/p_0)h_p] \eta_{eo} / [(\varepsilon/p_0)h_p + U_n + U_0]\}$	імпульсні конвективні газові лазери на CO ₂
$x_2^{(1)}$	$\sigma_{Tex} = \Delta T_{ex} / 6$	$w_2^{(1)}$	$[-c_{zaz} \rho_{zaz} V_{ГPK} \eta_{eo}]$	
$x_3^{(1)}$	$\sigma_{V_{zaz}} = \Delta V_{zaz} / 6$	$w_3^{(1)}$	$[(T_{opt} - T_{ex})c_{zaz} \rho_{zaz} h_p L_a \tau \eta_{eo}]$	
$x_4^{(1)}$	$\sigma_p = \Delta p / 6$	$w_4^{(1)}$	$[(T_{opt} - T_{ex})c_{zaz} h_p L_a V_{zaz} \tau \eta_{eo} / RT_{opt}]$	
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{P_n} = \delta_{P_n} \times \bar{P}_{n\bullet} / 600$	$w_1^{(1)}$	$\{[(\varepsilon/p_0)h_p] \eta_{eo} / [(\varepsilon/p_0)h_p + U_n + U_0]\}$	безперервні конвективні газові лазери на CO ₂
$x_2^{(1)}$	$\sigma_{Tex} = \Delta T_{ex} / 6$	$w_2^{(1)}$	$[-c_{zaz} \rho_{zaz} V_{ГPK} \eta_{eo}]$	
$x_3^{(1)}$	$\sigma_{V_{zaz}} = \Delta V_{zaz} / 6$	$w_3^{(1)}$	$[(T_{opt} - T_{ex})c_{zaz} \rho_{zaz} h_p L_a \eta_{eo}]$	
$x_4^{(1)}$	$\sigma_p = \Delta p / 6$	$w_4^{(1)}$	$[(T_{opt} - T_{ex})c_{zaz} h_p L_a V_{zaz} \eta_{eo} / RT_{opt}]$	
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{U_n} = m \times \bar{U}_{n\bullet} / 600$	$w_5^{(1)}$	$[2\bar{\tau}_\bullet \tau_\mu / (\bar{U}_n n_E \bar{\tau}_{n\bullet})]$	імпульсний твердотільний лазер
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{E_n} = \delta_{E_n} \times \bar{E}_{n\bullet} / 600$	$w_5^{(1)}$	$[2\gamma / \{P_{nop} / \ln[1/(1 - \varpi - \xi)]\}]$	імпульсний газовий лазер
$x_1^{(1)}$	$\sigma_{P_n} = \delta_{P_n} \times \bar{P}_{n\bullet} / 600$ ($\bar{P}_{n\bullet} = \bar{E}_{n\bullet} \times f$)	$w_6^{(1)}$	$\{4\sqrt{\lambda} / L_{екв} P_{nop} / [P_n^4 (P_n - P_{nop})^2]^{1/3}\}$	твердотільні та газові лазери
Нестабільності технологічних прийомів при виконанні операції				
$x_5^{(1)}$	$\sigma_\lambda = \Delta \lambda / 6$	$w_8^{(1)}$	$\{F_{\lambda_\bullet}^- (n_{\lambda_\bullet}^- - 1) [1 / (n_{\lambda_\bullet}^- + 3\sigma_\lambda) - 1] - (n_{\lambda_\bullet}^- - 3\sigma_\lambda) - 1\}$	
$x_5^{(1)}$	$\bar{m}'_{\Delta F} = w_8^{(1)} x_5^{(1)} = \bar{P}_\bullet \beta \theta \chi_{d_n} (F^2 - Z \Delta F) (1 + 2 \ln [D_n / w_z]) / \{F w_z [(w_0 \Delta F)^2 + (\Delta F^2 - \theta Z \Delta F)^2]^{1/2} k\}$			
$x_5^{(1)}$	$m'''_{\Delta F} = w_{10} x_5^{(1)} = \{1 - [n_{\lambda_p} (n_{\lambda_o} - 1)^2] / [n_{\lambda_o} (n_{\lambda_p} - 1)^2] F_{\lambda_o}\}$			
$x_6^{(1)}$	$\sigma''_{\Delta F} = \sigma_{ak} = T_{ak} / 6 = 42 / \Gamma^2 + 1.80 A \Gamma + 1.1.24000 A^2$	$w_{11}^{(1)}$	1	
$x_7^{(1)}$	$\sigma''_{\Delta F} = R_z (R_a) / 6$	$w_{12}^{(1)}$	1	
$x_8^{(1)}$	$\sigma''_{\Delta F} = It(h) / 6$	$w_{13}^{(1)}$	1	
$x_9^{(1)}$	$m''_{\Delta F} = w_{14}^{(1)} x_9^{(1)} = \frac{\theta}{2F} \left[\left(\frac{2w_0 \Delta F}{F} \right)^2 + \left(\theta F - \frac{\theta Z_1}{F} \Delta F \right)^2 \right]^{1/2} \left(\theta F - \frac{\theta Z_1}{F} \Delta F \right) (\Delta Z) + A_a \frac{w_0^3}{F^2} \left\{ \left[1 + \left(2(Z_1 + \Delta Z) / L_e \right)^2 \right]^{3/2} - \left[2Z_1 / L_e \right]^2 \right\}$			
$x_{10}^{(1)}$	$\sigma''_{U_n} = \Delta U_n / 6 = (0.5L \eta_U + \Delta U_{pez} + m \times \bar{U}_\bullet) / 6$	$w_{15}^{(1)}$	1	
$x_{11}^{(1)}$	$\sigma''_{I_p} = \Delta I_p / 6 = (0.5L \eta_p + \Delta I_{pez} + m \times \bar{I}_\bullet) / 6$	$w_{16}^{(1)}$	1	
$x_{12}^{(1)}$	$\sigma_{def} = \delta_{def} \times L / 600$	$w_{17}^{(1)}$	1	
$x_{13}^{(1)}$	$\sigma_V = \delta_V \times \bar{V}_\bullet / 600$	$w_{18}^{(1)}$	1	
Нестабільності властивостей заготовки				
$x_{14}^{(1)}$	$\sigma_A = (A_{окс} - A_{мат}) / 6 = \Delta A / 6$	$w_{19}^{(1)}$	1	
$x_{16}^{(1)}$	$\sigma_{V_n} = 4A \sqrt{a / (\tau \pi)^3} e^{-Z^2 / 4a\tau} / kd_0^2 J \sigma_{E_n}$	$w_{21}^{(1)}$	$[1/3 (3k^2 a_0^2 / 4DV_n^2)^{1/3}]$	імпульсне опромінення
$x_{16}^{(1)}$	$\sigma_{V_n} = 4A \sqrt{a / \pi^3 t} / kd_0^2 J \sigma_{P_n}$	$w_{21}^{(1)}$		безперервне опромінення

Таблиця 2

Залежності для розрахунку синаптичних коефіцієнтів прихованого шару персептрона (рис.2) ШНМ

Коеф. $\bar{A} \bar{B} \bar{C}$	Розрахункові залежності	Умови обробки
a_{b1}	$2(16a\tau + d_{\Delta F}^2)^{1/2} (\pi d_{\Delta F}^2 \tau A I_p)^{-1} \{ \ln[A I_p d / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	Імпульсне опромінення при рівномірному розподілу інтенсивності на поверхні зони опромінення заготовки (ТЕМ _{mn}). $d \gg 2\sqrt{a\tau}$ для 1...10 $d = \sqrt{2}d_p$; для 11...19: $d = d_p$
a_{b2}	$\{ d_{\Delta F}^2 + 32a\tau \ln[A I_p d_{\Delta F} / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \} (4\tau)^{-1} \{ (16a\tau + d_{\Delta F}^2) \times \ln[A I_p d_{\Delta F}^2 / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
a_{b3}	$F \{ 8a\tau + d_{\Delta F}^2 \ln[2A I_p d_{\Delta F} / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \} d_{\Delta F}^{-1} \{ (16a\tau + d_{\Delta F}^2) \times \ln[A I_p d_{\Delta F} / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
b_{b1}	$DF^{-1} d_{\Delta F}^{-1} \{ 8a\tau / V + d_{\Delta F}^2 \ln[2A I_p d_{\Delta F} / 2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau}] \} \{ (16a\tau + d_{\Delta F}^2) \ln[A I_p d_{\Delta F} / (d_{\Delta F} kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
b_{b2}	$2A I_p d_{\Delta F}^2 k T_{3M} / a\tau \{ 16a\tau + (d_{\Delta F}^2 / a\tau) \}^{1/2}$	
b_{b3}=a_{b1}	$2(16a\tau + d_{\Delta F}^2)^{1/2} (\pi d_{\Delta F}^2 \tau A I_p)^{-1} \{ \ln[A I_p d / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
b_{b4}=b_{b1}	$DF^{-1} d_{\Delta F}^{-1} \{ 8a\tau / V + d_{\Delta F}^2 \ln[2A I_p d_{\Delta F} / 2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau}] \} \{ (16a\tau + d_{\Delta F}^2) \ln[A I_p d_{\Delta F} / (d_{\Delta F} kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
b_{b4'}=b_{b1}	$DF^{-1} d_{\Delta F}^{-1} \{ 8a\tau / V + d_{\Delta F}^2 \ln[2A I_p d_{\Delta F} / 2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau}] \} \{ (16a\tau + d_{\Delta F}^2) \ln[A I_p d_{\Delta F} / (d_{\Delta F} kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
c_{b1}=a_{b1}	$2(16a\tau + d_{\Delta F}^2)^{1/2} (\pi d_{\Delta F}^2 \tau A I_p)^{-1} \{ \ln[A I_p d / (2kT_{3M} \sqrt{16 + d_{\Delta F}^2 / a\tau})] \}^{-1/2}$	
c_{b3}	$-0,5T_{3M}^{-1} (16ad_{\Delta F} / V + d_{\Delta F}^2)^{1/2} \{ \ln[2AE / \pi d_{\Delta F}^2 k T_{3M} \sqrt{16 + Vd_{\Delta F} / \tau}] \}^{-1/2}$	
a_{z1}	$4T_{3M} k (A I_p^2 \tau d_{\Delta F}^2)^{-1}$	
a_{z2}	$(a/\pi\tau)^{1/2} - kT_{3M} / A I_p \tau$	
a_{z3}	$-2kT_{3M} / A I_p d_{\Delta F}$	
b_{z1}	$-2kT_{3M} D / A I_p F d_{\Delta F}$	
b_{z2}	$a\tau [1/d_{\Delta F} - d_{\Delta F} / (8a\tau + d_{\Delta F}^2)] / \{ a\tau \ln(A I_p \pi d_{\Delta F} / 8kT_{3M} [1 + d_{\Delta F}^2 / 8a\tau]) \}^{1/2}$	
b_{z3}=a_{z1}	$4T_{3M} k (A I_p^2 \tau d_{\Delta F}^2)^{-1}$	
b_{z4}=b_{z1}	$-2kT_{3M} D / A I_p F d_{\Delta F}$	
c_{z1}=a_{z1}	$4T_{3M} k (A I_p^2 \tau d_{\Delta F}^2)^{-1}$	
c_{z3}	$-2a\tau / \{ T_{3M} [4a\tau \ln(A I_p \pi d_{\Delta F} / 8T_{3M} k (1 + d_{\Delta F}^2 / 8a\tau))^{1/2}] \}^{1/2}$	
a_{b1}	$(\pi d_{\Delta F})^{-1} (8/eV\tau T_{3M} A I_p)^{1/2}$	Безперервний режим опромінення при рівномірному розподілу інтенсивності на поверхні зони опромінення заготовки
a_{b3}	$F(2A I_p / eV\tau T_{3M})^{1/2}$	
b_{b1}	$DF^{-1} (2A I_p / eV\tau T_{3M})^{1/2}$	
b_{b2}	$2(2A I_p / \pi eV\tau T_{3M})^{1/2}$	
b_{b3}=a_{b1}	$(\pi d)^{-1} (8/eV\tau T_{3M} A I_p)^{1/2}$	
b_{b4}=b_{b1}	$DF^{-1} (2A I_p / eV\tau T_{3M})^{1/2}$	
b_{b5}	$-d_{\Delta F} (2A I_p / \pi eV^3 \tau T_{3M})^{1/2}$	
c_{b1}=a_{b1}	$(\pi d)^{-1} (8/eV\tau T_{3M} A I_p)^{1/2}$	
c_{b3}	$-d_{\Delta F} (2A I_p / \pi eV\tau T_{3M})^{1/2}$	
a_{z1}	$8/3 \times (T_{nl} - T_{3M}) (\pi T_{nl})^{-1} \{ 2a^2 \gamma / (V^2 A^2 I_p^2 \pi^2 d_{\Delta F}^4 k T_{nl}) \}^{1/3}$	
a_{z3}	$(8F/3) (T_{nl} - T_{3M}) T_{nl}^{-1} [a^2 \gamma A I_p / (4\pi^2 k T_{nl} V^2 d_{\Delta F})]^{1/3}$	
b_{z1}	$(2D/3F) (T_{nl} - T_{3M}) T_{nl}^{-1} (a^2 \gamma A I_p / (4\pi^2 k T_{nl} V^2 d_{\Delta F}))^{1/3}$	
b_{z2}	$2/3 \times (T_{nl} - T_{3M}) (8a)^{2/3} (\pi T_{nl}^2 V)^{-2/3} [\gamma A I_p / (4kd_{\Delta F})]^{1/3}$	
b_{z3}=a_{z1}	$8/3 \times (T_{nl} - T_{3M}) (\pi T_{nl})^{-1} \{ 2a^2 \gamma / (V^2 A^2 I_p^2 \pi^2 d_{\Delta F}^4 k T_{nl}) \}^{1/3}$	
b_{z4}=b_{z1}	$(2D/3F) (T_{nl} - T_{3M}) T_{nl}^{-1} (a^2 \gamma A I_p / (4\pi^2 k T_{nl} V^2 d_{\Delta F}))^{1/3}$	
b_{z5}	$-8/3 \times (T_{nl} - T_{3M}) (V T_{nl})^{-1} [(a^2 d_{\Delta F}^4 \gamma A I_p / (4\pi^2 T_{nl} k V^2))]^{1/3}$	
c_{z1}=a_{z1}	$8/3 \times (T_{nl} - T_{3M}) (\pi T_{nl})^{-1} \{ 2a^2 \gamma / (V^2 A^2 I_p^2 \pi^2 d_{\Delta F}^4 k T_{nl}) \}^{1/3}$	
c_{z3}	$-(4/T_{nl}) [a^2 \gamma d_{\Delta F} A I_p / (4\pi^2 V^2 k T_{nl})]^{1/3}$	

5. Прогнозування точності операції поверхневого лазерного зміцнення

Використовуючи схему формування сумарної похибки та структуру створеної ШНМ (рис.2), включаючи розроблену систему початкових нестабільностей ТОС, тобто входних синапсів мережі, для визначених та випробуваних режимів технологічної операції (табл.3), запрогнозовано складові та сумарну похибку операцій лазерної поверхневої зміцнюючої обробки. До входних синапсів прихованого шару, що визначають нестабільності учасників ТОС застосовано вагові коефіцієнти \vec{A} , \vec{B} і \vec{C} , для визначення яких використано аналітичні моделі процесу обробки відносно ширини та глибини ЗТВ $b, z = f(E(P), \tau, \theta, \dots)$ за схемою: $a_{b1} = \frac{\partial d}{\partial E}; a_{b2} = \frac{\partial d}{\partial \tau}; a_{b3} = \frac{\partial d}{\partial \theta} \dots b_{z1} = \frac{\partial z}{\partial (\Delta F)}; b_{z2} = \frac{\partial z}{\partial (d_{\Delta F})} \dots b_1 = \frac{\partial b}{\partial P} = \frac{1}{A} a_{b1}; c_{b3} = \frac{\partial b}{\partial (T_{кр})}$ і т.д. Залежності для їх розрахунків можна знайти в [12].

Таблиця 3

Режими виконання операції операції лазерної поверхневого зміцнення при імпульсному та безперервному опроміненні заготовки

№ з/п	Параметр обробки	Величина	Розмірність	Значення	
				імпульсний режим	безперервн. режим
1	Випромінювач (ЛТУ)	-	-	Квант-15	ТЛ-1,5
2	Активне середовище випромінювача: тип розміри	- $H \times D \times L$	- мм	YAG:Nd ³⁺ ø8×120	CO ₂ 30×100× 1150
3	Розподіл інтенсивності в промені	-	-	рівномірне	
4	Резонатор випромінювача: дзеркало 1 дзеркало 2 довжина	R_1 R_2 L_p	мм	1200 1200 560	24.10 ³ 3.10 ⁴ 6800
5	Ємність Формуючої Лінії Накачування (ФЛН)	C	мкФ	2000	-
6	Індуктивність ФЛН	L	мкГн	1000	-
7	Напруга накачування	U_n	В	2200±22	1495±15
8	Розрядний струм	I_p	А	-	16
9	Імпульсна енергія випромінювання	E	Дж	40	-0
10	Потужність випромінювання	P	Вт	-	1500±30
11	Тривалість імпульсу випромінювання	τ	с	4×10 ⁻³	-0
12	Частота надходження імпульсів	f	Гц	10±0,25	-
13	Кут розбіжності променя	θ	рад	6.10 ⁻³	1,4.10 ⁻³
14	Діаметр променя	D	мм	8	19
15	Телескоп: збільшення	Γ	раз	1,5	-
16	Фокусна відстань перетворюючої лінзи	F	мм	70	150
17	Положення поверхні заготовки в каустиці променя відносно її горловини	ΔF	мм	+18,5±0,1	+15,0±0,1
18	Діаметр променя на поверхні заготовки	$d_{\Delta F}$	мм	3,6	3,1
19	Густина енергії в зоні опромінення	W_E	Дж/см ²	400	4769
20	Інтенсивність променя на поверхні заготовки	I_p	Вт/см ²	10 ⁵	10 ⁴
21	Швидкість відносного переміщення променя та заготовки	V	м/хв	0,13±0,01	0,8±0,02
22	Коефіцієнт перекриття	k_n	-	0,6	0,8
23	Заготовка: матеріал температура зміцнення розміри поверхні, що зміцнюється поглинальне покриття поверхні, що зміцнюється шорсткість поверхні в зоні опромінення	- $T_{zm} + \Delta T$ $b \times l$ - R_a	- °C мм - мкм	У8(норм) 760+151 25×100 без покриття ≤ 2,5	У8(норм) 760+140 40×1500 оксидування ≤ 2,5
24	Розміри попереку зони зміцнення	$b \times z$	мм	6,28×0,155	5,1×2,17
25	Кількість проходів в межах зони зміцнення	n	шт.	6	6

На рис. 3 та 4 зображено графічні структури сумарних похибок операцій поверхневого лазерного зміцнення при імпульсному та безперервному опроміненні заготовки.

Аналіз даних розрахунків та структури сумарної похибки (рис.3 та 4) дозволяє оцінити дієздатність отриманих моделей точності операцій імпульсного та безперервного режимів операцій поверхневого лазерного зміцнення, порівнюючи їх із експериментальними даними та подібними результатами для інших видів технологічних операцій лазерної обробки. Його результати викладено у висновках та рекомендаціях.

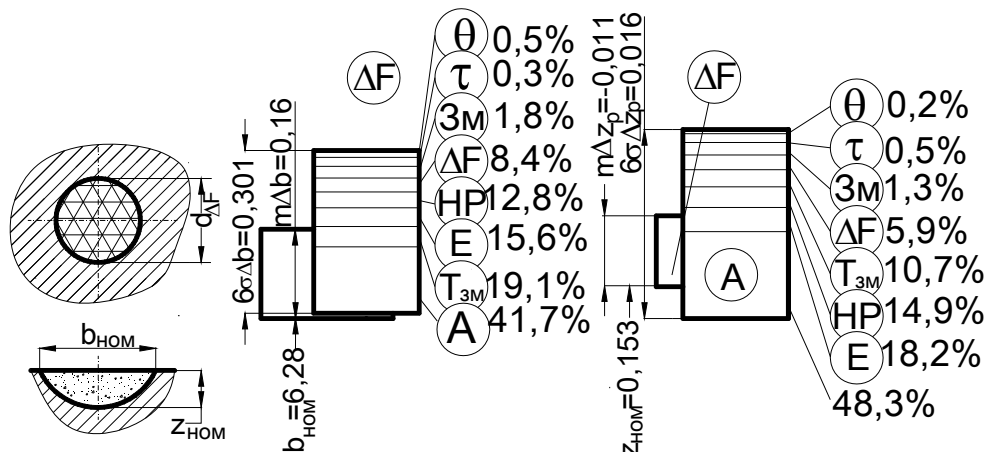


Рис. 3. Схема формування зони зміцнення та структура сумарної похибки операції лазерного імпульсного опромінення поверхні

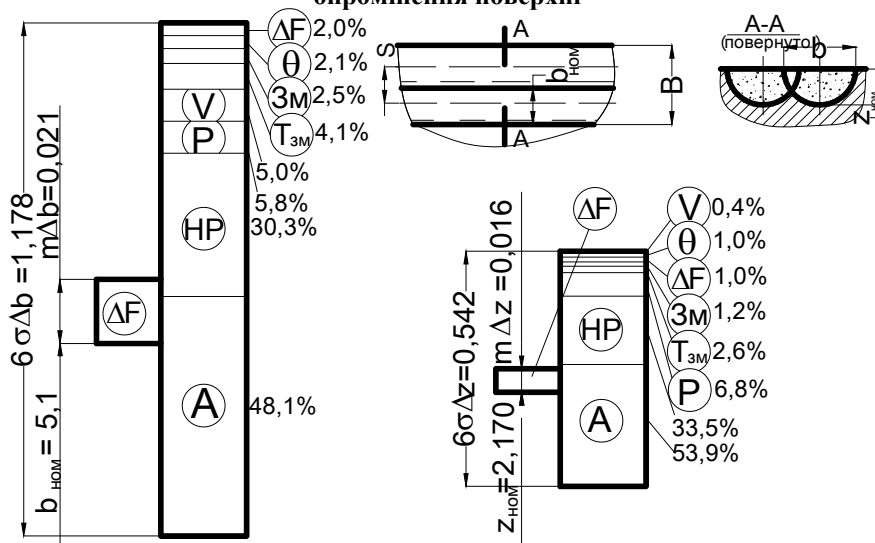


Рис. 4. Схема формування зони зміцнення та структура сумарної похибки операції лазерного безперервного опромінення поверхні

Висновки та рекомендації

1. Значення передбачених величин випадкової складової сумарної похибки ширини одиначної ЗТВ b ($6\sigma_{\Delta b} = 0,301$ мм – для імпульсного опромінення та $6\sigma_{\Delta b} = 1,178$ мм) (рис.3 та, 4) близькі до експериментальних значень 0,45 і 1,32 мм, одержаних авторами [16], що свідчить про коректність запропонованої методики тому, що у складі сумарної похибки зміцненої поверхні заготовки вона переважає похибки технологічної схеми [8].

2. Як для імпульсного, так і для безперервного режиму опромінення ширина зони зміцнення b більш чутлива до нестабільностей вхідних параметрів процесу \vec{X} , чим глибина z (рис.3 та 4).

3. Загальним для обох режимів опромінення є визначальний вплив стабільності рівня поглиненої енергії на відтворюваність розмірних характеристик зони зміцнення; так, елементарні похибки, викликані нестабільністю коефіцієнта поглинання A , складають $\sim 42-48$ % (імпульсний режим рис.3)), $48-54$ % (безперервний режим рис.4); похибками налаштування енергетичного режиму HP 13-15 % і 30-33 %, варіаціями енергетичних характеристик випромінювання (E або P) 15 -18 % і 6-7 % відповідно.

4. Суттєвий рівень нестабільності швидкості нагріву V_n і охолодження заготовки при імпульсному режимі опромінення (рис.3), слідством чого є велика мінливість інтервалу критичних температур ΔT_{3M} поліморфних перетворень при нагріві і охолодженні зони зміцнення, пояснює вагомішу частку елементарної похибки $c_{z3}\sigma_{z3}$ для імпульсної обробки (10-19 %) (рис.3) тоді, як при безперервному опроміненні (рис.4) вона складає лише (2,5-4 %).

5. Не дивлячись на високі рівні синаптичних коефіцієнтів прихованого шару ШНМ, що описують реакцію ТОС на мінливість умов опромінення (b_{b1} і b_{z1}), вклад останньої складової в сумарну похибку невеликий (6-8% і 1-2%), оскільки розрахунки виконані для точнішого методу взаємного позиціонування променя та заготовки (методу подвійного зображення), що виключає або скорочує деякі складові похибки ($b_{b1}\sigma_{\Delta F}$; $b_{z1}\sigma_{\Delta F}$). Постійна

складова цієї елементарної похибки $m_{\Delta F}^m = w_{10} x_5^{m(1)}$ також значно зменшена при імпульсному режимі обробки (рис.3) на величину скорочення значення подовжньої хроматичної аберації (для $\lambda_e = 0,63$ і $\lambda_p = 1,06$ мкм - для твердотілого випромінювача), а також взаємовиключної дії на розмір променя на поверхні заготовки абераційних і дифракційних ефектів при видаленні лінзи від резонатору $\bar{m}'_{\Delta F} = w_8^{(1)} x_5^{m(1)}$ і термодформації її серединної частини $m'_{\Delta F} = w_{14}^{(1)} x_9^{(1)}$ від нагрівання променем при безперервному опроміненні (рис.4).

6. Очікуваний зворотній зв'язок між виходом перцептрона *NET* або його складових шарів *NET₁*, *NET₂*, *NET₃* (рис.2) та відповідних синаптичних зв'язків (*вхід 1*, *вхід 2* та *вхід 3*), який можна використати для мінімізації середньоквадратичної похибки між виходом мережі та встановленим критерієм $E = 0,5(OUT - [OUT])^2$, в складних перцептронах не використовується тому, що при впливі на рівень синаптичних коефіцієнтів зміниться технологічний регламент, тобто режим виконання операції та розміри її результати $b_{ном}$ та $z_{ном}$ (рис.3 та 4).

7. Наведений аргумент свідчить, що для обраної цілі використання ШНМ - прогнозування результату операції - оптимізація її внутрішніх параметрів підналагодженням (навчанням) під конкретну задачу неможлива, але за допомогою функції помилок можна оцінити якість роботи нейронної мережі за аналізом рівня суми квадратів помилок.

8. Використання ШНМ дає можливість для оптимізації технологічного регламенту виконання операції не лише визначенням шляхів не режимного діяння на процес обробки, а при використанні виходів *OUT₁*, *OUT₂* та *OUT₃* прихованих шарів для мінімізації складових сумарної похибки Δb (d та z) методами непрямой оптимізації [14] в якості додаткових напрямів діяння на процес обробки.

9. Використовуючи також зважені долі сумарної похибки від будь-яких учасників технологічної операції, можна визначити умови обмеження їх вхідних нестабільностей (наприклад, потужності випромінювання, неточності розмірів заготовки, похибки вольтметра або швидкості подачі і ін.) з позицій скорочення загального рівня або частини сумарної похибки розмірних показників операції.

Аннотация. Приведены результаты попытки применения искусственных нейронных сетей для прогнозирования показателей качества операции лазерного поверхностного упрочнения, в частности, точности размерных ее результатов. Для решения задачи использована трехслойная сеть прямого распространения сигналов, синтаксис которой в среде Matlab имеет вид: $Net=netff(minmax(X)[P, S, Q]\{logsig, logsig, logsig\})$. Особенности избранной парадигмы сети являются: разнообразие размерности синапсов и объектов их воздействия; возможность формирования групп синапсов по объектам их влияния и зависимость уровня синапсов и их веса от режимов реализации операции, точность которой прогнозируется. Для трехслойного перцептрона с прямым распространением сигналов разработана система взаимно независимых входов и соответствующих синаптичных связей, что позволило линеаризовать модели точности размерных показателей операции при разных схемах ее организации. Хотя был получен допустимый уровень погрешности прогноза, выполнена попытка тренировки сети с использованием обратного распространения сигнала, а полученная количественная структура погрешности операции позволила целенаправленно использовать не режимные методы и средства повышения точности обработки или включить в оптимизационную модель процесса дополнительные функционалы невязок для поиска оптимальных режимов обработки.

Ключевые слова: лазер, технология, точность, погрешность, закалка, режимы облучения, нейронная сеть

Abstract.

Purpose. Attempt of the use of artificial neuron network for a prognosis and management precision of laser hardening treatment operation.

Methodology approach. For the decision of task the three-layered network with signal direct distribution, the syntax of which looks like in the environment of Matlab is used: $Net=netff(minmax(X)[P, S, Q]\{logsig, logsig, logsig\})$.

Findings. There are results of artificial neuron networks application for prediction of laser surface treatment operation qualitative dates, in particular, to precision of size its results. For the decision of task the three-layered network with signal direct distribution, the syntax of which looks like in the environment of Matlab is used: $Net=netff(minmax(X)[P, S, Q]\{logsig, logsig, logsig\})$. The select network paradigm features are: a variety of synapses is after a dimension and action orientation; possibility of synapses groups forming after their influence objects and dependence of synapses level and them weights from the regime operation realization parameters precision of which is forecast. For three-layered perseptron with direct distribution of signals the system of mutually independent entrances and proper synapse connections is developed, that allowed to linearize model of operation size indexes' precision under different charts of its organization.

Findings. The possible level of prognoses' error was although got, it was succeeded to use training of network with the use of reverse distribution of signal for realization of it adjusting by functional influence on the synapse coefficients.

Originality. However, the found out the structure of operation error allows purposefully to use not regime methods and facilities for increasing of treatment precision or add to the optimization model of process the additional functional of misclosures for the search of the optimum modes of treatment.

Keywords: laser, technology, precision, error, hardening, modes of irradiation, neuron network.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Коваленко В.С.* Упрочнение деталей лучом лазера / В.С. Коваленко, Л.Ф. Головка, А.И. Стрижак и др. – К.: Техніка, - 1981. – 130с.
2. *Григорьянц А.Г.* Технологические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, Н.И. Мисюра. – М: МГТУ им. Баумана. - 2008. – 664с.
3. *Семенцев А. М.* Выбор режимов лазерной термообработки сталей различных классов / А. М. Семенцев // - М: Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. - №9
4. *Дубнюк В.Л.* Результати застосування чисельних методів вирішення рівняння теплопровідності при проектуванні операцій лазерної поверхневої обробки деталей друкарських верстатів В.П. Котлярів, В.Л.Дубнюк, О.П. Худякова. Технологія і техніка друкарства (ВП) НТУУ «КПІ».- 2014.- №4 (46).- С. 52-70
5. *Котлярів В.П.* Экспериментальное исследование качественных результатов обработки отверстий / Котлярів В.П., Коваленко В.С., Анякин Н.И. Технология и автоматизация машиностроения. – 1985. - № 36. – С. 57-65
6. *Котлярів В.П.* Технологія лазерної обробки : підруч. [для студ. вищ. навч. закл.] / В. П. Котлярів – Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя, - 2010. – 308 с.
7. *Гаврилов А.Н.* Точность производства в машиностроении и приборостроении. М.: Машиностроение, 1977. – 567 с
8. *Kotlyarov V.* Analysis of the sizing error structure of laser profiling / V.Kotlyarov, Yu.Konovaleiko, V.Dubnyk & others. Surface engineering and applied electrochemistry (USA) / - 1996. - №1 – P. 1-6
9. *Kotlyarov V.* Quantitative analysis of the total error of dimensional results of laser profile cutting operations / V.Kotlyarov, Yu.Konovaleiko, V.Dubnyk. Surface engineering and applied electrochemistry (USA) / - 1996. - №2 – P. 1-6
10. *Медведев В.С.* Нейронные сети. Matlab 6 / В.С.Медведев, В.Г. Потемкин. - Диалог-МИФИ. - 2002. - 496с.
11. *Новик Ф.С.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С.Новик, Я.Б.Арсов. – М.: Машиностроение. - 1980. – 304 с.
12. *Котлярів В.П.* Нестабільність розмірів шару лазерного зміцнення деталей гірничих машин / В.П. Котлярів, М.І. Сергієнко, З. Надаль, О.В.Богданова. Вісник КПІ (серія “Гірництво”). – 2000. - № 2. – С. 81-86
13. *Венцель Е.С.* Теория вероятностей и ее инженерное применение / Е.С.Венцель, Л.А.Овчаров – М: Наука. - 1988. - 480с.
14. *Абильситов Г.А.* Технологические лазеры т.1 / Г.А.Абильситов, В.Г. Гонтарь, В.С.Голубев и др. – М: Машиностроение. – 1991. – 432с.
15. *Абильситов Г.А.* Мощные газоразрядные CO₂- лазеры и их применение в технологии. / Г.А.Абильситов, Е.П.Велихов, В.С.Голубев и др. – Л.: Знание. – 1973, - 108с.
16. *Басс М.Я.* Использование математического планирования эксперимента при разработке технологического процесса поверхностного упрочнения деталей лазером. / М.Я. Басс, В.И.Тютюнников, - рук, деп, в Союзтехприбор, DP1085, 1979. – С. 9

References

1. *Kovalenko V.S.* Uprochnenie detaley luchom lasera. V.S. Kovalenko, L.F.Strijak i dr. Kyiv.: Tehnika 1981. 130p.
2. *Grigor'yanc A.G.* Tehnologicheskie processy lasernoy obrabotki. A.G.Grigor'yanc, I.N.Shiganov, N.I.Misyura. Moscow: MGTU im. Baumana 2008. 664p.
3. *Semencov A.M.* Vybora rejimov lasernoy termoobrabotki staley razlichnykh klassov. A.M.Semencov. M: Uprochnyayushchie tehnologii i pokrytiya. 2006. No 9
4. *Dubnyuk V.L.* Rezul'taty zastosubann'a chisel'nykh metodiv vyirshenn'a rivnyann'a teploprovidnosti pry proektuvanni operaciy lasernoi poverhnevoi obrobky deteley drukars'kih verstativ. V.P.Kotlyarov, V.L.Dubnyuk, O.P.Hudyakova. Tehnologiya i tehnika drukarstva (VPI) NTUU “KPI”. 2014. No 4(46). P. 52-70
5. *Kotlyarov V.P.* Eksperimental'noe issledovanie kachestvennykh resul'tatov obrabotki otverstiy. V.P.Kotlyarov, V.S. Kovalenko, N.I.Anyakin. Tehnologiya i avtomatizaciya mashinostroeniya. 1985. No 36. P. 57-65
6. *Kotlyarov V. P.* Tehnologiya lasernoi obrobki. Pidruchnyk [dlya studentiv vysh.navch.zakl.]. V.P.Kotlyarov. Nijyn: NDU im. M.Gogolya, 2010. 308p.
7. *Gavrilov A.N.* Tochnost' proizvodstva v mashinostroenii i priborostroenii. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 567p.
8. *Kotlyarov V.* Analysis of the sizing error structure of laser profiling. V.Kotlyarov, Yu.Konovaleiko, V.Dubnyk & others. Surface engineering and applied electrochemistry (USA). 1996. No 1. P. 1-6
9. *Kotlyarov V.* Quantitative analysis of the total error of dimensional results of laser profile cutting operations. V.Kotlyarov, Yu.Konovaleiko, V.Dubnyk. Surface engineering and applied electrochemistry (USA). 1996. No 2. P. 1-6
10. *Medvedev V.S.* Neyronnye seti. Matlab 6. V.S. Medvedev, V.G.Potyemkin. Dialog MIFI. 2002. 496p.
11. *Novik F.S.* Optimizaciya processov tehnologii metallov metodami planirovaniya eksperimentov. F.S.Novik, Ya.B.Arsov. Moscow: Mashinostroyenie. 1980. 304p.
12. *Kotlyarov V. P.* Nestabil'nist' rozmiriv sharu lasernogo zmichenn'a detaley girmichnykh mashin. V.P.Kotlyarov, M.I.Sergienko, Z.Nedal', O.V.Bogdanova. Visnyk KPI (seriya “Girnyctvo”). 2000. No 2. P. 81-86
13. *Vencel E.S.* Teoriya veroyatnosti i ee injenernoje primeneniye. E.S.Vencel, L.A. Ovcharov. Moscow. Nauka. 1988. 480p.
14. *Abil'siitov G.A.* Tehnologicheskie lasery t.1. G.A.Abil'siitov, V.G.Gontar, V.S.Golubev i dr. Moscow: Mashinostroyeniye. 1991. 432p.
15. *Abil'siitov G.A.* Moschnyye gazorazryadnye CO₂- lasery i ih primeneniye v tehnologii. G.A.Abil'siitov, E.P.Velikhov, V.S.Golubev i dr. Lviv: Znanie. 1973. 108p.
16. *Bass M.Ya.* Ispol'zovanie matematicheskogo planirovaniya eksperimenta pry razrabotke tehnologicheskogo processa poverhnostnogo uprochneniya detaley laserom. M.Ya.Bass, V.I.Tyutyunnikov, ruk, dep.v Soyuztehpribor. 1979. P. 9

Подана до редакції 12.10.2015