

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет
Кафедра

Комп'ютерної інженерії та управління
Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти

другий (магістерський)

Інтелектуальна модель гідроабразивної обробки плоских поверхонь
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КІТм-22-1
Микола ТРИГУБА
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма Комп'ютерні інтелектуальні технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. КІТС Олег ІЛЮНІН
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Зав. кафедри

Олег РУДЕНКО

(підпис)

(власне ім'я, прізвище)

2023 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра	Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	123 Комп'ютерна інженерія
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерні інтелектуальні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2023р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Тригубі Миколі Миколайовичу1. Тема роботи (проекту) Інтелектуальна модель гідроабразивної обробки плоских поверхонь

затверджена наказом університету від "03" листопада 2023 р. № 1290Ст

2. Термін подання учнем роботи до екзаменаційної комісії 24 січня 2024р.

3. Вихідні дані до роботи (проекту) _____

1) особливості процесу гідроабразивної обробки; _____

2) існуючі моделі процесу усунення дефектів на поверхні прокату; _____

3) середовище моделювання - пакет NeuroPh studio _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

Огляд стану проблеми та постановка задачі _____Аналіз літератури за напрямком дослідження _____Аналіз проблеми водострумного видалення поверхневих дефектів; _____Розробка інтелектуальної моделі гідроабразивної обробки плоских поверхонь _____Розробка моделі інтелектуального керування тиском розчину в струмені _____Експериментальні дослідження _____Підготовка презентаційного матеріалу _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням кафедри)

17 слайдів _____

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно до наказу, зазначеному у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Видача та узгодження теми проєкту	06.11.2023	Виконано
2	Огляд стану проблеми та постановка задачі	07.11-19.11.2023	Виконано
3	Аналіз літератури за напрямком дослідження	20.11- 27.11.2023	Виконано
4	Аналіз проблеми водострумного видалення поверхневих дефектів	28.11-03.12.2023	Виконано
5	Розробка інтелектуальної моделі гідроабразивної обробки плоских поверхонь	04.12-10.12.2023	Виконано
6	Розробка моделі інтелектуального керування тиском розчину в струмені	11.12-24.12.2023	Виконано
7	Експериментальні дослідження	25.12-29.12.2023	Виконано
8	Підготовка презентаційного матеріалу	30.12-24.01.2024	Виконано
9	Подання до ДЕК	24.01.2024	Виконано
10	Захист проєкту		

Дата видачі завдання «06» листопада 2023 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. КІТС Олег ІЛЮНІН
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 63 сторінок, 7 рисунків, 2 таблиць, 1 додаток, 23 джерел.

ГІДРОАБРАЗИВНА ОБРОБКА, ПОВЕРХНЕВІ ДЕФЕКТИ, ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ, WATER JET PROCESSING, RBF

У даному дослідженні була розроблена інтелектуальна модель для оптимізації процесу гідроабразивної обробки плоских поверхонь. Головною метою було підвищення ефективності видалення дефектів з плоских поверхонь та використання абразиву з рідиною-носієм. Дві ключові моделі, які були розглянуті, включають інтелектуальну модель управління обробкою/ ідентифікацією поверхневих дефектів та модель інтелектуального керування тиском розчину в струмені для досягнення певного рівня чистоти поверхні.

Досліджено процес попередньої гідрострумінної обробки та усунення дефектів на поверхні прокату в автоматизованих сірчаноокислотних лініях травлення. Запропоноване рішення використовує ефект абразивної дії шламу, що утворюється в технологічному процесі сірчаноокислотного травлення, без використання дорогого обладнання для дозованого змішування абразиву з рідиною-носієм. Результати показують, що такий підхід, в поєднанні з іншими заходами автоматизації сірчаноокислотних ліній травлення, дозволяє зменшити споживання сірчаної кислоти та підвищити швидкість технологічного процесу.

Ця модель може бути ефективно впроваджена як частина інтелектуальної системи управління технологічним процесом у формі бюджетної мікроконтролерної системи. Компактні розміри та висока ефективність роблять це рішення доступним та перспективним для реалізації в індустріальних умовах.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 63 pages, 7 figures, 2 tables, 1 appendic, 23 sources.

HYDROABRASIVE PROCESSING, SURFACE DEFECTS, INTELLIGENT CONTROL, WATER JET PROCESSING, RBF

In this study, an intelligent model was developed to optimize the process of hydroabrasive treatment of flat surfaces. The main goal was to reduce the consumption of sulfuric acid in automated sulfuric acid digestion lines. Two key models that have been considered include an intelligent surface defect treatment control model and an intelligent solution pressure control model in the jet.

The process of hydroabrasive treatment and the process of removing defects on the surface of rolled products were studied.

The proposed solution uses the abrasive action of the sludge generated in the technological process, without the use of expensive equipment for dosed mixing of the abrasive with the carrier liquid. The results show that this approach, in combination with other measures of automation of sulfuric acid pickling lines, allows reducing the consumption of sulfuric acid and increasing the speed of the technological process.

This system can be effectively implemented as part of an intelligent process control system in the form of an affordable microcontroller system. Compact dimensions and high efficiency make this solution affordable and promising for implementation in industrial conditions.

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет
Кафедра

Комп'ютерної інженерії та управління
Комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем

АНОТАЦІЯ

КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

рівень вищої освіти

другий (магістерський)

Інтелектуальна модель гідроабразивної обробки плоских поверхонь
(тема)

Виконав:

студент II курсу, групи КІТм-22-1

Микола ТРИГУБА

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня

Комп'ютерні

програма

інтелектуальні технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник

доц. каф. КІТС Олег ІЛЮНІН

(посада, власне ім'я, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Тригуба М. М. Інтелектуальна модель гідроабразивної обробки плоских поверхонь. – Магістерська кваліфікаційна робота.

У кваліфікаційній роботі була розроблена інтелектуальна модель для оптимізації гідроабразивної обробки плоских поверхонь з метою зменшення споживання сірчаної кислоти в автоматизованих лініях травлення. Розглянуті дві ключові моделі: перша — для управління обробкою поверхневих дефектів, а друга — для інтелектуального керування тиском розчину в струмені.

У першому розділі було проаналізовано предметну область, а саме досліджено процес гідроабразивної обробки та процес усунення дефектів на поверхні сталевого прокату. Визначено, що спосіб автоматизованої гідроабразивної обробки може застосовуватися для різноманітних завдань, включаючи закруглення гострих кромek, полірування складних поверхонь, видалення задирок і зачищення зварних швів, підготовку до нанесення покриття, очищення корпусів морських суден, видалення забруднень і пофарбованих бетонних поверхонь. Також було проаналізовано застосування інтелектуальних моделей у гідроабразивній обробці, була поставлена мета дослідження.

У другому розділі проаналізовані існуючі моделі процесу усунення дефектів на поверхні прокату. Було визначено, що теоретичні та експериментальні дослідження зосереджені на моделях турбулентності потоку багатофазної абразивної суміші та нечіткому прогнозуванні характеристик потоку. Також було досліджено, що зараз переважають лінії травлення, що складаються з кількох травильних ванн і вхідної секції WJP обробки, що відповідає технічним вимогам Industry 4.0 щодо енергоефективності та мінімізації викидів у навколишнє середовище.

У третьому розділі була розроблена оптимізаційна модель для гідроабразивної обробки плоских поверхонь з метою зменшення споживання сірчаної кислоти в автоматизованих лініях травлення. Розроблені дві ключові інтелектуальні моделі: перша — для управління обробкою поверхневих дефектів, а друга — для керування тиском розчину в струмені.

В четвертому розділі наведені результати експериментальних випробування запропонованої моделі. Розроблене рішення дозволяє використовувати абразивну дію шламу без дорогого обладнання для дозованого змішування абразиву з рідиною-носієм. Його впровадження в модернізовані сірчаноокислотні лінії травлення призводить до зменшення споживання сірчаної кислоти та підвищення швидкості технологічного процесу. Зазначена система може бути реалізована як частина інтелектуальної системи управління технологічним процесом в формі доступної мікроконтролерної системи, враховуючи її компактні розміри та ефективність.

ГІДРОАБРАЗИВНА ОБРОБКА, ПОВЕРХНЕВІ ДЕФЕКТИ,
ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ, WATER JET PROCESSING, RBF

Публікації здобувача за темою роботи:

1. О. Ілюнін, М. Ходак, В. Пирогов, О. Пашолок, М. Тригуба, С. Сердюк. Intelligent models for control of jet hydro-processing of rolled steel defects. Інтегровані технології та енергозбереження. Системи управління та обробки інформації, — Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – №2,- с.45-56 ISSN 2078-5364 (print) ISSN 2708-0625 (online).

2. О. Ілюнін, В. Пирогов, С. Сердюк, М. Тригуба. Features of using intelligent automation for Water Jet Technology. Materials of the XI International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies» 21th – 23th September, 2023, Odessa. P.p. 85-86.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, скорочень і термінів	10
Вступ	11
1 Аналіз предметної області та постановка задачі дослідження	12
1.1 Особливості процесу гідроабразивної обробки	12
1.2 Застосування інтелектуальних моделей у гідроабразивній обробці	15
1.3 Постановка задачі дослідження	19
2 Аналіз існуючих моделей процесу усунення дефектів на поверхні прокату	21
3 Розробка інтелектуальної моделі гідроабразивної обробки плоских поверхонь	28
3.1 Аналіз проблеми водоструминного видалення поверхневих дефектів	28
3.2 Інтелектуальна модель управління обробкою поверхневих дефектів	33
3.3 Інтелектуальна система управління обробки поверхневих дефектів	36
4 Експериментальні випробування запропонованої моделі	42
Висновки	50
Перелік використаних джерел	51
Додаток А. Графічний матеріал кваліфікаційної роботи	54

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- БП – багат шаровий перцептрон
- РБМ – радіально–базисних мережа
- ТП – технологічний процес
- ТР – травильний розчин
- ШІ – штучний інтелект
- ШНМ — штучна нейронна мережа
- AWJP – Abrasive Water Jet Precision
- RBNN – radial based neural network
- WJ – Water Jet
- WJP – Water Jet Processing

ВСТУП

У світі постійно зростає необхідність у вдосконаленні та оптимізації виробничих процесів, зокрема в області промислової обробки матеріалів. Швидкі технологічні зміни та високий рівень конкуренції вимагають від підприємств не лише ефективності, але й постійного пошуку нових способів підвищення продуктивності.

Гідроабразивна обробка стає одним із перспективних напрямків, який пропонує інноваційні методи обробки матеріалів, зокрема плоских поверхонь. Вона відрізняється високою точністю, можливістю обробки складних геометричних форм та невеликим впливом на структуру матеріалу.

Актуальність даного дослідження полягає в пошуку шляхів оптимізації процесу гідрострумінної (WJP) та гідроабразивної (AWJP) обробки для забезпечення не лише ефективності, а й сталого розвитку у відповідності із стратегією Industry 4.0 [1]. Розробка інтелектуальних моделей управління цими процесами може сприяти не лише зниженню витрат матеріалів та енергії, а й мінімізації впливу на довкілля.

Таким чином, це дослідження має значення для подальшого розвитку виробництва та ефективного використання сучасних технологій в промисловості.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Виробництво сталевих прокатів є складним технологічним процесом, який включає в себе кілька ключових етапів. Основна мета цього процесу - отримання плоских сталевих листів або стрічок з визначеними характеристиками, розмірами та якістю.

Плоскі поверхні - це поверхні, які не мають виражених вигинів або виступів та визначаються однією рівниною. Вони є однією з основних геометричних форм і мають безліч застосувань у різних галузях, включаючи інженерію, архітектуру, виробництво, математику та багато інших областей.

У контексті гідроабразивної обробки плоскі поверхні можуть означати обробку матеріалів, де фінальний результат повинен бути рівним та без видимих виразних згонів або виступів. Гідроабразивна обробка плоских поверхонь вимагає точності і контролю, оскільки навіть мінімальні відхилення від плоскості можуть вплинути на якість та функціональність кінцевого продукту.

1.1 Особливості процесу гідроабразивної обробки

Гідроабразивна обробка - це технологія обробки матеріалів, в якій вода під високим тиском комбінується з абразивним матеріалом (наприклад, піском або іншими твердими частинками) для вирізання, різання, або обробки поверхонь. Цей метод широко використовується в різних галузях, включаючи металообробку, кам'яно-обробку, виробництво скла, аерокосмічну промисловість, та інші.

Процес гідроабразивної обробки включає в себе наступні етапи:

Формування струменя - вода під високим тиском постачається до спеціальної головки, де вона комбінується з абразивом, утворюючи струмінь.

Струмінь води та абразиву направляєється на оброблюваний матеріал з високою швидкістю. Відстань між головкою і матеріалом зазвичай дуже мала для точності. Струмінь гідроабразиву ріже або обробляє поверхню матеріалу відповідно до заданих параметрів і керований контрольною системою (рис.1.1).

Обрізки та оброблені деталі видаляються з робочої зони для підготовки до наступних кроків обробки або зберігання.

Гідроабразивна обробка має кілька переваг, включаючи високу точність та можливість обробки різних матеріалів, включаючи м'які та дуже тверді. Вона також дозволяє обробляти матеріали без термічного впливу, що важливо для деяких матеріалів.

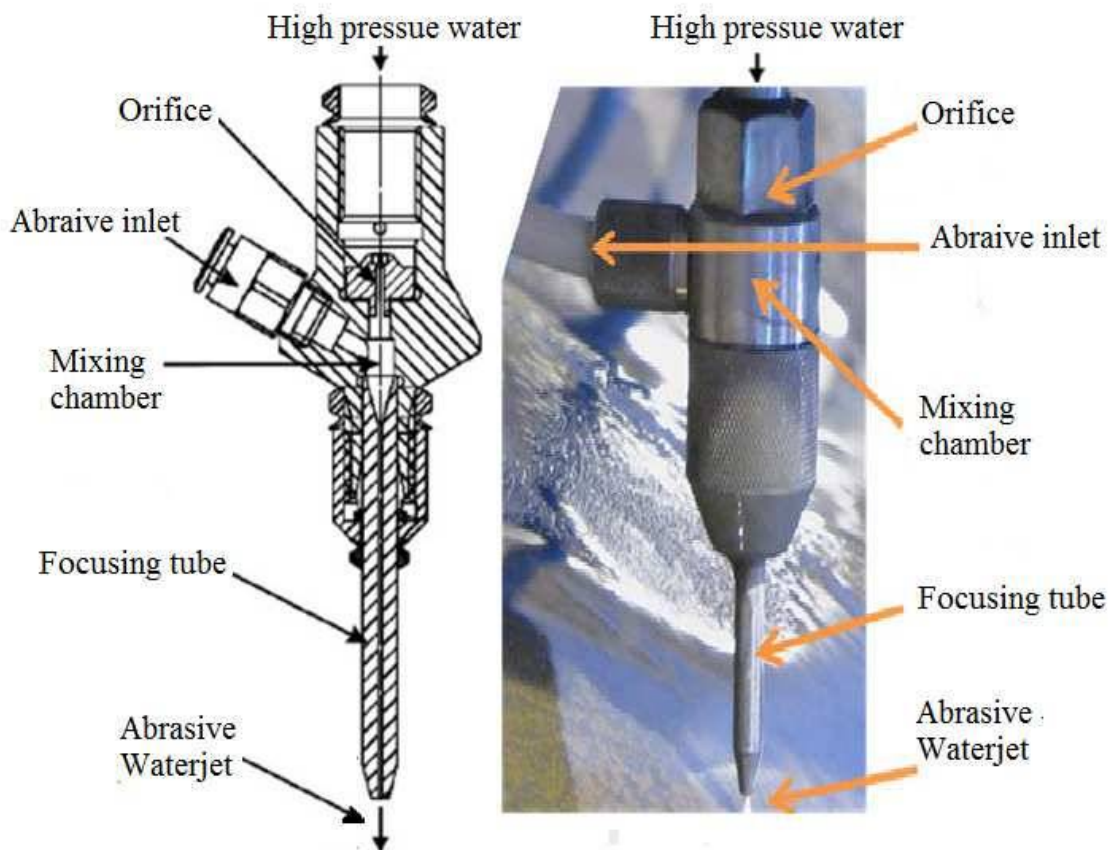


Рис. 1.1 - Гідроабразивна ріжуча головка

WJP (Water Jet Processing) - це успішна сучасна техніка обробки, яка використовується для виробництва точних компонентів в аерокосмічній, автомобільній і морській промисловості. Ця технологія базується на використанні струму води під високим тиском для різання та обробки матеріалів.

В аерокосмічному виробництві точність і якість компонентів є вирішальними для безпеки та надійності літаків та космічних апаратів. WJP дозволяє створювати складні деталі з великою точністю і без термічного впливу на матеріали, що є критичним для аерокосмічних застосувань.

У виробництві автомобілів, WJP використовується для створення компонентів, таких як кузови автомобілів, панелі та інші деталі зі складними геометричними формами. Вона дозволяє знижувати вагу деталей та підвищувати ефективність автомобілів.

У морській промисловості, WJP використовується для виготовлення деталей суден, обладнання для оффшорних бурових робіт, а також для обробки корозійностійких матеріалів, що необхідні в агресивних морських середовищах.

У WJP з абразивом видалення матеріалу відбувається через процес ерозії, під час якого струмінь води прискорює абразивні частинки на високій швидкості, спричиняючи удари по цільовому матеріалу. Він пропонує широкий спектр переваг, таких як мінімальна термічна напруга, менша деформація матеріалу, можливість різати будь-які матеріали, мінімальна сила різання може бути застосована до цільового матеріалу.

Процес усунення дефектів на поверхні прокату з вуглецевої сталі безперервною травильною лінією в рідких технологічних травильних розчинах є важливою частиною виробництва сталі. Такі лінії травлення використовуються для поліпшення якості та зовнішнього вигляду продукції, а також усунення дефектів, таких як оксиди, плівки, бруд, що вкатано валками прокатки в поверхню металу на попередніх етапах.

Основні етапи цього процесу включають:

Підготовчий етап - прокат з вуглецевої сталі поступає на травильну лінію для усунення дефектів на його поверхні. Потім прокат проходить через травильні розчини, які включають хімічні речовини, призначені для видалення окислів та інших нечистот на поверхні. Оброблений прокат промивається для видалення залишків травильного розчину. Далі прокат може пройти через процес сушіння для видалення вологи та підготовки його до наступних етапів обробки або зберігання.

Використання рідких травильних розчинів дозволяє добре контролювати процес травлення та ефективно усувати дефекти на поверхні сталевого прокату. Цей підхід може забезпечити високу якість обробки та відповідати стандартам якості виробництва.

Лінії травлення, які складаються з кількох травильних ванн та вхідної секції обробки WJP, свідчать про високий рівень автоматизації та використання передових технологій у виробництві сталевого прокату [2].

Процес усунення дефектів на поверхні прокату з вуглецевої сталі здійснюється безперервною лінією травлення в рідких технологічних травильних розчинах. Розведена сірчана кислота видаляє точкові оксиди і плівки, але також впливає на поверхню сталі, частково розчиняючи її. При зіткненні гострокутної абразивної частинки з металом зрізається мікронний шар всієї поверхні або локальні дефекти окалини. Тому дуже важливим є контроль таких параметрів процесу, як час перебування в розчині, температура і склад травильного розчину в ваннах, тиск і швидкість розчину в потоках води гідрообробки (WJ) з метою мінімізації витрат на травильний розчин та невиправданих втрат металу.

1.2 Застосування інтелектуальних моделей у гідроабразивній обробці

Інтелектуальні моделі можуть бути корисними в контексті гідроабразивної обробки плоских поверхонь. Інтелектуальна модель - це

математичний або обчислювальний апарат, який розробляється для симуляції або передбачення складних процесів, подій або явищ з використанням штучного інтелекту та аналізу даних. Ці моделі можуть бути використані в різних галузях, вони допомагають автоматизувати процеси та зробити прийняття рішень більш обґрунтованим і точним.

Інтелектуальні моделі можуть включати в себе такі складові:

- математичні алгоритми. Вони використовуються для створення математичних залежностей і функцій, які описують конкретний процес або явище. Ці алгоритми можуть використовувати методи машинного навчання, статистики і інші підходи для аналізу та передбачення даних;

- аналіз даних. Інтелектуальні моделі можуть використовувати великі обсяги даних для виявлення закономірностей, класифікації об'єктів, прогнозування подій та багато інших завдань. Вони використовують техніки машинного навчання, обробки природних мов, комп'ютерного бачення і т.д;

- штучний інтелект. Інтелектуальні моделі можуть включати в себе елементи штучного інтелекту, такі як нейронні мережі, генетичні алгоритми, розпізнавання образів і інші підходи, які спроектовані для імітації людського інтелекту в аналізі та рішенні завдань;

- оптимізація та прийняття рішень. Інтелектуальні моделі можуть бути використані для оптимізації різних процесів та прийняття рішень. Вони допомагають визначити найкращий спосіб досягнення певної мети або вибрати найбільш ефективні рішення серед багатьох варіантів;

- прогнозування та попередження. Інтелектуальні моделі можуть використовуватися для прогнозування майбутніх подій, виявлення аномалій або попередження про можливі ризики та загрози.

Інтелектуальна модель гідроабразивної обробки плоских поверхонь є важливим аспектом в сучасній виробничій сфері, особливо у виробництві, де використовується технологія гідроабразивного різання.

Інтелектуальні моделі в цьому контексті можуть бути використані для оптимізації процесу гідроабразивної обробки та покращення результатів.

Основні аспекти інтелектуальної моделі гідроабразивної обробки плоских поверхонь можуть включати:

а) прогнозування результатів. Модель може бути навчена передбачати, як буде виглядати оброблена поверхня на виході з лінії травління на основі вхідних параметрів, таких як тип матеріалу, товщина, тиск води, швидкість різання і інші фактори.

б) оптимізація параметрів. Інтелектуальна модель може допомогти знайти оптимальні параметри обробки для досягнення найкращих результатів у сенсі якості обробки та економії ресурсів.

в) діагностика та прогнозування зносу вузлів та агрегатів. Модель може відслідковувати знос абразивних вузлів та прогнозувати момент їх заміни, що допомагає уникнути некерованих простоїв та дефектів.

г) відстеження якості обробки. Інтелектуальна модель може аналізувати візуальні дані та ідентифікувати дефекти на обробленій поверхні, допомагаючи вдосконалити процес контролю якості керування відповідними агрегатами.

д) підтримка прийняття рішень. Модель може надавати рекомендації для операторів та інженерів щодо оптимальних дій у реальному часі, що покращує продуктивність та ефективність процесу.

Застосування інтелектуальних моделей у гідроабразивній обробці може значно покращити якість продукції, знизити витрати та зробити процес більш стабільним і передбачуваним. Це особливо важливо в сферах, де точність та якість обробки є вирішальними факторами, таких як аерокосмічна промисловість, автомобільна виробництво та інші галузі.

Інтелектуальні моделі можуть бути використані для завдання керуванням процесу обробки. Інтелектуальна модель може допомогти автоматизувати та оптимізувати параметри гідроабразивної обробки для

досягнення плоских поверхонь без дефектів. Також використання інтелектуальної моделі може допомогти у моніторингу та контролі якості. Модель може відстежувати якість обробки та виявляти навіть невеликі відхилення від плоскості.

Моделі можуть допомогти зменшити витрати на матеріали та енергію, зберігаючи при цьому високу якість обробки.

Усі ці завдання можуть бути вирішені завдяки розвинутих інтелектуальним методам та моделям, які використовуються для контролю і оптимізації гідроабразивної обробки плоских поверхонь, що важливо в різних виробничих процесах.

Шлях до економічності сучасних травильних ліній і забезпечення належного захисту навколишнього середовища полягає у вирішенні актуальної проблеми розробки сучасних систем управління на основі інтелектуальних методів і моделей.

Інтелектуальна модель управління Water Jet Processing (WJP) може бути розроблена для оптимізації та автоматизації процесу обробки. Основні можливі аспекти, які можна врахувати при створенні такої моделі:

- автоматизоване керування параметрами обробки. Інтелектуальна модель може автоматично налаштовувати параметри обробки, такі як тиск води, швидкість струменя, траєкторія руху інструменту WJP в залежності від властивостей матеріалу та потрібних характеристик обробки;

- прогнозування зносу інструменту. Модель може враховувати стан інструменту WJP та прогнозувати момент, коли його слід замінити або обслужити, що сприяє підтримці найвищої якості обробки;

- контроль якості. Інтелектуальна модель може включати системи візуального аналізу для автоматичного виявлення дефектів або відхилень від стандартів якості на обробленій поверхні;

- оптимізація витрат ресурсів. Модель може допомагати управляти витратами води, енергії та інших ресурсів, забезпечуючи ефективне використання обладнання;

- адаптивне управління процесом. Модель може адаптувати свої параметри в реальному часі відповідно до змінних умов обробки та вимог якості;

- інтеграція з системами Industry 4.0. Інтелектуальна модель може бути інтегрована з іншими системами виробництва в рамках концепції IIOT (InternetIIOT) Industry 4.0 для забезпечення цифрової трансформації та оптимізації ланцюга постачання.

Створення такої моделі вимагає збір та аналіз даних, розуміння процесу WJP та впровадження алгоритмів машинного навчання або інших технологій штучного інтелекту. Інтелектуальна модель управління WJP може значно покращити ефективність та точність процесу обробки, забезпечуючи оптимальні результати.

1.3 Постановка задачі дослідження

Гідроструменева обробка листового прокату травильним розчином є ударним впливом на оброблену поверхню високошвидкісного струменя, при цьому травильний розчин (ТР) містить сольові продукти реакції травлення, які надають абразивну дію на процес, та не тільки видаляють дефекти, але і зрізають деяку кількість товарного металу.

Єдиний спосіб зробити цей процес економічно ефективним і забезпечити належний захист навколишнього середовища - це вирішити нагальну задачу розробки сучасної системи управління на основі інтелектуальних методів і моделей. Таким чином, метою кваліфікаційно роботи є розробка інтелектуальної моделі гідроабразивної обробки плоских поверхонь задля зменшення споживання сірчаної кислоти при автоматизації

модернізованих сірчаноокислотних ліній травлення. Завдання, які необхідно вирішити задля вирішення поставленої мети:

- аналіз предметної області;
- аналіз існуючих моделей процесу усунення дефектів на поверхні прокату;
- розробка інтелектуальної моделі гідроабразивної обробки плоских поверхонь;
- експериментальні випробування запропонованої моделі.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ УСУНЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА ПОВЕРХНІ ПРОКАТУ

Травлення сталі - це процес хімічного обробки поверхні сталі з метою видалення окисів, забруднень, бруду та інших дефектів, а також для поліпшення зовнішнього вигляду і якості поверхні. Травлення може бути важливим етапом в виробництві сталевих виробів, таких як листи, плити, дрiт, а також в конструкції та архітектурі для покращення зовнішнього вигляду та збереження якості сталі. Травлення, як правило, використовується для обробки сталевих поверхонь після виготовлення сталевого прокату або вироблення деяких виробів з нього.

Зазвичай, травлення сталі використовує розчини кислот або інших хімічних речовин для обробки поверхні. Важливо враховувати, що травлення - це окремий процес, який може бути проведений після завершення виробництва сталевого прокату на заводі або в інших спеціалізованих об'єктах. Використання травильних розчинів, зокрема розчину сірчаної кислоти, на лініях безперервного травлення є важливим етапом для поліпшення якості та зовнішнього вигляду продукції.

Лінії безперервного травлення використовуються для обробки поверхні сталевого прокату з метою видалення окисів, іржавини, залишків масла чи інших домішок. Травлення допомагає підготувати поверхню для подальшого оброблення, такого як фарбування, гальванічне покриття чи інші види обробки [3].

Сірчана кислота (H_2SO_4) використовується як один з розчинів для травлення через її хімічні властивості, які роблять її ефективною для видалення окислів і іржі. Також, сірчана кислота може бути використана для покращення адгезії під час наступних етапів обробки.

Важливо враховувати необхідність відповідних заходів безпеки та екологічної відповідальності при роботі з хімічними розчинами, такими як сірчана кислота. Використання таких розчинів має відповідати стандартам та регуляторним постановам з охорони навколишнього середовища та безпеки праці.

На лінії безперервного травлення, яка є завершальним процесом у виробництві сталевого прокату, велика кількість водного розчину сірчаної кислоти використовується як рідина для травлення. Шлам, кисла вода, сульфат заліза, солі металів і відпрацьовані кислоти є побічними продуктами травлення сталі сірчаною кислотою і є небезпечними відходами відповідно до ЕРА [4]. Крім того, розчин необхідно регенерувати або скидати в промислову воду для нейтралізації з подальшим очищенням води [5] і приготуванням нового свіжого розчину.

Усі ці заходи не тільки збільшують експлуатаційні, ресурсні та енергетичні витрати процесу, а й підкислюють та засолюють ґрунт.

З іншого боку, зараз переважають лінії травлення [3], що складаються з кількох травильних ванн і вхідної секції обробки WJP і відповідають технічним вимогам Industry 4.0 щодо енергоефективності та мінімізації викидів у навколишнє середовище.

Лінії травлення, які складаються з кількох травильних ванн та вхідної секції обробки WJP (Water Jet Processing), свідчать про високий рівень автоматизації та використання передових технологій у виробництві сталевого прокату.

Деякі ключові аспекти, які можуть визначати переваги цих ліній травлення в контексті Industry 4.0 [1].

По-перше, це енергоефективність. Використання передових технологій та оптимізація процесів можуть сприяти зменшенню енергоспоживання виробництва, що важливо в рамках енергоефективності.

По-друге — це мінімізація викидів. Застосування передових технологій управління виробництвом може допомогти зменшити викиди та негативний вплив на навколишнє середовище.

По-третє, автоматизація та цифрова інтеграція. Лінії травлення можуть бути пов'язані з системами автоматизації та взаємодіяти з іншими компонентами виробництва в рамках концепції Industry 4.0.

Також це - точність та якість. Застосування технології WJP може забезпечити високу точність обробки та покращити якість виробу.

Та на останок, інтеграція даних та аналітика. Збір і аналіз даних з ліній травлення може допомогти виробникам приймати інформовані рішення та вдосконалювати ефективність виробництва.

Ці технічні розв'язки відповідають принципам Industry 4.0, спрямованим на цифрову трансформацію та підвищення ефективності виробництва.

У деяких ТП для досягнення заданої якості поверхні часто потрібні дорогі абразиви (алмазовмісні суміші, карбід корунду). При цьому зміна геометричних розмірів і властивостей абразивних частинок також оцінюється стаціонарно, перед використанням у повторних циклах ТП.

WJP сталевого прокату з травильним розчином (ТР) - це високошвидкісний струменевий вплив на оброблену поверхню, але з часом вміст ТР і розмір компонентів твердих продуктів реакції кислотного травлення в ТР зростає до 3÷5 мм у часі [2] і в процес вноситься неконтрольований ефект шліфування поверхні металу.

Незважаючи на те, що WJP добре зарекомендував себе в пластиці, кераміці, склі, спостерігається обмежена кількість робіт з контролю WJP, особливо таких як інтелектуальні системи керування очищенням поверхні сталеві стрічки за технологією WJP.

Ретельний огляд сучасних підходів і моделей WJP наведено в [6], однак теоретичні та експериментальні дослідження зосереджені на моделях потоку багатофазної абразивної суміші та нечіткому прогнозуванні характеристик

турбулентності потоку. У [7] ШНМ і підхід «випадкового відпалу» використовувалися для прогнозування оптимальних параметрів процесу WJP. У [8] метод Тагучі та GONN (системи генетично оптимізованих нейронних мереж) використовувалися для аналізу даних дискретного абразивного потоку та нечіткого вибору параметрів WJP. У літературі повідомлялося про останній прогрес у деяких відповідних методах та експериментальних застосуваннях [9-11]. Але всі ці дослідження як мета переслідують отримання явних аналітичних залежностей від певних ділянок визначення вхідних змінних, і до цього часу не було жодного посилання на літературу, в якій розглядалася б проблема регулювання тиску струму TP для процесів абразивного ВПВ поверхні на певну глибину.

Аналіз властивостей штучних нейронних мереж (ШНМ) свідчить про ефективність використання для ідентифікації нелінійних об'єктів цифрового керування за допомогою ШНМ типу багатошаровий персептрон (БП) та радіально-базисних мереж (РБМ). Персептронне представлення моделі еквівалентно традиційному, забезпечує компактне представлення нелінійного об'єкта, оскільки число параметрів в РБМ зростає експоненціально зі збільшенням розмірності вхідного простору, в той час як для БП ця залежність є лінійною. Але РБМ, володіючи подібними з БП мережами властивостями, більш наочні та зручні в настроюванні. Це дозволяє використовувати для визначення параметрів ШНМ добре розвинені методи оцінювання, що використовуються при традиційному підході до моделювання.

Поєднання апроксимуючих властивостей БП та РБМ зі здатністю швидко навчатися дозволяє використовувати їх для керування нелінійними динамічними об'єктами в реальному часі [18, 19]. Обидві мережі використовують апроксимацію нелінійного оператора об'єкта деякою системою базисних функцій $\{\Phi_i(u)\}$, яка реалізується нейронами, що утворюють шари мережі, а задача ідентифікації зводиться до навчання мережі, тобто налаштування параметрів мережі на основі пред'явлення навчальної вибірки, до складу якої входять вимірювані значення вхідних і відповідних вихідних змінних.

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^N w_i \Phi_i(u(k)), (2.1)$$

де w_i – вагові параметри;

$$u(k) = (y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n))^T.$$

При побудові ШНМ вибір виду активаційної функції відіграє істотну роль. Для навчання мережі застосовуються різні методи оптимізації, які оперують як значеннями самої функції активації, так і значеннями її похідних. Тому використовувані функції повинні володіти рядом властивостей: функція активації повинна бути обмеженою, монотонною і безперервно дифференціюємою. Сигмоїдальні функції – логістична (уніполярна) і гіперболічний тангенс (біполярна) – володіють перерахованими властивостями.

Загальну структуру ШНМ наведено на рис. 2.1.

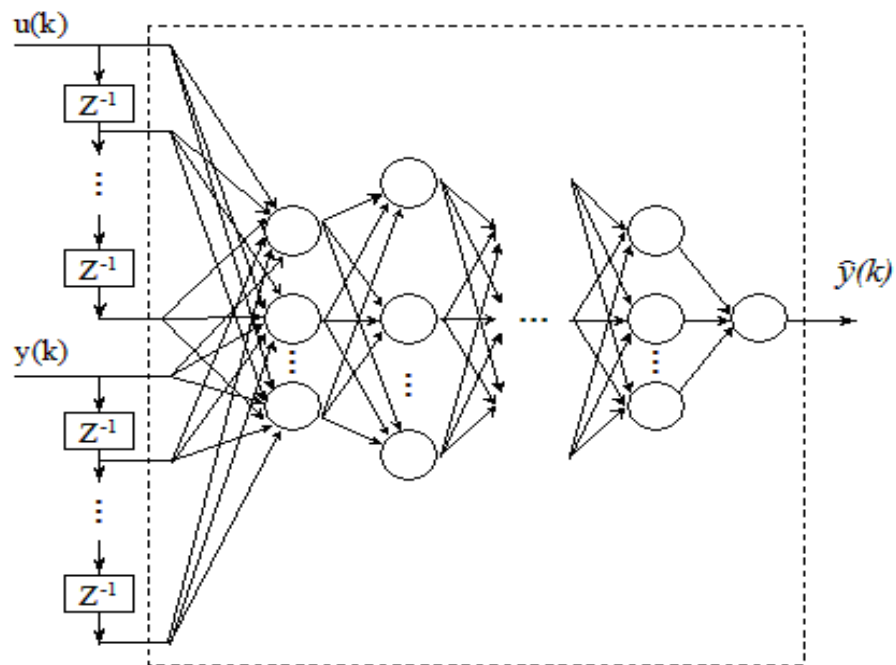


Рис. 2.1– Нейромережева модель об'єкта

ШНМ є універсальними апроксиматорами і дозволяють апроксимувати з будь-якою заданою точністю будь-яку безперервну функції [20], за умови, що

існує достатня кількість прихованих шарів в мережі. Це ствердження справедливе і для мереж тільки з одним прихованим шаром. Необхідною умовою є те, що функції активації нейронів прихованого шару $f(\cdot)$ мають бути безперервними, обмеженими і непостійними. При цьому сигмоїдальні функції є лише одним з можливих варіантів активаційних функцій, що задовольняють цим умовам. Ці теоретичні результати є логічним обґрунтуванням використання ШНМ для моделювання нелінійних систем, так як гарантує, що мережі з одним прихованим шаром завжди буде достатньо для подання будь-якої довільної неперервної функції. Однак відкритим залишається питання про вибір кількості нейронів в прихованому шарі, яке забезпечить задану точність рішення. При цьому істотний вплив на швидкість навчання ШНМ відіграє вибір алгоритму навчання.

В даний час існує велика кількість методів налаштування параметрів ШНМ типу БП і РБМ, що відрізняються як динамічними властивостями, так і обчислювальною складністю. Навчання складається в налаштуванні ваг, що характеризують силу взаємодії між нейронами, і зазвичай виконується на кінцевій навчальній множині P , що містить q навчальних пар. Кожна навчальна пара включає вектор вхідних сигналів $P_q \leq q \leq P$ і відповідний йому цільовий (бажаний) вихідний вектор t_q .

РБМ мають високу швидкість навчання, і завдяки механізму адаптації структури мережі при їх навчанні не виникає проблем із зупинкою в локальних мінімумах. Однак треба зазначити, що число нейронів в шаблонному шарі експоненціально залежить від розмірності вхідного простору, що при використанні паралельної або паралельно-послідовної моделей об'єктів захаращує структуру мережі і збільшує розрахунковий час.

Зміна структури радіально-базисної мережі зазвичай здійснюється її поступовим ускладненням шляхом додавання нових нейронів, всякий раз, коли при появі чергового вхідного сигналу виникає помилка ідентифікації, що перевищує допустиму величину [20]. Параметрична ідентифікація (навчання мережі)

складається в налаштуванні її параметрів і зазвичай зводиться до мінімізації квадратичного функціонала помилки ідентифікації.

3 РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ГІДРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ

3.1 Аналіз проблеми водоструминного видалення поверхневих дефектів

Процес усунення дефектів на поверхні прокату з вуглецевої сталі здійснюється безперервною травильною лінією в рідких технологічних травильних розчинах. ТР – це розведена сірчана кислота, видаляє точкові оксиди і плівки, але також впливає на поверхню сталі, частково розчиняючи її. При зіткненні гострокутної абразивної частинки з металом відбувається процес зрізання мікронного шару всієї поверхні або локальних дефектів окалини. Тому для мінімізації витрат ТР і необґрунтованих втрат металу дуже важливо контролювати такі параметри процесу, як час перебування в ТР, температуру і склад травильного розчину в ваннах, тиск і швидкість ТР в гідрообробні водоструми (WJ).

Параметри цих процесів є нелінійними, взаємопов'язаними та опосередковано впливають один на одного. Одним із критеріїв контролю якості ТП є коефіцієнт чистоти поверхні, який використовує оцінки ідентифікації дефектів поверхні, і в загальному вигляді його можна представити:

$$q_e = \frac{\sum S_i^{Out} \cdot \delta_i}{\sum S_j^{\square} \cdot \delta_j}, \quad (3.1)$$

де S_i^{Out} – площа дефектів i -го класу товщиною δ_i на виході з ТП;

S_j^{\square} – площа дефектів j -го класу товщиною δ_j на вході в ТП.

Перевищення встановленого регламентом ТП значення q_e ($r_q < 0.02$) протягом певного періоду часу зазначеного вікна спостереження $(t(k); t(k+10))$

свідчить про необхідність зміни правил навчання та параметрів моделі ідентифікації. Другим критерієм контролю якості ТП є q_m – коефіцієнт витрати маси сталі (регулюється величиною $q_m < r_m = 0.05$):

$$q_m = \frac{m^{Out}}{m^{\square}}, \quad (3.2)$$

де m^{Out} і m^{\square} – маса сталевго валка після обробки та на вході в ТП відповідно.

Тому для мінімізації витрат ТР і необґрунтованих втрат металу дуже важливо контролювати такі параметри процесу, як час перебування в ТР, температуру і склад травильного розчину в ваннах, тиск і швидкість ТР в струмені води (WJ).

Параметри цих процесів є нелінійними, взаємопов'язаними та опосередковано впливають один на одного. Початкова енергія імпульсу потоку рідини ТР $E_I(\alpha)$ прямо (к-) пропорційна раціональному кореню дотичного напруження потоку ТР – $\tau_{st}(P_t)$ створюваного на поверхні дефекту внаслідок подачі ТР тиску P_t з відстані l від струменя до поверхні [3], що можна спростити так:

$$E_I(\alpha) \approx k \cdot l \cdot \sqrt{\tau_{st}(P_t)}, \quad (3.3)$$

де $E_I(\alpha)$ – енергія імпульсу потоку ТР, яка також нелінійно присутня в рівнянні Арреніуса [3], адаптованому до проблеми WJP, замінюючи збільшення теплової енергії E_T під час травлення Δt :

$$\ln \frac{C(t_{n+1})}{C(t_n)} = A \cdot e^{-\left(\frac{E_a + E_I(\alpha)}{R \cdot T}\right) \cdot \Delta t}, \quad (3.4)$$

де $C(t_{n+1})$ – концентрація сульфатної кислоти у ванні наприкінці зброджування через час Δt ; – вихідна концентрація кислоти;

$\Delta t = t_{n+1} - t_n$ – час зрошення дефекту;

A – фактор Арреніуса;

$Ea = f(C, T)$ – енергія активації реакції;

R – універсальна газова стала;

T – температура ТР (°К).

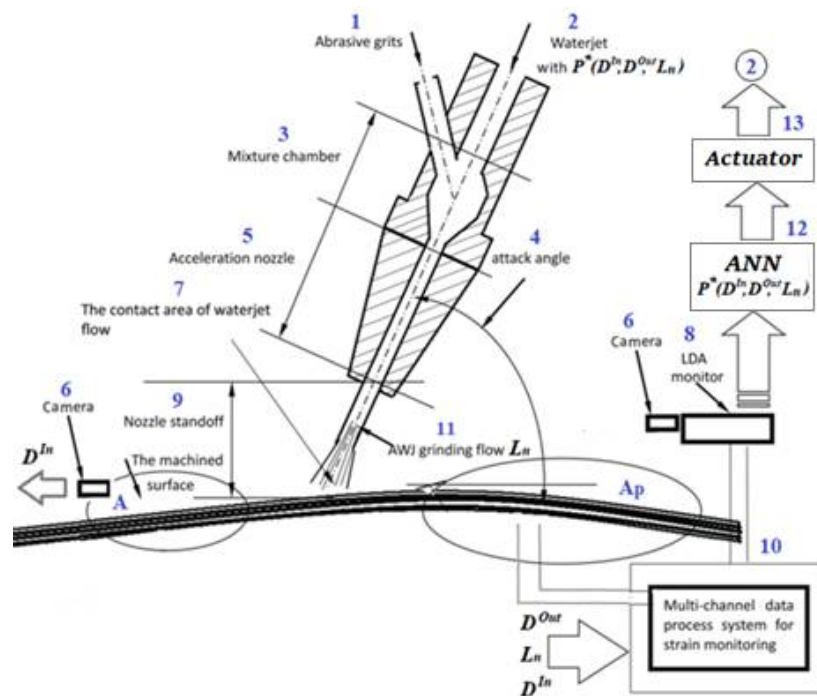


Рис. 3.1 - Схема управління абразивного WJP

1 – канал подачі абразивної суміші (в нашому випадку відсутній); 2 – канал живлення ТР під цільовим тиском; 3 – камера змішування абразивної суспензії; 4 – кут нахилу струменя відносно поверхні, що обробляється (в нашому випадку фіксований); 5 – прискорювальне сопло; 6 – камери ідентифікації дефектів до D^{In} та після D^{Out} WJP; 7 – площа контакту ТР та обробленої поверхні; 8 – монітор оператора; 9 – відстань від зрізу сопла до

поверхні; 10 – мікропроцесорна багатоканальна система обробки ознак дефектів і ознак ТР і формування завдання Р*; 11 – струмінь ТР; 12 – ШНМ (штучна нейронна мережа) ідентифікація завдання Р*; 13 – виконавчий механізм, що коригує тиск до Р*; площа обробки струменем: А – до і А_р – після обробки ТР.

Тиск ТР вимірюється цифровим датчиком PNP/NPN FESTO SDE1, дані якого використовуються для корекції керуючих дій контуру - зміни площини форсунок, через які подається ПС. Зміна площини зрошувальних форсунок здійснюється керуючою напругою змінної тривалості та полярності, яка подається регулятором на виконавчий механізм (ВМ) відповідно до довжини дефекту L , швидкості намотування $V(n)$, та задачі $P_i^{\square}(\delta)$, які формуються еталонною моделлю-ідентифікатором товщини дефекту за кодовим кольором δ . В якості ВМ використовується титановий вентиль типу H331g з діаметром повного перерізу 5 мм з кусково-лінеаризованою характеристикою [12], оснащений короткоходовим електроциліндром FESTO ESBF-LS-40-30-2.5P з лінійним приводом.

Переважно технологічні системи можна описати як «чорний ящик», який характеризується відсутністю інформації про те, які фізичні явища відбуваються всередині нього. Розробка моделі «чорної скриньки» — це формування набору правил виробництва з мінімальним числом k , які описують відображення його входів (вектора Xn) на вихід Y , що забезпечить найточнішу апроксимацію реальної системи в сенс мінімальної абсолютної похибки.

Кожне правило виробництва визначає деяку нечітку точку в просторі відображення, визначеному декартовим добутком $X1 \times X2 \times \dots \times Xn \times Y$ у наступній формі для нашого завдання:

$$R_1 : IF (C \approx a_1) \wedge (C_n \approx a_2) \wedge (T \approx a_3) \wedge (\delta \approx a_4) THEN (P_i^{\square} \approx b_1), \quad (3.5)$$

$$R_1 : IF (C \approx a_1) \wedge (C_n \approx a_2) \wedge (T \approx a_3) \wedge (\delta \approx a_4) THEN (P_i^{\square} \approx b_1),$$

При проведенні експериментальних випробувань обладнання WJP виконуються такі вимоги та умови:

$$\begin{cases} (r_q < 0.02)(r_m < 0.05) \\ ((C = (7; 14)) \wedge (C_n = (0; 15))), [\%] \\ T = (76; 88), [^\circ\text{C}] \end{cases} \quad (3.6)$$

отримано набір із 1200 опорних точок-синглетонів $(C, C_n, T, \delta, P_t^{\square})$, де C_n – концентрація продуктів реакції (FeSO_4 – тверді солі) в ТР. Збільшення значення параметра C_n тягне за собою підвищення абразивних властивостей ТР, погіршення критерію (3.2) і покращення критерію (3.1).

Для інтерполяції залежності $P_t^{\square} = f(C, C_n, T, \delta)$ використовувався відомий алгоритм FCM (Fuzzy C – Means) пакету Fuzzy Logic Matlab. Нечітка оцінка методом FCM була використана для формування нечіткого класифікатора задачі тиску P_t^{\square} на основі функцій належності Гауса [13].

Класифікатор було протестовано в реальному ТП за умов (3.6) для отримання розширеного набору даних $(C, C_n, T, \delta, P_t^{\square})$. В результаті отримано числові значення $P_t^{\square} = f(C, C_n, T, \delta)$ з параметрами, що призводять до задовільного рівня усунення дефектів при попередньому зрошенні дефектів з тиском подачі на жиклери $P_t^{\square} = (0; 6) \times 10^6$ [Па] і часом формування тиску t_f зі стану «струменя закриті».

Час повного ходу голки зрошувальної форсунки $h_f = [0; 2] \cdot 10^{-3}$ [м] від стану «закрито» до «відкрито» становить $t_f = 0.5 \cdot 10^{-3}$ с. У таблиці 3.1 наведено фрагмент отриманого набору даних за умов (3.6), де медіани відповідних n -х нечітких класів товщини та кольору дефекту відповідно – δ_n^M, Y_n^M . Значення часу проходження голки t_f від закритого стану до деяких відкритих станів P_t за умов досягнення відповідних значень (дані виробника) також наведено в табл. 3.1.

Нечіткий класифікатор $\delta(RGB)$ виявляє високу застосовність і точність в експериментальному діапазоні використовуваних параметрів, коефіцієнт розпізнавання на синтезованому тестовому наборі становив: $R^2 = 0.9971$.

Таблиця 3.1 - Кольоровий класифікатор (фрагмент) поверхневих дефектів і параметрів їх усунення для умов (3.6)

n	Колір дефекту X_n	$\delta_n \cdot 10^{-6}$, m	Y_n	Y_n^M	$\delta_n^M \cdot 10^{-6}$, m	$P_t^{\square} \cdot 10^6$, Pa	$t_f \cdot 10^{-4}$, s
1	Матовий алюміній	0.1÷0.4	227÷231	229	0.25	0.3	0.2
2	Блідо-блакитний	5÷10	218÷226	223	7.5	1.8	1.1
3	Світло-сірий	13÷15	200÷217	209	14.0	3.6	2.2
4	Сірий	14÷25	189÷206	198	19.5	3.9	3.0
5	Темно-сірий 1	24÷36	137÷148	142	25.0	4.5	4.0
6	Темно-сірий 2 матовий	38÷32	45÷ 2	67	35	4.8	4.2
7	Майже чорний	34÷40	3 ÷ 39	21	37	6.0	5.0

3.2 Інтелектуальна модель управління обробкою поверхневих дефектів

Здатність нейронних мереж апроксимувати невідомі області відображення «вхід-вихід» широко використовується для ідентифікації об'єктів. Властивості радіальної штучної нейронної мережі (ШНМ) повністю визначаються радіальними базисними функціями (RBF), які використовуються в нейронах прихованого шару.

Мережі RBF є універсальними апроксиматорами, і оскільки присутній лише один нелінійний прихований шар, параметри лінійного вихідного шару підлягають налаштуванню за допомогою стандартних процедур [14]. Для їх

навчання можна використовувати високу швидкість і властивості фільтрації, що дуже корисно при обробці «зашумлених» вимірювань.

Нелінійне відображення входу-виходу може бути описано співвідношенням:

$$d=f(x), \quad (3.7)$$

де x – $(n+1)$ вхідний вектор, d – вихід, $f(x)$ – невідома вектор-функція, яка обчислюється за допомогою навчальної вибірки .

Проблема навчання апроксимуючої нейронної мережі полягає в тому, щоб знайти функцію $F(x)$, настільки близьку до такої $f(x)$:

$$\|F(x) - f(x)\| \leq \varepsilon, \forall x(k): k=1,2,\dots,N, \quad (3.8)$$

де $F(x)$ – відображення, реалізоване мережею, ε – мале позитивне число, яке визначає точність апроксимації. У цьому контексті проблема апроксимації повністю збігається з проблемою «навчання з учителем» або навчання під керівництвом, де послідовність відіграє роль вхідного сигналу ШНМ, а $f(x)$ є навчальним сигналом.

Процес побудови моделі ділиться на два етапи – структурну та параметричну ідентифікацію, а застосування ШНМ також вимагає вирішення двох задач: визначення структури мережі та налаштування (навчання) її параметрів.

Зазвичай зміна структури мережі здійснюється шляхом її поступового ускладнення шляхом додавання нових нейронів, що виконується щоразу, коли виникає додаткова помилка ідентифікації $e=d-y$ при появі нового вхідного сигналу, що перевищує допустимий. Навчання (параметрична ідентифікація) полягає у визначенні параметрів мережі і зводиться до мінімізації помилки ідентифікації – як правило, функціоналу квадратичної помилки:

$$J(k)=\|\varepsilon(k)\|^2=\|d(k)-y(k)\|^2. \quad (3.9)$$

На практиці найбільш поширеними є дискретні алгоритми навчання виду:

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta(k) e_j(k) x_i(k), \quad (3.10)$$

або у векторній формі:

$$w_j(k+1) = w_j(k) - \eta_k \nabla_{w_j} E_j(k) = w_j(k) + \eta(k) e_j(k) x_i(k), \quad (3.11)$$

де $\nabla_{w_j} E_j(k) = -e_j(k) x_i(k)$ – вектор градієнта цільової функції за синаптичними вагами. Швидкість процесу навчання за алгоритмом (3.9), (3.10) повністю визначається вибором параметра η_k , який визначає крок зсуву в просторі настроюваних параметрів. Цей параметр природно підібрати так, щоб швидкість збіжності поточних значень $w_j(k)$ до оптимальних гіпотетичних ваг була максимальною. Вводимо до розгляду вектор відхилень поточних значень від оптимальних $w_j(k)$ у вигляді:

$$\tilde{w}_j(k) = w_j - w_j(k), \quad (3.12)$$

і розв'язок диференціального рівняння:

$$\frac{\partial \|\tilde{w}_j(k)\|^2}{\partial \eta} = 0, \quad (3.13)$$

оптимальне значення крокового параметра можна отримати у вигляді:

$$\eta(k) = \|x(k)\|^{-2}, \quad (3.14)$$

це призводить до однокрокового алгоритму навчання:

$$w_j(k+1) = w_j(k) + \frac{e(k) x(k)}{\|x(k)\|^2}. \quad (3.15)$$

Вираз (3.15) відомий як алгоритм Качмаржа – Відроу – Хоффа [15] в теорії ШНМ. Розріз моделі $P_t^{\square}(k)=f(C, C_n, T, \delta(k))$, зведений до фіксованих параметрів: температури T та концентрації C ТР, визначає P_t^{\square} – тиск, необхідний для забезпечення заданої швидкості процесу при поточних змінних значеннях товщини дефектів δ , і передає в k -й момент дискретного часу як значення завдання для регулятора WJ.

На основі нечіткого класифікатора $\delta(RGB)$, отриманого методом FCM, у пакеті NeuroPh studio [16] побудовано RBNN (рис.3.1) зі структурою (4-16-1), що утворює поверхню $P_t^{\square}=f(C, C_n, T, \delta)$, де C_n – концентрація продуктів реакції (FeSO4 - солі з абразивним ефектом) в ТР.

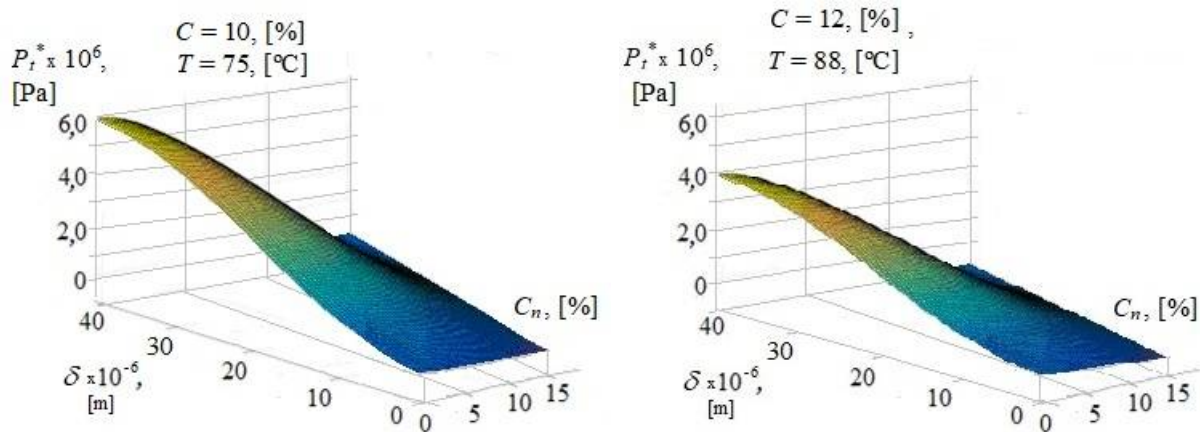


Рис. 3.2 - Фрагменти поверхні $P_t^{\square}=f(C, C_n, T, \delta)$

3.3 Модель інтелектуального керування тиском розчину в струмені

Обмежені можливості лінійного регулювання тиску в форсунках не завжди дозволяють підтримувати необхідну швидкість зміни вихідних параметрів ТП. Динамічні зміни знижують якість усунення дефектів. Ці проблеми можна вирішити шляхом удосконалення системи управління за допомогою РБНН, налаштованої на реальні дані ТП. Для цього доцільно змоделювати процес керування тиском.

Нейромережева модель регулятора тиску живлення ТР для попереднього зрошення дефектів формує керуючу напругу певної тривалості та полярності. У повному вигляді представлення RBNN попереднього зрошення несистемних точкових дефектів поверхні сталевих смуги (СС) є досить громіздкою структурою:

$$\tau_{on}^U(n) = F_{NN}(C, T, V(n), D^m, \delta_n(Y_n^m), P_t(n-1), P_t(n), \cdot t_f(n-1), t_f(n), \Delta t_p) \quad (3.16)$$

де $\tau_{on}^U(n)$ – тривалість подачі керуючої напруги на струмінь за цикл n ;

C, T – параметри ТР (стабільні при зрошенні);

$V(n)$ – швидкість намотування стрічки (постійна);

D^m – геометричні координати m -го дефекту;

$\delta_n(Y_n^m)$ – оцінка товщини дефекту, яка залежить від оцінки яскравості його кольору $Y_n(RGB)$ та оцінюється класифікатором;

$\Delta t_p = t_f(n-1) - t_f(n)$ – вводиться в RBNN для розрахунку полярності керуючої напруги U при зміні $Y(GB)$;

$Y(GB)$ – оцінка дефектів за яскравістю.

У кожному циклі керування підтримуються оптимальні значення параметрів ПС. При використанні кольорового класифікатора дефектів можна оцінити значення параметра, який контролює їх усунення – час на регулювання перерізу сопла для створення необхідного тиску ПС для зрошення дефекту.

Це дозволяє спростити модель (3.14), зменшивши її розмірність.

Для дефектів прокату, що підлягає травленню, RBNN за складовою товщини $\delta_n(Y_n^m)$ та геометричними координатами довжини дефекту $D_y^m = (y_2^m - y_1^m)$ визначає необхідний тиск подачі ТР $P_j^{\square}(n)$ через j -й струмінь:

$$\tau_{on}^U(n) = f_{NN}(V(n), D_y^m(n), P_t(n-1), P_t^{\square}(n), \cdot t_f(n-1), t_f(n)) \quad (3.17)$$

Модель зображено на рис. 3.3.

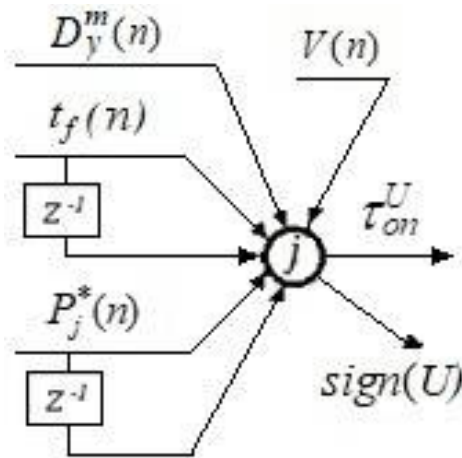


Рис. 3.3 - Схема RBNN моделі керування напругою j -го струменя

The dependences $t_{f(i,i+1)} = F(P_{t(i,i+1)})$ are assumed to be linear for $i=1,2,\dots,n$ in adjacent segments. The assumption about the effect of linear laws $t_f(P_t)$ within n classes makes it possible to determine $t_{f(i)}$:

Представлення моделі RBNN часу спрацьовування струминного електроприводу керування має структуру (6-24-1) із затримкою тактового сигналу z^{-1} для врахування динаміки зміни параметрів.

Тривалість ввімкнення електроприводу τ_{on}^U для керування площею прохідного перетину струменя та тиску на виході ТР із струменя на величину ΔP_t , адаптивно змінюється за прийнятим пропорційним законом з коефіцієнтами k_n на кожному відрізьку P_{n+1} всередині n -й клас (рис. 3.3) – відомі лише окремі одиниці виміряних і паспортних значень. Припускається, що неперервна функція $t_f(P_t)$ монотонно зростає і лінеаризується кусково в n нерівних класах на області визначення $P_t = (0; 6)$ МПа.

Залежності вважаються лінійними для суміжних ділянок. Припущення про дію лінійних законів у межах класів дозволяє визначити:

$$k_n = \frac{t_{f(n)} - t_{f(n-1)}}{P_{t(n)} - P_{t(n-1)}} \quad (3.18)$$

$$t_{f(i)} = \frac{P_t(t_i) - P_{t(n-1)}}{k_n}, \forall P_t(t_i): P_{t(n-1)} < P_t(t_i) \leq P_{t(n)}. \quad (3.19)$$

Відомо значення попередньої ітерації, потім тривалість подачі керуючої напруги для зміни площі поперечного перерізу струменя:

$$\tau_{on}^U = |t_f(n-1) - t_f(n)| \quad (3.20)$$

Зміна полярності напруги (у напрямку руху голки струменя) визначається знаком відхилення тиску від робочого тиску в попередній момент:

$$\text{sign}(U_{on}) = \text{sign}(P|t(n-1) - P_{t(n)}) \quad (3.21)$$

Тоді маркер реального часу включення струменя t'_i :

$$t'_i = t_i - \tau_{on}^U + \frac{L_{7-3}}{V(n)}, \quad (3.22)$$

де t_i – маркер ідентифікації зони дефекту в реальному часі;

$L_{7-3} \approx (120 \div 240)$ [м] – задана фіксована відстань петлі рухомого складу;

$V(n) = \text{const}$ – умовно-постійна регульована швидкість ≤ 2 [м/с].

Це дає системі час для опрацювання керуючих сигналів.

За позиційними координатами частини НД часто відносять до різних сегментів смуги прокатки [11]. У загальному вигляді логічним правилом для визначення завдання обробки дефектної частки струменя в момент часу є геометрична приналежність дефектної частки відповідному сегменту прокату:

$$A_j: P_j(t'_i) = R(x, y, \delta(X_m)) \wedge (D_y^m(t'_i) \in S_j) \quad (3.23)$$

де R – визначальне правило переважної альтернативи, яке уточнюється при синтезі або навчанні регулятора і усуває неоднозначність ситуації керування.

3.3 Інтелектуальна система управління обробки поверхневих дефектів

Структура інтелектуальної системи управління обробки поверхневих дефектів наведена на рис. 3.4.

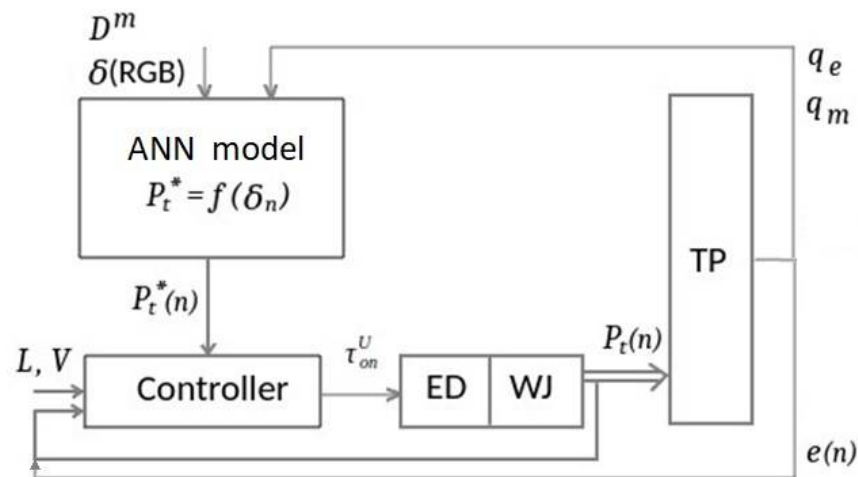


Рис. 3.4 – Структура інтелектуальної системи управління обробки поверхневих дефектів

На рис. 3.3 показано: $\delta(RGB)$ – нейромережева модель-ідентифікатор товщини дефекту δ за кольоровим кодом, отримана з нечіткого класифікатора, який був розроблений нечітким методом *c-means* після обробки експериментального набору даних [22, 23];

D^m – координати геометричного прямокутника m -го дефекту;

δ – товщина дефекту;

$P_t^{\square}(n)$ – завдання, сформовані моделлю-ідентифікатором ШНМ зі структурою 4-16-1;

$P_t(n)$ – значення реального тиску ТР в момент часу n ;

$e(n)$ – похибка в роботі регулятора тиску;

$L \approx (120 \div 240)$ [м] – фіксована відстань між двома точками: реєстрації та обробки дефектів;

V - швидкість намотування стрічки дистиля;

τ_{on}^U – тривалість подачі керуючої напруги на струмінь, яка формується ШНМ моделлю регулятора тиску живлення ТР зі структурою 6-24-1;

ED – електропривод;

WJ – оброблюючі сопла;

ТР – технологічний процес;

q_e – чистота поверхні, q_m – критерії масової витрати сталі.

Для створення такої інтелектуальної системи необхідно враховувати характер зміни вхідних параметрів, архітектуру штучної нейронної мережі (ШНМ), що розробляється, і набори даних для навчання.

Здатність нейронних мереж апроксимувати невідомі області відображення «вхід-вихід» широко використовується для ідентифікації об'єктів. Властивості радіальної ШНМ повністю визначаються радіальними базисними функціями (RBF), які використовуються в нейронах прихованого шару.

Мережі RBF є універсальними апроксиматорами, і оскільки присутній лише один нелінійний прихований шар, параметри лінійного вихідного шару були налаштовані за допомогою стандартних процедур [21]. Для їх навчання можна використовувати високу швидкість і властивості фільтрації, що дуже корисно при обробці «зашумлених» вимірювань.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОЇ МОДЕЛІ

Згідно до розробленої моделі інтелектуального керування тиском розчину в струмені ситуація зміни тиску від P_{i-1} до P_i без зміни знака напруги згідно до виразу (3.21) проілюстрована на рис.4.1: $\tau_{on}^U(i) = \square_{\square} \sqrt{3.6 - 1.65 \sqrt{P_i - P_{i-1}}} = 0.95 \cdot 10^{-4}$ с.

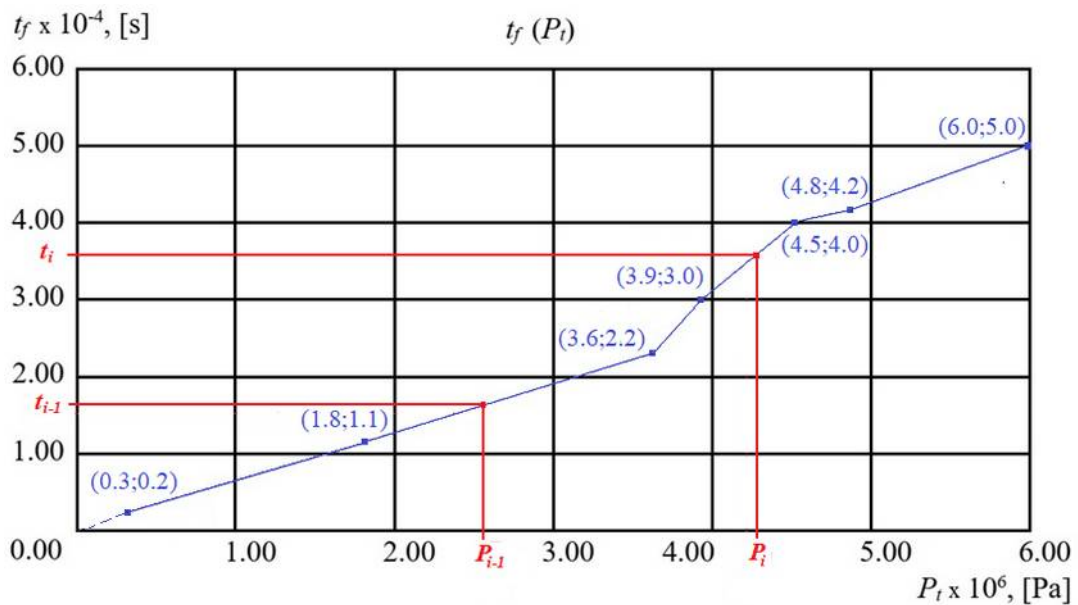


Рис. 4.1 – Подання лінійної залежності $t_f(P_t)$

На рис. 4.2 наведено приклад вхідної сегментації несистематичних дефектів прокату. Ширина сегмента за розміром відповідає частині поверхні прокату, що зрошується струменем у момент керуючого впливу.

Для дефектів прокату, що підлягає травленню, існуюча радіальна базова мережа $\delta(x, y, Y)$ на основі компоненти яскравості та геометричних координат формує зображення дефекту. Формується завдання тиску подачі P_t^{\square} травильного розчину через j -й струмінь:

$$P_t^{\square} = f(C = const, C_n = const, T = const, \delta).$$

Моделі, отримані шляхом моделювання в пакеті Neuroph Studio.

Вихідний сигнал моделі $P_i^{\square}(x, y, \delta(Y))$ та сигнал t_f використовуються як вхідні дані для моделі RBNN (3.17). Базові функції Гауса з фіксованими центрами і радіусами використовуються в моделі для апроксимації рельєфу дефекту $\delta(RGB)$, в моделі $P_i^{\square}(x, y, \delta(Y))$ – для генерації керуючих впливів і подальшої корекції стандартів.

Для дефектів прокату, що підлягає травленню, радіальна базова мережа $\delta(x, y, Y)$ на основі компоненти яскравості та геометричних координат формує зображення дефекту. Задача тиску подачі травильного розчину через j -й струмінь $P_i^{\square} = f(C = const, C_n = const, T = const, \delta)$ утворюється як показано на рис. 4.3 та рис. 4.4. Моделі зображення поверхні обробки дефектів були отримані шляхом моделювання в пакеті Neuroph Studio.

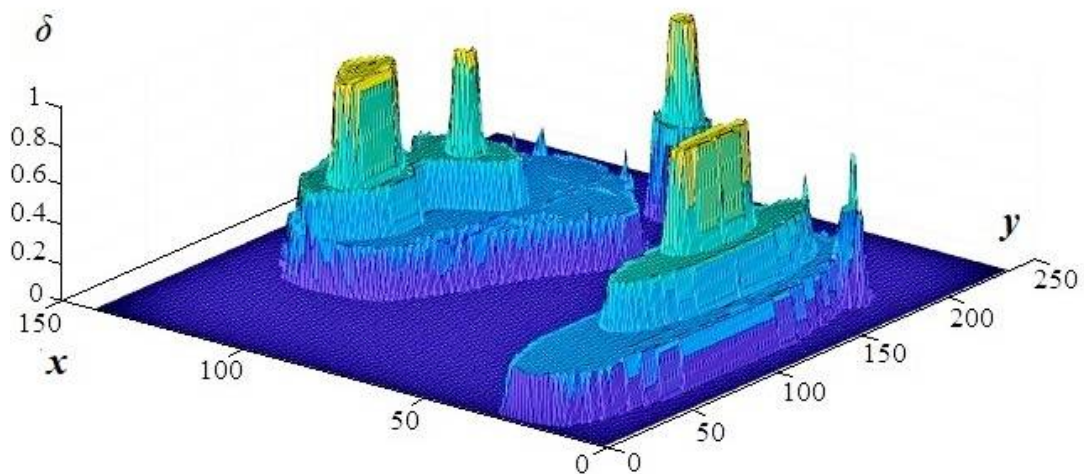


Рис. 4.3 - Зображення товщини дефекту $\delta(x, y, Y)$

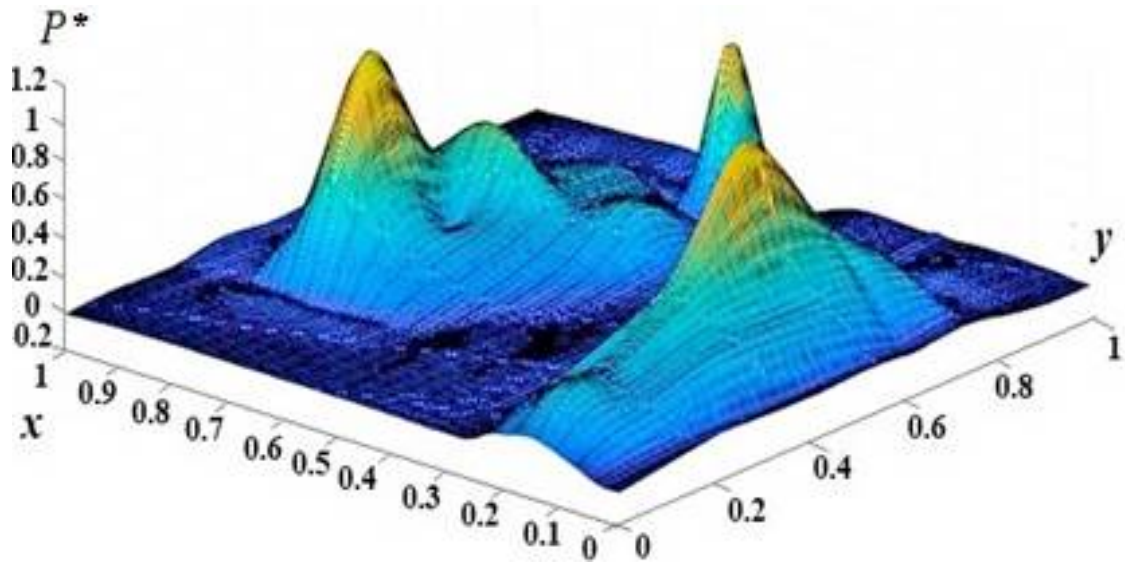


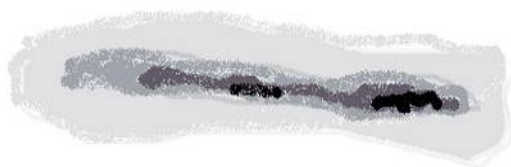
Рис. 4.4 — Ідентифікований $P_t^\square(x, y, \delta(Y))$

Похибка в роботі регулятора $e(n)$ при регулюванні тиску в струміні (поз. WJ на рис. 2.1) визначається різницею між поточним значенням реального тиску ТР $P_t(n)$ і завданням $P_t^\square(n)$:

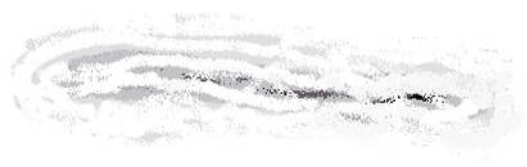
$$e(n) = P_t(n) - P_t^\square(n). \quad (4.1)$$

При перевищенні рівня накопичених похибок у контурі керування за критеріями (3.1) та (3.2) коригується еталонна модель формування завдання.

Зображення вихідних поверхневих дефектів (а, в, д) ліворуч та зображення дефектів після обробки (б, г, е) праворуч наведено на рис. 4.5.



(а)



(б)

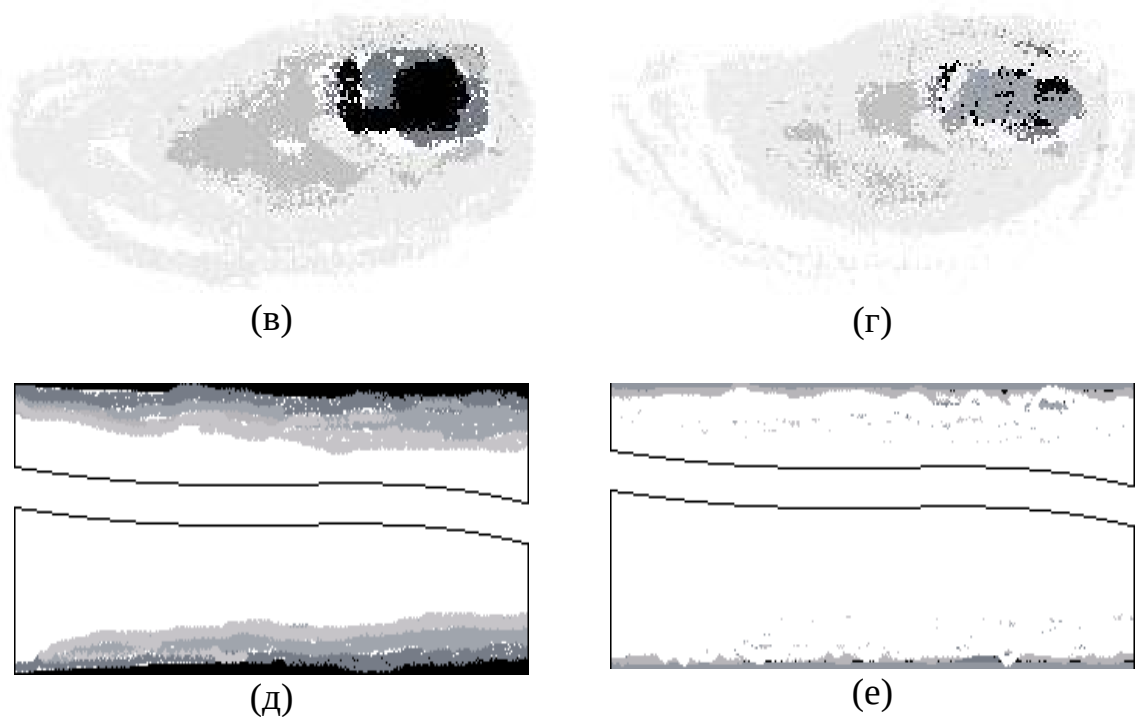


Рис. 4.5 - Приклади обробки дефектів: (а, б, в, г) – масштаб 20:1, (д, е) – масштаб 40:1

На рис. 4.4 (б, г) показано оброблені НД, які відповідають необхідним значенням критеріїв (3.1) та (3.2). На рис. 4.5 (е) проілюстровано незадовільний результат обробки, пов'язаний з якісними відмінностями в дефектах, утворених уздовж кромки прокатої смуги та НД. У цьому випадку необхідно переналаштувати моделі P_t^{\square} і τ_{on}^U : параметрично, а можливо і структурно.

Верифікація та аналіз якості побудованої моделі відповідно до методології статистичного підходу засновані на проведенні імітаційних експериментів, у процесі яких реалізується багатокритеріальне оцінювання якості моделі. При цьому визначаються внутрішні та зовнішні параметри якості моделі на основі стандартизованих критеріїв. До таких критеріїв відносять насамперед критерії точності моделювання, що дозволяють порівнювати конкуруючі моделі [18].

Мірою точності або адекватності прогнозу є розмір різниці між фактичними значеннями досліджуваних даних і розрахованими побудованою моделлю. Щоб визначити таку різницю існує багато критеріїв, які

допоможуть визначити точність прогнозу тієї чи іншої моделі. Розглянемо використані в даній роботі.

Коефіцієнт детермінації R^2 – це квадрат множинного коефіцієнта кореляції, який чисельно показує частку варіації залежної змінної, яку можна передбачити на основі незалежної змінної. Коефіцієнт детермінації обчислюється за формулою (4.2):

$$R^2 = 1 - \frac{RSS}{TSS}, \quad (4.2)$$

де RSS – це сума квадратів залишків регресії;

TSS – загальна сума квадратів.

Він використовується в контексті статистичних моделей або, в нашому випадку, для прогнозування за допомогою часових рядів, основною метою яких є передбачення майбутніх результатів або перевірка гіпотез на основі іншої пов'язаної інформації. Він визначає, наскільки добре спостережувані результати відтворюються обраною моделлю на основі частки загальної варіації результатів, що пояснюються цією моделлю. З формули (4.2) можна зробити висновок, що модель прогнозування є адекватною якщо коефіцієнт детермінації буде близьким до одиниці: $R^2 \rightarrow 1$.

Середня квадратична похибка:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2. \quad (4.3)$$

Корінь квадратний із середньої квадратичної похибки:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}. \quad (4.4)$$

У нашому випадку закон $t_f(P_t)$ достовірно невідомий, тому з урахуванням монотонності залежності $t_f(P_t)$, побудова регулятора керування у вигляді РБН

що апроксимує невідомі значення уніполярними сигмоїдальними функціями, які безперервно диференційовані між відомими одиничними точками є найбільш точним рішенням:

$$t_f(P_t) = \frac{t_n}{1 + e^{-k_n(x - P_t)}} \quad (4.5)$$

де k_n – коефіцієнт нахилу функції в n -му класі;

P_t – абсциса опорної медіани цього класу;

t_n – час повного проходження голки сопла, медіана n -го класу згідно з рис.4.1.

Практичний інтерес представляє модель, яка структурно відображає залежність між виміряним тиском P_t , керуючими ефектами регулятора тиску та якістю обробки дефектів у режимі реального часу. Враховуючи концентрично-еліптичну форму НД на поверхні смуги, що зумовлена фізичною природою їх утворення, можна застосовувати превентивне прогнозування керуючих впливів по горизонтах зміни відтінку на дефектній області за результатами їх виявлення, а також системних дефектів.

Результати оцінювання НМ різної структури наведено у таблиці 4.1, напівжирним виділено НМ з оптимальними параметрами.

Таблиця 4.1 – Оцінки показників навчання НМ (фрагмент)

Структура	Активізаційна функція	Помилки:						R ²
		Навчання		Валідації		Тестування		
		MSE x 10 ⁻⁶	RMSE x 10 ⁻³	MSE x 10 ⁻⁶	RMSE x 10 ⁻³	MSE x 10 ⁻⁶	RMSE x 10 ⁻³	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6- 12 -1	Hyperbolic tangent	6,0412	2,4579	7,0956	2,6638	6,1278	2,4745	0,9235

6- 24 -1	Hyperbolic tangent	5,3346	2,3097	6,1547	2,4809	5,8032	2,4080	0,9323
----------	--------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Продовження табл. 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6- 24 -1	Sigmoid	4,0848	2,0211	5,0846	2,2551	4,1318	2,0322	0,9981
6- 36 -1	Sigmoid	4,2356	2,0581	5,7712	2,4023	4,2896	2,0711	0,9923
10-24 -1	GBR	6,1469	2,4793	7,3123	2,7041	6,4102	2,5318	0,8978
10-36 -1	GBR	5,8236	2,4132	7,0012	2,6460	6,3898	2,5278	0,9036

Запропоноване рішення дозволило використати абразивну дію шламу, який з часом утворюється в ТР без використання дорогого обладнання дозованого змішування абразиву з рідиною-носієм. У поєднанні з іншими заходами з автоматизації модернізованих сірчаноокислотних ліній травлення рішення дозволить зменшити споживання сірчаної кислоти на і збільшити швидкість ТП з 1,2 до 1,96 [м/с]. Враховуючи відносно невелику габаритність моделей і низьку швидкодію ТП, рішення може бути реалізовано в структурі ПІОТ ТП у вигляді недорогої мікроконтролерної системи.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі була розроблена інтелектуальна модель гідроабразивної обробки плоских поверхонь задля зменшення споживання сірчаної кислоти при автоматизації модернізованих сірчаноокислотних ліній травлення, а саме: інтелектуальна модель управління обробкою поверхневих дефектів та модель інтелектуального керування тиском розчину в струмені.

Також був проведений аналіз процесу гідроабразивної обробки та аналіз процесу усунення дефектів на поверхні прокату.

Спосіб автоматизованої гідроабразивної обробки поверхонь є перспективною технологією і може бути використаний для різних видів обробки: закруглення гострих кромek; полірування та шліфування складних поверхонь; видалення задирок і зачищення зварних швів; підготовка поверхні до нанесення покриття; видалення органічних відкладень з гвинтів і поверхонь дна морських суден; видалення забруднених і пофарбованих бетонних поверхонь; видалення з усієї поверхні або локально дефектного шару (окалини).

В результаті запропоноване рішення дозволило використати абразивну дію шламу, який з часом утворюється в ТР без використання дорогого обладнання дозованого змішування абразиву з рідиною-носієм. У поєднанні з іншими заходами з автоматизації модернізованих сірчаноокислотних ліній травлення рішення дозволить зменшити споживання сірчаної кислоти на і збільшити швидкість ТП з 1,2 до 1,96 [м/с]. Враховуючи відносно невелику габаритність моделей і низьку швидкодію ТП, рішення може бути реалізовано в структурі інтелектуальній системі управління ТП у вигляді недорогої мікроконтролерної системи.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. World Economic Forum. URL: <https://www.weforum.org/reports/annual-report-2021-2022/in-full>. (дата звернення 26.11.2023)
2. Thai Nguyen, Jun Wang & Weiyi Li Process models for controlled-depth abrasive waterjetmilling of amorphous glasses. *Int J Adv Manuf Technol*. March 2015, 77. P.1177–1189.
3. US Patent № 6419756. Process and equipment for a metal strip pickling. B08B 1/02; B08B 7/04. Wielfried Schlechter; assignee: Siemens Aktiengesellschaft (Munich, DE); filing date 01.06.2000
4. Sulfuric Acid and Ferrous Sulfate Recovery from Waste Pickling Liquor, EPA Technology Transfer Capsule Report, EPA-660/2-73-032, 82 p.
5. European Commission, Reference Document on Best Available Techniques For the Ferrous Metals Processing Industry, December, 2001, 538 pp.
6. Patent 104710 Ukraine, IPC (2014.01) C23G 3/00, B08B 1/02 (2006.01), C23G 7/08 (2006.01), B08B 3/08 (2006.01), C23F 1/08 (2006.01), B08B 13/00. The device for continuous pickling of rolled carbon steel strip. Arsenyeva O.P., Ilyunin O.O., Perevertaylenko O.Yu., Podpruznikov P.M., Selyakov O.M., Timofeyev V.A.; applicant and owner Kharkiv National University of Radio Electronics. No. u 2012 09428; filing date 02.08.12; published 25.02.2014, bul. № 4 (in ukr.)[Електронний ресурс]. URL: <https://uapatents.com/5-104710-pristriij-dlya-bezperervnogo-travlennya-prokatu-smugi-vuglecevo-stali.html>.
7. El Midany et al. Experimental study and modelling of abrasive water jet cutting of aluminum alloy 2024. *Journal of ESMT*, Volume (3) – Issue (1) – Jan 2019.
8. Техніка автоматизації та освітні рішення. URL: <https://www.festo.com>.
9. Piegat, A., *Fuzzy Modeling and Control*, Springer-Verlag Company, Heidelberg, 2011.

10. S. Kaczmarz. Approximate solution of systems of linear equations // Int. J. Control. – 1993 – 53. – P. 1269-1271.
11. F. Zhang, P. Zhan, H. Tian et al., Optimization of HS-SPME Using Artificial Neural Network and Response Surface Methodology in Combination with Experimental Design for Determination of Volatile Components by Gas Chromatography-Mass Spectrometry in Korla Pear Juice. Food Analytical Methods, 2018, vol.11, pp. 2218–2228. URL: <https://doi.org/10.1007/s12161-018-1173-6>.
12. Xiong, N., Shen, Y., Yang, K. *et al.* Color sensors and their applications based on real-time color image segmentation for cyber physical systems. J Image Video Proc. 2018, 23 (2018). doi.10.1186/s13640-018-0258-x
13. Flowwaterjet. URL: https://www.flowwaterjet.com/FlowWaterjet/media/Flow/8_Footer/Resources/Webinars/Capabilities-and-Advancements-in-Waterjet-Webinar.pdf.
14. O. Bezsonov, O. Ilyunin, A. Khusanov, O. Rudenko, O. Sotnikov, Intelligent Identification System of the Process Liquid Solutions Composition, in: Proceedings of COLINS-2022: 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems, May 12–13, 2022, Gliwice, Poland. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper69.pdf>.
15. D. Needell, S. Deanna, W. Srebro, et al. Stochastic gradient descent, weighted sampling, and the randomized Kaczmarz algorithm”. Mathematical Programming, 155 (2016), pp. 549–573.
16. Perry J.S., 2018, Create an artificial neural network using the Neuroph Java framework. URL: <https://developer.ibm.com/tutorials/cc-ann-neuroph-machine-learning/> (дата звернення 01.12.2023).
17. O. Ilyunin, M. Khodak, V. Pyrohov, O. Pasholoc, M. Tryhuba, S. Serdiuk. Intelligent models for control of jet hydro-processing of rolled steel defects. Інтегровані технології та енергозбереження. Системи управління та обробки інформації, — Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – №2,- с.45-56 ISSN 2078-5364 (print) ISSN 2708-0625 (online).

18. O. Ilyunin, S. Serdiuk, V. Pyrohov, M. Tryhuba. Features of using intelligent automation for Water Jet Technology. Materials of the XI International Scientific Conference «Information-Management Systems and Technologies» 21th – 23th September, 2023, Odessa. P.p. 85-86.

19. M. Fan, J. Hu, R. Cao, K. Xiong, X. Wei, Modeling and prediction of copper removal from aqueous solutions by nZVI/rGO magnetic nanocomposites using ANN-GA and ANN-PSO, Sci Rep. 2017 Dec 21; 7(1):18040. doi: 10.1038/s41598-017-18223-y

20. D. Needell, S. Deanna, W. Srebro, et al. “Stochastic gradient descent, weighted sampling, and the randomized Kaczmarz algorithm”, Mathematical Programming, 155 (2016), pp. 549–573.

21. S. Perry, 2018, Create an artificial neural network using the Neuroph Java framework, URL: <https://developer.ibm.com/tutorials/cc-ann-neuroph-machine-learning/> accessed 10.05.2023

22. O.O. Ilyunin, Identification of Non-Systemic Defects in a Continuous Technological Process of Rolled Steel Pickling, Bulletin of the Kherson National Technical University, №1(46), (2013), 394-396.

23. O. Bezsonov, O. Ilyunin, B. Kaldybaeva, O. Selyakov, O. Perevertaylenko, A. Khusanov, O. Rudenko, S. Udoenko, A. Shamraev and V. Zorenko, Resource and Energy Saving Neural Network-Based Control Approach for Continuous Carbon Steel Pickling Process, Journal of SDEWES 7 (2019) 275–292. doi.10.13044/j.sdewes.d6.0249