

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**ІЛЮНІН ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ**

УДК 681.54:004.896

**СИНТЕЗ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ  
ПРОЦЕСОМ БЕЗПЕРЕРВНОГО ТРАВЛІННЯ СМУГОВОЇ СТАЛІ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Харківському національному університеті радіоелектроніки Міністерства освіти та науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Руденко Олег Григорійович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри комп'ютерних інтелектуальних  
технологій та систем

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Купін Андрій Іванович,**  
Криворізький національний університет МОН України,  
завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж,

доктор технічних наук, професор,  
**Ляшенко Сергій Олексійович,**  
Харківський національний технічний університет сільського  
господарства ім. Петра Василенка МОН України,  
завідувач кафедри безпеки життя і права.

Захист дисертації відбудеться " 29 " квітня 2021 р. о 15<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14

Автореферат розісланий "26" березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

І.П. Плісс

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Удосконалення систем автоматизованого керування базовими технологічними лініями, що визначають якість кінцевої продукції у виробництві сталевого прокату є одним з найбільш перспективних напрямків підвищення ефективності ширококутових прокатних станів. До найбільш важливих технологічних процесів виробництва прокату слід віднести процес травління смугової сталі, що здійснюється за допомогою безперервного травильного агрегату (БТА). БТА формує споживчі характеристики прокату та функціонує за умов невизначеності та нестаціонарності: частина змінних (зокрема, температура та концентрація травильного розчину) вимірюються зі значною похибкою, а деякі фактори взагалі не контролюються в реальному часі, що негативно впливає на керування режимами травління.

Зростання попиту на різновиди сортаменту високоякісного прокату із особливими вимогами до його властивостей (товщини листа та стану поверхні, якості нанесення захисного покриття та додаткової термічної обробки) останнім часом призвело до поширення потужностей прокатного виробництва. Як наслідок суттєво зросли витрати енергії та травильних розчинів на тону кінцевої продукції. Оптимізація об'єктивного зростання таких витрат потребує постійного удосконалення технології, обладнання, та систем автоматизації керування виробництвом.

Ефективне керування травлінням смугової сталі є можливим лише на основі створення більш точних моделей та методів, що повинні бути нечутливими до суттєвих завад та похибок вимірів. Таким вимогам задовольняють інтелектуальні методи контролю, ідентифікації та керування динамічними системами, що експлуатуються за умов суттєвої невизначеності щодо характеристик керованого об'єкту та зовнішнього середовища на основі об'єднання принципів теорії нечіткого керування та штучних нейронних мереж. Різні аспекти інтелектуального керування для відомих параметрів об'єкту досліджувались, зокрема, в роботах В.І. Гостєва, І.З. Батиршина, М.Б. Коломойцевої, А.П. Ротштейна, А.А. Ускова, S. Omatu, F. Takeda, L. Zadeh, R. Yager, D. Filev, С.Хайкіна, Е.В. Бодянського, О.Г.Руденко та інших відомих учених. Значна кількість існуючих підходів з використанням детермінованих, стехіометричних або статистичних моделей до керування процесом травління, не пристосовані до швидкої адаптації відповідно змін динамічних характеристик процесу. Застосування інтелектуальних регуляторів у значній мірі дає можливість позбутися недоліків, що є властивими для традиційних методів керування технологічними процесами травління, та підвищити якість смугової сталі за умов додаткової економії енергоспоживання та ресурсів, що є відсутнім в системах керування БТА.

Впровадження мікроконтролерної системи підігріву робочих середовищ ванн травління для підтримки активності розчину у керованих енергоблоках технологічних ліній травління смугової сталі дасть можливість перейти до використання насиченої пари з низьким потенціалом, що суттєво зменшує споживання теплової енергії для здійснення досліджуваного процесу. Таким чином, синтез цифрових систем автоматизованого керування процесом травління смугової сталі, що базуються на використанні інтелектуальних моделей та методів для об'єктів класу, який розглядається, є актуальною науково-практичною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота пов'язана з науковими дослідженнями кафедри електронних обчислювальних машин Харківського національного університету радіоелектроніки, де здобувач навчався в аспірантурі, за темою №273 «Нейро-фаззі системи для поточної кластеризації та класифікації послідовностей даних за умов їх викривленості відсутніми та аномальними спостереженнями», розділ «Методи поточного контролю послідовностей даних за умов їх викривленості на основі критичного підходу» (№ ДР 0113U000357). Особистий внесок автора полягає в аналізі взаємовпливу та класифікації типів факторів, які впливають на процес адаптивного управління, розробці критерія оцінювання якості управління, та інформаційно-логічних моделей функціонування системи управління процесом.

**Мета та задачі дослідження.** Метою роботи є автоматизація процесів інтелектуального керування технологічними лініями травління смугової сталі, що функціонують за умов поточної невизначеності, з використанням нейромережевого підходу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі наукові задачі:

- аналіз сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами безперервного травління смугової сталі;
- синтез нейромережевих моделей, призначених для роботи в контурах інтелектуальної системи керування процесом безперервного травління смугової сталі, що дозволять підвищити якість кінцевого продукту, а саме: моделі ідентифікації стану компонентів травильного розчину смугового прокату, моделі ідентифікації дефектів поверхні смугового прокату та моделі ідентифікації кута повороту клапану регулювання подачі теплоносія;
- розробка методів та алгоритмів інтелектуального керування процесами безпосереднього травління смугової сталі: регулювання температури травильного розчину з метою підтримання оптимального рівня його активності; регулювання тиску подачі травильного розчину в сопла для попереднього зрошення дефектів;
- удосконалення структури автоматизованої системи керування процесом травління на основі запропонованих нейромережевих моделей та методів;
- імітаційне моделювання та експериментальні дослідження режимів роботи інтелектуальної системи керування процесом безперервного травління;
- удосконалення методу оцінювання якості функціонування технологічної лінії травління смугової сталі.

*Об'єктом дослідження* є процеси автоматизованого керування технологічними лініями безперервного травління смугової сталі.

*Предметом дослідження* є моделі та методи інтелектуального керування процесом травління смугової сталі за умов поточної невизначеності.

*Методи дослідження.* Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та пропозицій, які сформульовано в дисертаційній роботі, забезпечено використанням комбінації наступних методів: системного аналізу та синтезу, теорії автоматичного управління, що дозволили синтезувати структуру системи автоматизованого інтелектуального керування процесом травління смугової сталі; методу кластеризації, що дозволив здійснювати поточну ідентифікацію станів травильного роз-

чину; методів теорії штучних нейронних мереж, що дозволили запропонувати моделі розроблені в середовищі NeuroPh, що призначені для оптимізації технологічних режимів та ідентифікації дефектів смугового прокату в контурах системи інтелектуального керування; методів імітаційного моделювання в середовищі ScieLab, що дозволили здійснити дослідження та аналіз синтезованої системи, чітке тлумачення результатів, і підтвердити ефективність отриманих результатів та розробити рекомендації щодо їх практичного використання.

**Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.** Теоретичні та експериментальні дослідження, проведені під час виконання дисертаційної роботи, дозволили вирішити задачу синтезу системи автоматизованого інтелектуального керування технологічними лініями травління смугової сталі, що функціонують за умов поточної невизначеності, з використанням нейромережевого підходу.

У рамках вирішення цієї задачі отримані наступні наукові результати:

- вперше отримані радіально-базисні мережі, що на відміну від існуючих моделей використовують гауссівські радіально-базисні функції з параметрами, налагоджуваними за методом зворотної помилки, та дозволили адекватно описати технологічний процес безперервного травління смугової сталі в нестационарних умовах функціонування за наявністю невизначеностей;

- вперше отримано радіально-базисну мережу – регулятор температури розчину, який використовує відповідні моделі, та, на відміну від існуючих регуляторів, дозволяє адаптивно коригувати температуру розчину з урахуванням впливу змін складу розчину для підтримання його активності та регламентованої швидкості процесу за умов оптимізації енергетичних та технологічних ресурсних витрат;

- вперше отримано радіально-базисну мережу, яка на відміну від існуючих реалізує нечітку кластеризацію стану компонентів травильного розчину, завдяки чому дозволила автоматизувати процес ідентифікації та оперативного контролю вмісту мультигідратів у розчині;

- удосконалено процес ідентифікації дефектів поверхні смугового прокату з використанням нечіткої кластеризації, що дозволило автоматизувати контроль якості кінцевого продукту та визначати в процесі параметри тиску подачі травильного розчину в сопла попереднього зрошування дефектів поверхні прокату;

- удосконалено метод оцінювання якості функціонування технологічної лінії травління, який на відміну від існуючих використовує кластеризацію факторів технологічного процесу з урахуванням їх взаємних впливів;

- набув подальшого розвитку підхід до автоматизації процесів травління смугової сталі шляхом модифікації системи керування агрегатом на основі розроблених інтелектуальних моделей та методів, що дозволило підвищити точність регулювання технологічного процесу та якість травління за умов економії ресурсів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані в роботі інтелектуальні моделі та методи призначені для розв'язання задач контролю і автоматизованого керування процесом безперервного травління смугової сталі, що дозволяє підвищити якість смугової сталі за умов економії енергетичних та технологічних ресурсів. Результати моделювання режимів роботи автоматизованої системи керування безперервним травильним агрегатом, зокрема, впливу сигналів керування, що

формуються розробленими інтелектуальними регуляторами, підтверджують економію витрат теплової енергії в межах застосованої технології травління. Результати імітаційного моделювання, експериментальні дослідження та випробування, проведені на травильній лінії ВАТ Маріупольського металургійного комбінату (ММК), підтверджують основні положення, що виносяться на захист. Результати дисертаційної роботи було використано для: модернізації системи керування на металургійних підприємствах України, виробництва багатоканального мікроконтролерного регулятора витрат теплоносія (ТОВ «АТ «Співдружність-Т», акт від 14.05.2016), а також впроваджено в освітній процес на кафедрі комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Харківського національного університету радіоелектроніки в курсі «Нейронні обчислювальні структури» (акт від 15.12.2020).

**Особистий внесок здобувача.** Всі положення, що виносяться на захист отримані здобувачем особисто. У роботах, написаних у співавторстві, дисертанту належить: [1] – розроблено структурну схему багатоканального регулювання в системах теплозабезпечення; [2] – запропоновано класифікатор кутових зон нелінійності дискових поворотних затворів, що регулюють витрати теплоносія; [3] – запропоновано критерій ефективності технічних систем та процедура кластеризації факторів ефективності з урахуванням їх взаємного впливу; [4] – розроблено нейронну мережу оптимізації параметрів процесу травління при регламентованій швидкості та нейросупервізор системи керування; [5] – запропоновано удосконалену процедуру нечіткого оцінювання товщини окисної плівки та логічні правила керування концентрацією сірчаної кислоти в розчині; [6] – удосконалено метод прискореного селективного травління несистемних дефектів; [7] – запропоновано підхід використання кращої керуючої альтернативи гарантованого досягнення цілей керування за умов нечітко заданої початкової інформації; [8] – запропоновано модель процесу травління, як розподіленої мережі теплопостачання з запізненням та інтервально невизначеним попитом; [9] – запропоновано метод нечіткого керування концентрацією та тиском розчину для видалення окисних дефектів за їх кольором; [10] – удосконалено набір логічних правил керування тиском подачі розчина в сопла попереднього зрошування; [11] – розроблено інтелектуальну процедуру ідентифікації  $n$ -гідратів сульфату заліза в розчині; [12] – запропоновано метод оцінювання фрагментів образів  $n$ -гідратів сульфату в травильному розчині заліза за параметром яскравості; [13] – розроблено радіально-базисну нейронну мережу ідентифікації та попереднього зрошування випадкових дефектів прокату; [14] – розроблено структуру комплексу технічних засобів системи керування теплопостачанням та підсистемою попереднього зрошення; [15] – розроблено модель оцінювання концентрації сольових компонентів розчину на основі методу нечіткої кластеризації; [16] – проведено аналіз факторів невизначеності процесу безперервного травління; [17] – здійснено формалізацію подання випадкових дефектів поверхні за допомогою нечітких функцій належності; [18] – удосконалено метод нечіткого оцінювання концентрації сольових сполук в розчинах за допомогою функцій належності їх нехімічних параметрів; [19] – розроблено нейромереву модель оцінювання якості керування безперервним агрегатом травління; [20] – розроблено функції належності нечіткого класифікатора ідентифікації концентрації сульфатів заліза в розчині; [21] – розроблено структуру моделі

нечіткого регулятора витрат потоку через дисковий поворотний затвор; [22] – розроблено нейро-нечітку модель визначення швидкості травління за параметрами составу та температури розчину.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідались, обговорені і схвалені на таких міжнародних конференціях: 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2015, (Dubrovnik, Croatia, 28-30.09.2015) – 10-й конференції зі сталого розвитку енергетики, води і навколишнього середовища (Дубровнік, 2015); I та III міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми інформатизації» (Черкаси, 2013; Полтава, 2015); III, V, та VI міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (Харків, 2013р; Полтава, 2015; Харків, 2016 ); науково-технічних конференціях «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ІТММ-2013, ІТММ-2014) (Дніпропетровськ, 2013, 2014).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 22 наукових роботи: 1 розділ у колективній монографії, що видано за кордоном (проіндексовано в Scopus), 9 статей в наукових фахових виданнях України з технічних наук, 3 статті в зарубіжних виданнях, що індексуються в Scopus, 8 доповідей у матеріалах міжнародних конференцій (з них 1 – проіндексовано в Scopus), зареєстровано 1 патент України.

**Структура дисертації.** Дисертація містить вступ, чотири розділи, висновки і додатки. Загальний обсяг дисертації складає 191 сторінку, у тому числі 5 сторінок займають титульний аркуш, зміст, перелік умовних позначень, анотація на 13 сторінках, 71 рисунок (з них 9 рисунків повністю займають площу 5 окремих сторінок), 9 таблиць, список використаних джерел з 126 найменувань на 12 сторінках, 4 додатка на 12 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та визначено основні напрямки та завдання досліджень, об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну і практичну цінність роботи, особистий внесок здобувача в отриманні результати, представлено дані щодо їх апробації та впровадження.

У **першому розділі** наведено опис типової лінії травління смугової сталі, та здійснено її аналіз як об'єкта автоматизованого керування. Визначено особливості травління та контурів керування цим нестаціонарним процесом з нелінійністю змін параметрів. Автоматизація керування безперервним травильним агрегатом (БТА) передбачає, насамперед, створення інтелектуальних процедур та моделей ідентифікації стану травильного розчину (ТР) та дефектів поверхні сталевих смуг для подальшої побудови систем керування процесом травління. До найбільш важливих функцій таких систем слід віднести: регулювання температури травильного розчину для підтримки його активності з метою отримання заданої якості очищення сталевих смуг за умов регламентованої швидкості травління та оптимальних витрат травильного розчину і теплової енергії; регулювання тиску травильного розчину в соплах

попереднього зрошування з використанням відповідних математичних моделей. Зазначено, що синтез автоматизованої системи керування лініями травління є доцільним лише в контексті розробки загальної автоматизованої системи керування технологічними процесами широкосмуговим станом холодної прокатки. Технологічний процес (ТП) безперервного травління смугової сталі може бути віднесено до класу об'єктів інтелектуального нейромережевого та нечіткого керування. Наведено загальні принципи такого керування та обґрунтовано доцільність його використання при автоматизації роботи БТА. На основі результатів проведеного аналізу стану проблеми, що досліджується, сформульовано мету і задачі дослідження.

У другому розділі розглянуто питання синтезу моделей інтелектуальної ідентифікації, що можуть бути використані в системі керування технологічним процесом травління, а саме: інтелектуальна модель ідентифікації параметрів температури ( $T$ ) та концентрації ( $C$ ) ТР; інтелектуальні моделі ідентифікації вмісту моногідратів у ТР; нечітка модель ідентифікації товщини дефектів поверхні прокату; нейромережева модель ідентифікації кута повороту клапану регулювання подачі теплоносія.

Схема керування процесом травління передбачає послідовну реалізацію двох етапів: ідентифікації параметрів керованого об'єкту та визначення поточних значень сигналів керування. Для здійснення процедур ідентифікації в роботі запропоновано комбіноване використання модифікацій штучних нейронних радіально-базисних мереж (РБМ), методу максимуму абсолютної помилки (МАЕР - Maximum Absolute Error Points) та нечіткої кластеризації (Fuzzy Clustering Method). Відповідні алгоритми ідентифікації мають задовільну швидкість збіжності, обчислювальну простоту та є придатними для роботи в складі системі керування динамічним об'єктом в реальному часі (зокрема, керуванням безперервних травильних агрегатів при виробництві смугової сталі).

У загальному вигляді процес травління можна описати таким чином:

$$y(k) = f(x(k)) + \xi(k), \quad (1)$$

де  $y(k)$ ,  $x(k)$  – вихідний та вхідний сигнали відповідно;  $\xi(k)$  - сигнал шумів вимірювань.

Апроксимація нелінійності  $f(\bullet)$  здійснюється за допомогою  $N$ -вимірних радіально-базисних функцій

$$\Phi_i(x) = \exp\left\{-\frac{\|x - \mu_i\|^2}{\sigma_i^2}\right\}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

де  $\mu_i, \sigma_i$  – центри і радіуси базисних функцій відповідно;  $\|\cdot\|$  – евклідова норма.

Це дозволяє отримати нейромережеву модель наступного вигляду:

$$y(k) = c_0 + \sum_{i=1}^N c_i \Phi_i(x), \quad (3)$$

де  $c_j$ ,  $j = \overline{0, N}$  – вагові коефіцієнти;  $\hat{y}(k)$  – вихід нейромережевої моделі.

Зазвичай визначення структури РБМ здійснюється її поступовим ускладненням за результатами поточного аналізу помилок ідентифікації  $e = y - \hat{y}$ . Навчання (параметрична ідентифікація) полягає у визначенні параметрів мережі  $\mu_i, \sigma_i, c_i$ , що мінімізують квадратичний функціонал помилки:

$$J(k) = \|e(k)\|^2 = \|y(k) - \hat{y}(k)\|^2. \quad (4)$$

Налаштування параметрів мережі здійснимо з використанням рекурентного методу найменших квадратів з експоненціальним зважуванням інформації. Після закінчення процесу навчання мережу використовують для ідентифікації. Головним завданням процесу травління є повне очищення поверхні сталевих смуг при підтримці максимальної або заданої регламентом швидкості змотування. Істотна нелінійність залежності вихідної змінної швидкості травління від параметрів стану травильного розчину ускладнює побудову аналітичної моделі.

При побудові радіально-базисної нейромережевої моделі ідентифікації стану розчину в якості основних були обрані такі вхідні параметри:  $C1$  – масова концентрація (%) сірчаної кислоти  $H_2SO_4$  в травильному розчині;  $C2n$  – масова концентрація (%) групи сульфатів заліза  $n \cdot H_2O \cdot FeSO_4$  в травильному розчині;  $T$  – температура розчину °C (всі параметри пов'язані нелінійно та монотонно в локальній екстремальній області). На рис.1 наведено екземпляри 3D-поверхонь  $t_p = f(C1, C2n, T)$  для деяких фіксованих значень окремих вхідних змінних. Моделювання ідентифікатора проведено в пакеті Neuroph.

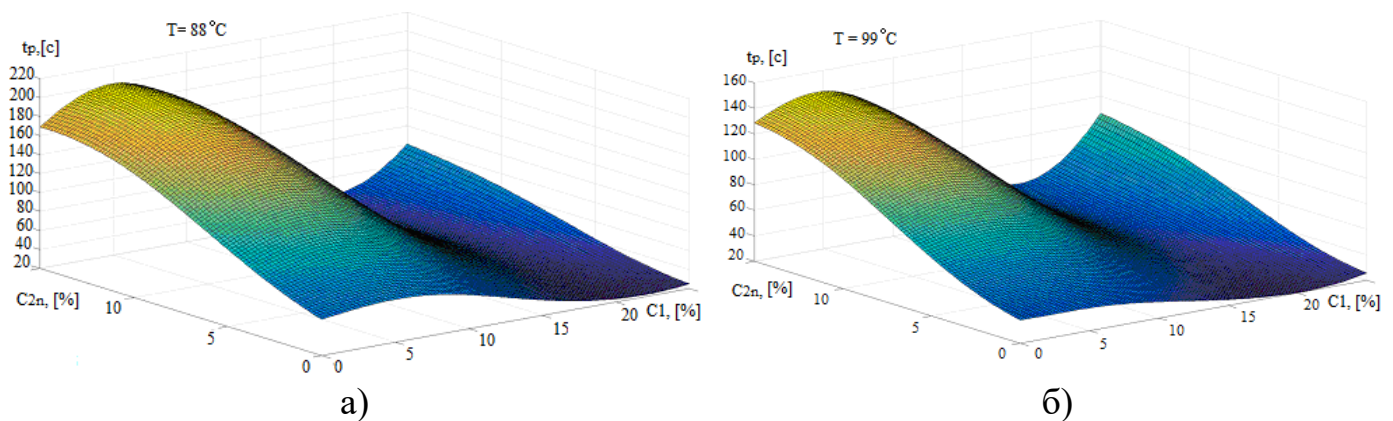


Рисунок 1 – Екземпляри 3D-поверхонь  $t_p = f(C1, C2n, T)$ : а)  $T = 88^\circ C$ ; б)  $T = 99^\circ C$ .

Присутність сульфатів заліза ( $n = 1, 4, 7$ ) в травильному розчині впливає на час повного очищення поверхні прокату  $t_p$  від окалини. Інтервали значень робочих параметрів розчину у ваннах БТА:  $C1 = 8-22\%$  (оптимальний 20-22%);  $T = 75-95^\circ C$ ; концентрація  $C2n$  групи сульфатів не має перевищувати 15%; компонента моногідрату сульфатів не має перевищувати 3,5%. Побудова гіперобласті  $t_p = f(C1, C2n, T)$  за допомогою нейромережевої моделі ідентифікації стану розчину дає можливість оперативно визначати оптимальні значення параметрів.

Також в другому розділі запропоновано інтелектуальну модель нейронечіткого оцінювання концентрації мультигідратів сульфатів заліза в ТР у реальному часі. При оперативній обробці зображення поверхні ТР використано модель визначення яскравості окремих точок за колірними *RGB*-складовими:

$$Y = R * 0.299 + G * 0.587 + B * 0.114, \quad (5)$$

де  $Y$  – яскравість в відтінках сірого кольору, *RGB* оцінки лежать в діапазоні  $0 \div 255$ .

Це дозволяє здійснювати підрахунок кількості пікселів кольорових складових в цифрових зображеннях аналізованої поверхні для оцінювання відсоткового вмісту семи різних солей мультигідрату в ТР з використанням нечіткого моделювання.

На множині синглетонів, що утворюють базу правил логічного висновку побудована однозначна нечітка нелінгвістична модель Мамдані такого оцінювання:

$$V_k \rightarrow C_k, k = 1, 2, \dots, 7, \quad (6)$$

де  $V_k$  – кількість пікселів на відтінках зображення, характерних для  $k$ -ї солі;  $C_k$  концентрація  $k$ -ї солі в ТР.

Слід відзначити, що найбільший вплив на ТП має зміна концентрації моногідрату  $FeSO_4 \cdot H_2O$ . В побудованій моделі для цього типу солі враховано помилки, пов'язані з наявністю шумів вимірювання. Для цього вихідний діапазон концентрації  $C$  моногідрату  $FeSO_4 \cdot H_2O$  поділяється на відрізки, що мають однакову ширину, обумовлену необхідною точністю вимірювань  $\delta_c$ . Формування нейронечіткої моделі здійснюється за результатами експериментальних серійних вимірювань в  $M$  опорних точках моделі  $V_n, C_n$  (центрах кластерів) з рівномірним кроком дискретизації і областями значень  $((n-1)\delta_c; n\delta_c), n = 1, 2, \dots, M$ , де  $M$  оцінюється як:

$$M = [C_n / \delta_c]. \quad (7)$$

Нечіткі множини  $C_n$ , що формуються на виході моделі в процесі накопичення даних, замінюються синглетонами (медіанами кластерів), що збігаються з модальними значеннями  $C_1 = \delta_c, C_2 = 2\delta_c, C_3 = 3\delta_c, \dots$  до максимально припустимого значення за регламентом ТП:

$$C_n = \sup(c(t)). \quad (8)$$

Базова модель  $M_0$ , яку отримано з використанням методу МАЕР (Maximum Absolute Error Points), є спрощеним лінійним узагальненням опису процесу оцінювання концентрації моногідрату  $FeSO_4 \cdot H_2O$ . Поверхню  $C$ , що відповідає реальній моделі, умовно можна представити наступним чином:

$$C = C_0 + E_{0M}, \quad (9)$$

де  $E_{0M}$  – поверхня, що відповідає похибці базової моделі  $M_0$ .

Послідовна компенсація максимуму абсолютної помилки здійснюється наступним чином. Визначаються точки серії вимірювань, для яких величина помилки є максимальною або мінімальною, після чого задаються правила виду:

$$R_i : \text{ЯКЩО } (v = V_i) \text{ ТО } (e = E_i), \quad (10)$$

які використовуються для моделювання поверхні помилки  $E_0$ .

На наступному кроці з урахуванням отриманої моделі помилки  $E_{0M}$  та базової моделі помилки  $E_0$  формується поверхня залишкової помилки  $E_{1M}$ . Процес навчання моделі ітераційно триває до досягнення задовільної точності за оцінкою абсолютного середнього або квадратичного відхилень залишкової помилки.

Поділ загальної моделі на базову, яка перекриває всю область визначення, і паралельні моделі залишкових помилок дозволяє описувати екстремуми в локальних областях, що істотно зменшує кількість правил виду  $R_i$ . При використанні МАЕР методу для оцінювання концентрації моногідрату в травильному розчині застосовано наступні удосконалення: роздільне послідовне усунення помилок мінімуму і максимуму; використання в якості основного параметра налаштування моделі великих значень  $\delta$  гауссових функцій належності, що дозволяє підвищити точність оцінювання концентрації моногідрату в травильному розчині; усунення екстремумів помилок починається з такого значення в області вхідного простору, що містить більшу кількість потенційних елементів вибірки вимірювань, тобто:

$$E_{0Mi} : \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2} = \max, \{ \forall i | i = 2, \dots, n-1 \} \vee |V_i - V_{i+1}| = \max, i = \{1, n\}. \quad (11)$$

При моделюванні помилки використовувалася гауссоподібна функція належності наступного вигляду:

$$\mu(v) = \exp \left[ - \left| \frac{v - m}{\delta} \right|^l \right]. \quad (12)$$

У моделі помилки  $E_0$ , представленій нейронечіткою структурою, налаштовуються параметри  $\delta, l, m$ , а форма функції коректується з урахуванням «піків» та «западин» поверхні  $M_0$ . В результаті моделювання помилки було визначено параметри  $\delta = 270.9, m = 207, l = 8$ , а остаточна функція помилки  $E_{0M}$  набула наступного вигляду:

$$E_{0Mi}(v) = E_{0i} \exp \left[ - \left| \frac{v - 207}{270.9} \right|^8 \right], \quad (13)$$

де  $E_{0i}$  – значення помилки базової моделі в опорній точці (центрі  $i$ -го кластера), що є найближчою в сенсі відстані  $\|v - V_i\|$  до поточного вхідного значення  $v$ .

Отримана модель оцінювання концентрації моногідрату  $FeSO_4 \cdot H_2O$  в травильному розчині має вигляд:

$$C(v) = 100 \cdot (1,18v + 0,09 + E_{0i} \exp \left[ - \left| \frac{v - 207}{270,9} \right|^8 \right]), \text{ де } i = \{j \mid \|v - C_i\| \rightarrow \min, i = 1, \dots, n\}. \quad (14)$$

Представлений метод МАЕР є більш простим в порівнянні з FCM - методом та дозволяє оцінювати концентрацію компонент технологічних розчинів з задаваною точністю.

Ідентифікацію товщини дефектів поверхні смуги з метою подальшого визначення тиску  $P(\delta_n)$  попереднього зрошення поверхні прокату та часу обробки (травління) –  $t_p$  запропоновано здійснювати за компонентою яскравості відтінку дефектів з використанням сформованого нечіткого класифікатора (табл.1).

Таблиця 1 – Колірний класифікатор дефектів прокату

$n$	$X_n =$ Колір дефекту	$\delta_n$ , мк	$Y$	$Y_n^m$
1	Матовий алюміній	0,1÷0,4	227÷231	229
2	Блідо-голубий	5÷10	218÷226	222
3	Світло-сірий	13÷15	200÷218	209
4	Сірий	14÷25	189÷207	198
5	Темно-сірий	24÷36	136÷148	142
6	Темно-сірий матовий	38÷32	147÷1	74
7	Майже чорний	34÷40	39 ÷ 3	21

З огляду на концентрично-еліптичну форму дефектів поверхні смуги (рис.2а),

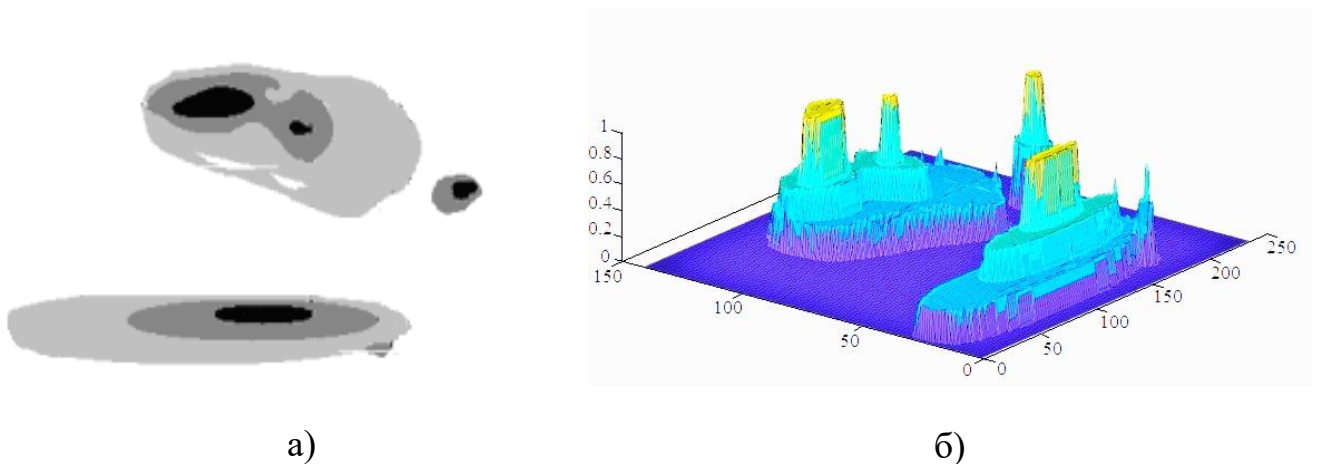


Рисунок 2 – Відображення поверхні дефекту: а) оригінал дефекту  $(x, y, Y)$ ;  
б) ідентифікація поверхні мережею  $\delta_n(x, y, Y)$

обумовлену фізичною природою їх утворення, є можливим застосування попереджувального прогнозування керуючих впливів тиску ТР  $P(\delta_n)$  з метою попереднього зрошення поверхні прокату для горизонтів зміни відтінку / товщини на площі ідентифікованих дефектів за допомогою РБМ (рис 2б).

Також в розділі представлено нейромодель ідентифікації кута повороту клапану  $\varphi(Kv = G_H^*)$  з регульованою пропускною характеристикою  $Kv$ , що забезпечує питоому кількість теплоносія  $G_H^*$  для оперативної підтримки активності ТР. Розглянуті у другому розділі модифікації методів інтелектуальної (нечіткої та нейромережевої) ідентифікації можуть бути використані для розробки математичного забезпечення елементів автоматизованої системи інтелектуального керування ТП безперервного травління смугової сталі. Загальна схема сучасної системи керування БТА з використанням незалежно керованих вискоефективних енергоблоків (ВКЕБ) має декілька локальних контурів мікроконтролерного регулювання. Найбільш важливими є контури підсистем керування температурою травильного розчину та підтримки заданого рівня його кислотності для кожної ванни, що визначається сумарним впливом різних факторів (в першу чергу концентрації сірчаної кислоти та присутніх в травильному розчині солей  $FeSO_4$ ).

Вплив температури та складу розчину на кінцевий результат роботи лінії травління є суттєвим: в разі недостатнього рівня температури та/або кислотності на поверхні прокату залишається окалина, а при надмірному рівні видаляється шар металу, що призводить до відхилення товщини сталевий смуги від заданої величини. Через нестаціонарність та наявність специфічних невизначеностей, притаманних досліджуваному ТП, застосування традиційних регуляторів не дозволяє досягти високої якості керування режимами травління та ефективності процесу. У зв'язку з цим є доцільним використати розглянуті вище підходи для синтезу деяких контурів системи інтелектуального керування процесом травління смугової сталі.

У **третьому розділі** наведено результати застосування нейромережевих моделей в контурах керування основними параметрами процесу: регулювання температури сірчаної кислоти в ТР для підтримки рівня його активності, та нейронечітке регулювання тиску подачі ТР в сопла попереднього зрошування для підвищення якості кінцевого продукту та зменшення витрат на виробництво.

БТА складається з 4-х ванн, що наповнюються розчинами  $H_2SO_4$  різних концентрацій в інтервалі 8-17.5% та постійно підтримуються в заданих для кожної ванни температурних інтервалах 75- 95°C. Час травління сталевий смуги  $t_p$  в ТР нелінійно пов'язаний з керованими параметрами ТП ( $T$  – температурою розчину,  $C$  – концентрацією травильного розчину сірчаної кислоти) згідно з відомим рівнянням Арреніуса, модифікованим до даної задачі:

$$\ln \frac{C(t_{n+1})_{H_2SO_4}}{C(t_n)_{H_2SO_4}} = A \cdot e^{-(E_a + \Delta E_T)/R \cdot T} \Delta t, \quad (15)$$

де  $C(t_{n+1})_{H_2SO_4}$  – концентрація сірчаної кислоти у ванні в момент часу  $t_{n+1}$  після проходження смугою першої ванни;  $C(t_n)_{H_2SO_4}$  – початкова концентрація кислоти;  $A$  –

множник в рівнянні Арреніуса;  $E_a = f(C, T)$  – енергія активації реакції;  $\Delta E_T$  – частка теплової енергії  $Q$ , що надається ТР для стабілізації часу травління  $t_p$ ;  $R$  – універсальна газова постійна;  $T$  – температура ТР (°К);  $\Delta t = t_{n+1} - t_n$  – час травління.

Спрощено ТП може бути представлений типовою MRP-II (Manufacturing Resource Planning) задачею поповнення запасів теплової енергії  $Q$ . Поточні витрати теплової енергії ( $Q_V \leq 3.765$  МВт) компенсуються за рахунок подачі стабілізованої пари в теплообмінник. Споживання теплової енергії в сталому режимі відбувається з умовно постійним значенням (наприклад, для 1-ї ванни  $Q_C \approx 2.9$  МВт), що належить нечіткому інтервалу, межі якого обумовлені температурою сталевий смуги на вході в БТА, випаровуванням нагрітого ТР та поточними втратами ТР:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_V(t) - Q_C(t) - Q_{RV}(t); \quad \frac{dQ}{dt} \geq Q_V(t) - Q_C(t) - Q_{RV}(t); \quad 0 \leq Q_{RV} \leq 0.02 \cdot Q_C. \quad (16)$$

Додаткові витрати  $Q_{RV}$  враховують необхідність температурної підтримки активності ТР. Для визначення структури та параметрів регулятора здійснено формалізацію опису системи «регулятор витрати теплоносія - виконавчий механізм - теплообмінник». Аналіз показує, що обмежені можливості керування з використанням аналогових регуляторів не дозволяють водночас витримувати необхідну продуктивність БТА та забезпечити оптимальне споживання реагентів і теплової енергії. Ця проблема може бути вирішена шляхом удосконалення регуляторів. ПІ-регулятор не дозволяє врахувати наявність таких параметричних невизначеностей ТП як шуми вимірювань та інерційність керування, внаслідок чого виникає перерегулювання. Це зумовило доцільність синтезу та застосування регулятора на основі радіально-базисної мережі (РБМ). Первинне налагоджування здійснено із використанням послідовного вводу додаткових аддитивних складових, які мінімізують поверхню помилки:

$$\varphi_i^*(Kv_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j \cdot \exp\left[\frac{-(Kv_i - Kv_j)^2}{2\delta^2}\right]}{\sum_{j=1}^n \exp\left[\frac{-(Kv_i - Kv_j)^2}{2\delta^2}\right]}, \quad (17)$$

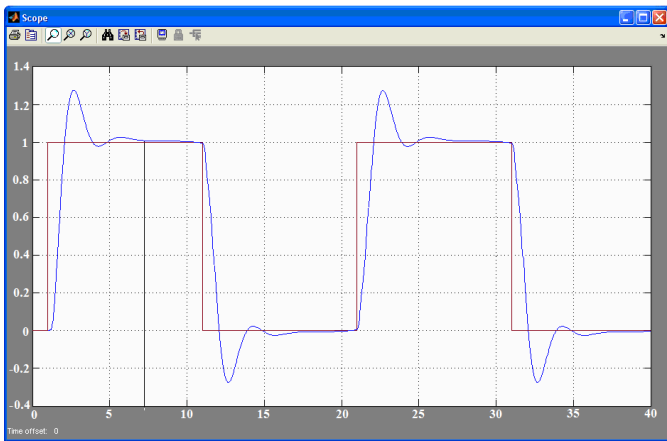
де  $Kv_i$  – центри базисних функцій, параметри яких настроюються.

Для врахування динаміки в нейронну мережу введені сигнали  $t_\varphi$  і  $\varphi$  з затримкою на такт, при цьому MISO - модель має наступну структуру:

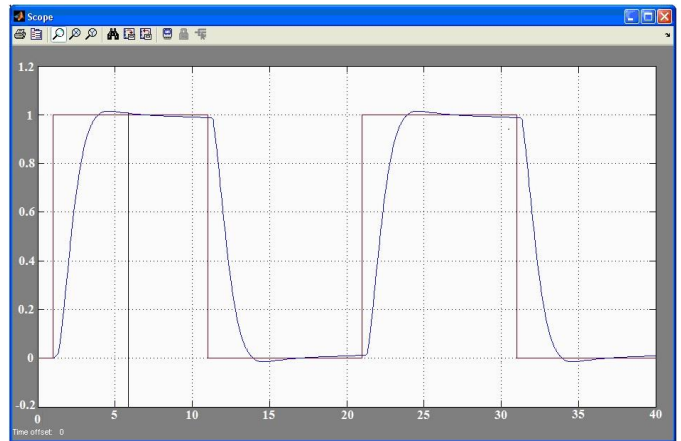
$$\tau_{on}(n) = F_{NN}(\varphi(n-1), \varphi(n), \Delta\varphi(n), t_\varphi(n-1), t_\varphi(n)). \quad (18)$$

Обчислюваний параметр  $\Delta t_\varphi(n) = t_\varphi(n-1) - t_\varphi(n)$  визначає знак полярності керуючої напруги  $U$ . РБМ моделюваної системи мала структуру 5-16-1. У якості активаційних функцій використовувалися: лінійні входні функції зваженої суми в 1-му

шарі, сигмоїд та вхідні функції різниці у 2-му шарі, лінійна функція зваженої суми в 3-му вихідному шарі. Навчання цифрового РБМ - регулятора здійснено за підходом «наслідуючого нейрокерування»: на основі даних моделювання роботи сімейства ПІ-регуляторів з оптимізованими параметрами. Згідно з результатами моделювання в системі керування з РБМ -регулятором час перехідного процесу (5.9с) менше ніж при ПІ-регулюванні (6.27с), також зменшилося перерегулювання (Рис.3). Наведений підхід дозволив досягнути регламентованої точності регулювання температури ТР  $T = \pm 1^\circ\text{C}$  і був реалізований в пристрої РТГ-32.



а)



б)

Рисунок 3 – Результати моделювання: а) ПІ - регулятор; б) РБМ - регулятор

Нейромережева модель попереднього зрошування несистематичних дефектів (НД) формує:  $Y$  – яскравість окремих точок зображення поверхні ТР;  $\Delta Y$  – оцінка дефектів за компонентою яскравості;  $D^m$  – геометричні  $(x, y)$  координати дефекту;  $P_j$  – необхідний тиск подачі ТР через  $j$ -у форсунку;  $\Delta t_f(P_j)$  – тривалість подачі керуючої напруги  $U$  з полярністю  $A(\Delta Y)$  на електропривід форсунки,  $V$  – швидкість руху смуги прокату. Сопла розташовуються поперек руху смуги, на якість процесу додатковий вплив мають геометричні параметри:  $\varphi$  – кут нахилу осі форсунки сопла до поверхні смуги,  $l$  – відстань від поверхні,  $r$  – радіус плями факелу сопла, а також фізичні:  $\rho$  – щільність ТР. В моделі для апроксимації рельєфу дефекту та генерації керуючих впливів  $\Delta t_f(P_j)$  і  $A(\Delta Y)$  і подальшої корекції ідентифікаційних еталонів застосовані базисні функції з фіксованими центрами та радіусами. Модель із структурою 6-12-1 має вигляд:

$$\tau_{on}(n) = f(D^m(y(n)), \Delta t_p(n), P_i(n-1), P_i(n), t_f(n-1), \Delta t_f(n)), \quad (19)$$

Для дефектів смуги прокату, що підлягають травлінню, РБМ за компонентою яскравості  $Y$  та геометричними координатами  $D^m(y(n)) = (y_2^m - y_1^m)$  ідентифікує необхідний тиск подачі  $P^*$  травильного розчину через  $n$ -у форсунку; нейромережевий

регулятор формує керуючу напругу  $U(P)$  певної тривалості  $\Delta t_i = (y_2^m - y_1^m)/V(t)$  і полярності  $A(\Delta Y)$  на електропривод шпінделя форсунки для досягнення  $P^*$ .

У четвертому розділі наведені рекомендації з модернізації автоматизованої системи керування (АСК) процесом травління смугової сталі в складі АСК ТП стану холодної прокатки та опис інформаційної взаємодії контурів керування. Досліджено стійкість роботи інтелектуальної цифрової системи регулювання температури ТР. Розглянуто критерії оптимальності функціонування модифікованої системи керування ТП: вартісний критерій, інтегральний індекс очищення поверхні прокату та індекс якості керування, що враховують показники за всіма видами дефектів на виході і вході БТА та відхилення у відповідних контурах керування ТП.

В модернізованій АСК БТА (рис.4) були усунені такі недоліки існуючої системи керування як: відсутність моделей та методів ідентифікації стану травильного розчину та дефектів поверхні сталевих смуг, підтримка рівня активності травильного розчину, а також відсутність контуру регулювання тиску травильного розчину в соплах попереднього зрошення з урахуванням поточного стану ТП.

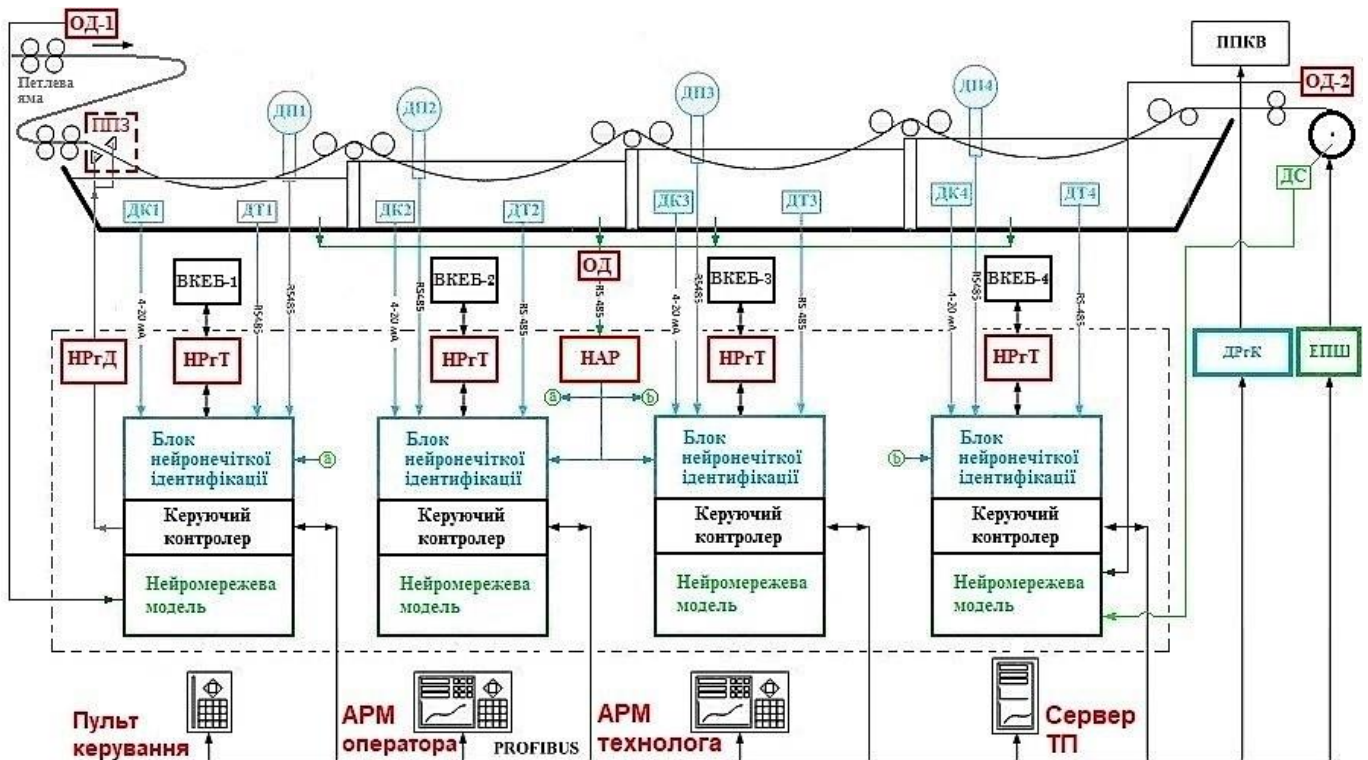


Рисунок 4 – Структурна схема модифікованої АСК БТА

На схемі АСК БТА використано наступні позначення: ОД-1, ОД-2 – оптичні датчики вхідних/вихідних дефектів сталевих смуг; НРГД – неймережевий регулятор тиску подачі травильного розчину в ППЗ; ППЗ – підсистема попереднього зрошення дефектів; ОД – оптичний датчик нечіткого аналізатора состава розчину (НАР); НРГТ – неймережеві регулятори температури травильних розчинів; ВКЕБ – високоефективний керований енергоблок; ДРК – дозуючий регулятор концентрації кислоти в травильних розчинах; ЕПШ – електропривод регулювання швидкості

ті швидкості ходу сталевієї смуги; ППКВ – підсистема подачі кислоти та води; ДТ – датчик температури травильного розчину; ДК – датчик концентрації кислоти; ДП – датчик щільності травильного розчину; ДС – датчик швидкості сталевієї смуги. В модернізованій системі реалізовано два незалежних контури керування: нейромережевого регулювання температури та регулювання тиску ТР в соплах попереднього зрошування. До складу першого контуру входять датчики температури, щільності, концентрації кислоти, регулятори температури та концентрації, керуючі впливи яких формуються згідно завдань, зформованих в результаті інтелектуальної ідентифікації стану технологічного процесу. Виконавчими пристроями першого контуру є високоефективні керовані енергоблоки (ВКЕБ) та підсистема подачі кислоти та води (ППКВ). Другий контур призначено для регулювання тиску подачі травильного розчину в сопла підсистеми попереднього зрошування дефектів сталевієї смуги (ППЗ). Цей контур використовує сигнали з виходів оптичних датчиків для формування керуючих впливів на електроприводи.

Блоки, що окреслені штрихпунктиром на рис.4, та блоки схеми інформаційної моделі системи інтелектуального керування БТА, що заретушовані на рис.5, відображують завдання, розглянуті в дисертаційній роботі.

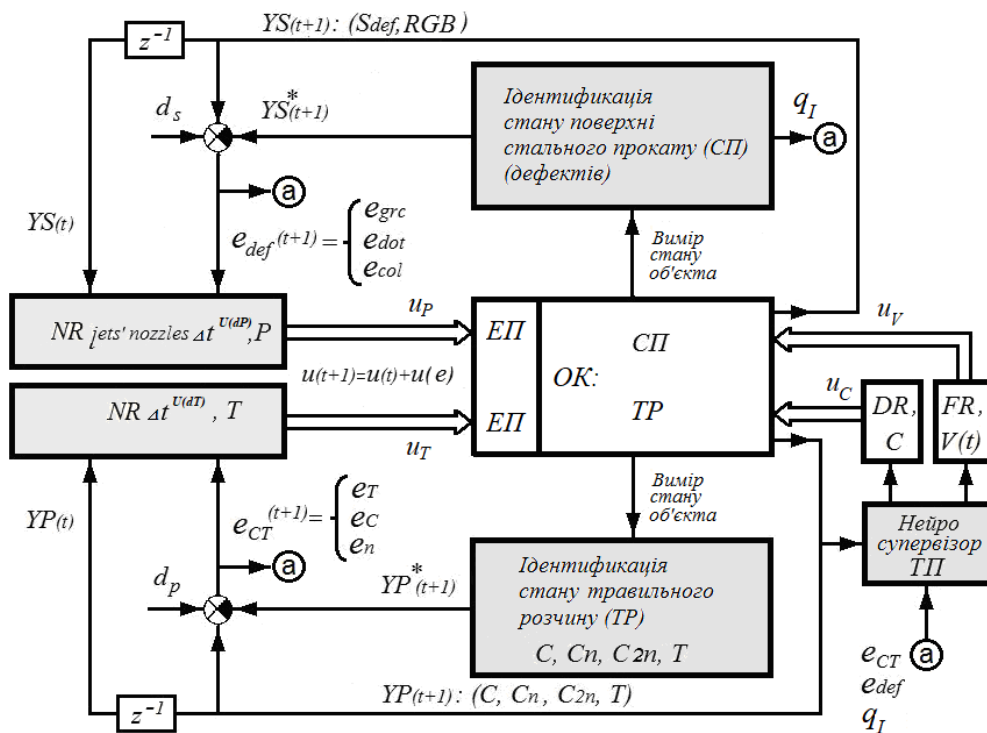


Рисунок 5 – Інформаційна модель системи інтелектуального керування БТА

В системі інтелектуального керування БТА задіяні наступні контури керування: концентрацією ТР (DR, C); температурою ТР (NR, T); стабілізації швидкості руху сталевієї смуги (FR, V), яку визначає швидкість травління окалини, що залежить в свою чергу від двох попередніх параметрів; тиском ТР в соплах попереднього зрошення дефектів (NR jets', P). Параметри поточного стану розчину –  $Y_P$ , поверхні

прокату –  $YS$ , відповідні шуми вимірювань –  $d_P$  та  $d_S$ . Інтегральний індекс очищення поверхні прокату –  $q_I$ , що запропоновано для оцінювання якості керування ТП, враховує сумарні показники за всіма видами дефектів  $e_{def}$  на виході і вході БТА. За цим індексом проводиться аналіз відхилень керування  $e_{CT}$ , та оцінюється якість роботи контурів регулювання процесу в часових вікнах.

У зв'язку із складністю об'єкту керування є доречним ввести у склад системи керування нейросупервізор, що координує роботу регуляторів основних контурів, спрощує процес керування та стабілізує ТП.

Для оцінювання якості функціонування ТП в роботі було запропоновано оцінювати кореляцію між якістю функціонування лінії та похибками керування: середніми значеннями та відхиленнями залишків. Залишки визначено, як різницю між заданим та реальним значеннями контрольованих параметрів керуючих контурів. Результати розрахунку середніх значень та відхилень залишків використано як вхідні сигнали РБМ для оцінювання індексу якості та класифікації станів ТП. Отримані залежності між характеристиками помилок і індексом якості керування –  $Q_n^{PC}(t)$ , дозволяють оцінити поточний стан БТА без зупинки, що скорочує вартість обслуговування ТП.

$$Q_n^{PC}(t) = F_{ANN}(e_{def}^{In}(t), \sigma_n(t), \bar{x}_n(t), q_I), \quad (20)$$

де  $F_{ANN}$  – нейромережева модель;  $e_{def}^{In}(t)$  – оцінка питомої площі дефектів певного класу на вході в БТА;  $q_I$  – інтегральний індекс очищення поверхні прокату;  $\sigma_n(t)$  и  $\bar{x}_n(t)$  – відповідно середньоквадратичне відхилення та середнє значення залишків помилок керування в робочому вікні  $n$ .

Дослідження замкнутої цифрової системи показали, що вона умовно стійка, тому що всі полюси її передавальної функції у разі використання ПІ-регулятора розташовані на  $z$ -площині всередині кола з одиничним радіусом ближче до межі:  $z_0 = 0.8467, z_{12} = 0.9995 \pm 0.0173i$ . На рис.6 наведено приклади графіків теплового енергоспоживання в 1-й ванні БТА:  $E_{TPI}$  (із застосуванням ПІ-регулятора) та  $E_{TANN}$  (із застосуванням інтелектуального регулятора).

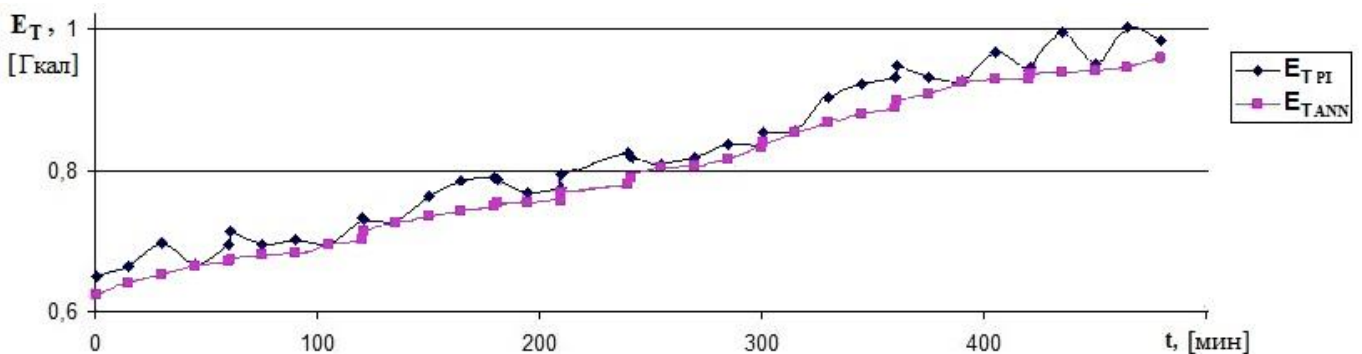


Рисунок 6 – Експериментальні дані теплоспоживання 1-ї ванни

Застосування модуля нагріву TP на базі теплообмінника ALFA-LAVAL та модифікованої АСК БТА з використанням інтелектуальних методів дозволило знизити енергоємність процесу на 7,5% (з 7.246 до 6.700 МВт). Також, при підтримці постійної швидкості травління важливою проблемою є мінімізація витрат кількості маси речовин в системі хімічних реагентів. Автоматизація процесу регулювання температури розчину в травильних ваннах з метою стабілізації його активності, та тиском попереднього зрошування дефектів дозволила зменшити технологічні витрати сірчаної кислоти на 21,5% (до 997 кг  $H_2SO_4$  при нормативі 1270 кг на годину) та технічної води.

Запропоновані на основі використання отриманих у дисертації наукових результатів рішення враховують особливості сучасних БТА та ефективних засобів автоматизації і мікропроцесорної техніки. Для імплементації нових моделей ідентифікації, нейромережових алгоритмів та реалізації додаткових функцій (організації передачі даних на рівні виконавчих пристроїв та на верхньому рівні АСК БТА) запропоновано використання мікроконтролерів PLC Simatic S7 серії S7-300 та мережових пристроїв і датчиків. Отримані рекомендації були прийняті до реалізації в складі автоматизованого комплексу технічних засобів БТА на ММК.

У **додатках** наведено деякі додаткові матеріали та акти про впровадження та практичне застосування результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено результати, які відповідно до поставленої мети є вирішенням науково-технічної задачі розробки автоматизованої системи інтелектуального керування технологічними лініями травління смугової сталі, що функціонують за умов суттєвої поточної невизначеності, з використанням нечітких та нейромережових моделей. На основі проведених досліджень отримано такі наукові і практичні результати.

1. Визначено, що технологічний процес безперервного травління смугової сталі нестаціонарний і може бути віднесений до класу об'єктів інтелектуального керування. Обґрунтовано доцільність використання нейромережових та нейронечітких регуляторів для автоматизації керування безперервних травильних агрегатів.

2. Вперше отримано радіально-базисні мережі, що на відміну від існуючих моделей використовують гауссівські радіально-базисні функції з параметрами, налагоджуваними за методом зворотної помилки, та дозволили адекватно описати технологічний процес безперервного травління смугової сталі в нестаціонарних умовах функціонування за наявності невизначеностей.

3. Вперше отримано радіально-базисну мережу – регулятор температури розчину, який використовує відповідні моделі, та, на відміну від існуючих регуляторів, дозволяє адаптивно коригувати температуру розчину з урахуванням впливу змін складу розчину для підтримання його активності та регламентованої швидкості процесу за умов оптимізації енергетичних та технологічних ресурсних витрат.

4. Вперше отримано радіально-базисну мережу, яка на відміну від існуючих реалізує нечітку кластеризацію стану компонентів травильного розчину, завдяки чому дозволила автоматизувати процес ідентифікації та оперативного контролю вмісту мультігідратів у розчині.

5. Удосконалено процес ідентифікації дефектів поверхні смугового прокату з використанням нечіткої кластеризації, що дозволило автоматизувати контроль якості кінцевого продукту та визначати в процесі параметри тиску подачі травильного розчину в сопла попереднього зрошування дефектів поверхні прокату.

6. Удосконалено метод оцінювання якості функціонування технологічної лінії травління, який який на відміну від існуючих використовує кластеризацію факторів технологічного процесу з урахуванням їх взаємних впливів. Запропоновано метод діагностики стану процесу з використанням нейромережевої моделі індексу якості: функції від залишків керуючих сигналів та інтегрального індексу очищення поверхні прокату. Отримані залежності дозволяють оцінювати стан БТА без його зупинки, що скорочує загальну вартість експлуатації обладнання лінії травління.

7. Набув подальшого розвитку підхід до автоматизації процесів травління смугової сталі шляхом модифікації системи керування агрегатом на основі розроблених інтелектуальних моделей та методів, що дозволило підвищити точність регулювання технологічного процесу та якість травління за умов економії ресурсів.

8. Обґрунтовано, що крім контуру регулювання температури травильного розчину є доцільним додати до складу автоматизованої системи керування безперервним травильним агрегатом контур, що регулює тиск подачі розчину в сопла попереднього зрошування, та нейрорегулятор-супервізор, що координує роботу регуляторів основних контурів керування.

9. Недоліки існуючої системи керування були усунені за рахунок використаних методів та моделей інтелектуального керування процесами травління смугової сталі з урахуванням збурень, що впливають на об'єкт керування. Автоматизована система інтелектуального керування безперервним травильним агрегатом дозволила скоротити технологічний запас сірчаної кислоти (витрати кислоти зменшилися до 997 кг/ч  $H_2SO_4$  при нормативних витратах 1270 кг/ч) та знизити енергоємність процесу з 7.246 до 6.700 МВт, що суттєво зменшило собівартість процесу травління. Синтезовану систему керування частково реалізовано у складі автоматизованого комплексу технічних засобів прокатного стану на ММК. Також запропоновані нейромережеві моделі використано для виробництва багатоканального мікроконтрольного регулятора витрат теплоносія, який впроваджено на ряді підприємств.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures. Green Microcontrollers in Control Systems for Magnetic Elements of Linear Electron Accelerators. [Anatoly Shamraev, Elena Shamraeva, Anatoly Dovbnaya, Andriy Kovalenko and Oleg Ilyunin]; V. Kharchenko et al. (eds.). *Green IT Engineering: Concepts, Models, Complex Systems Architectures*. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. P. 283–305. (Series: Studies in Systems, Decision and Control, v.74). DOI 10.1007/978-3-

319-44162-7\_15. <http://www.palgrave.com/gp/book/9783319441610>. (Входить до міжнародної наукометричної бази **Scopus**).

2. Kapustenko P., Dobromyslova O., Dobromyslov O., Perevertaylenko O., Arsenyeva O., Ilyunin O., and Shabanov E. Control of Plate Heat Exchanger Outlet Temperature Using Butterfly Valve and Parametric Model Predictive Control Technique. *Chemical Engineering Transactions*. Milano: Elioticinese Service Point Srl., 2009. Vol.18. P. 827–833. DOI:10.3303/CET0918135. URL: <http://www.aidic.it/cet/09/18/135.pdf>. Accessed 10.12.2009. (Індексовано у **Scopus**).

3. Boldyryev S., Garev A., Iunin O., Shamraev A., Selyakov O., Leshchenko O., Kapustenko P. Modified criterion for economic efficiency estimation of heat pumps. *Chemical Engineering Transactions*. 2013. V.35. P. 475–480. DOI:10.3303/CET1335079. URL: <http://www.aidic.it/cet/13/35/079.pdf>. Accessed 12.10.2013. (Індексовано у **Scopus**).

4. Bezsonov O., Ilyunin O., Kaldybaeva B., Selyakov O., Perevertaylenko O., Khusanov A., Rudenko O., Udovenko S., Shamraev A., and Zorenko V. Resource and Energy Saving Neural Network-Based Control Approach for Continuous Carbon Steel Pickling Process. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*. 2019. № 7(2). P. 275–292. DOI: <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d6.0249>. (Індексовано у **Scopus**).

5. Ілюнін О.О., Капустенко П.А., Перевертайленко А.Ю., Тимофеев В.А. Управление концентрацией травильного раствора непрерывного травильного агрегата с использованием нечетких LR-интервалов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2012. № 2. С. 52–56. URL: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/ite/2012/2012\\_2.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2012/2012_2.pdf).

6. Ілюнін О.О., Перевертайленко А.Ю., Шамраев А.А., Селяков А.М. Интеллектуальное управление селективным травлением полосового проката. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2012. № 4. С. 113–116. URL: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/ite/2012/2012\\_4.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2012/2012_4.pdf).

7. Авраменко В.П., Божинский И.А., Ілюнін О.О. Управление пространственно-распределенными системами в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации. *Системи обробки інформації*. 2012. № 2(100). С. 112–117.

8. Ілюнін О.О., Капустенко П.А., Перевертайленко А.Ю., и др. Математическая модель распределённой бивалентной системы теплоснабжения. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2013. № 2. С. 47–52. URL: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/ite/2013/2013\\_2.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2013/2013_2.pdf).

9. Ілюнін О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А., Лазарев А.И. Система нечеткого управления травлением стали с компараторной идентификацией дефектов проката. *Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. Дніпропетровськ, 2013. № 3(86). С.151–159. URL: <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/issue/view/60/35>

10. Ілюнін О.О. Идентификация несистемных дефектов в непрерывном технологическом процессе травления стального проката. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2013. №1(46). С.394–396.

11. Ілюнін О.О., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраєв А.А. Нечеткая процедура оцінювання предельно допустимой концентрації сульфата заліза в травильних розчинах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С.120–124. URL: [http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова\\_періодика/ite/2014/2014\\_4.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2014/2014_4.pdf).
12. Демирский А.В., Ілюнін О.О., Перевертайленко А.Ю. Нечеткая інтерполяція концентрації компонентів технологічних розчинів. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 4. С. 35–41. URL: [http://www.kpi.kharkov.ua/ite/uk/arhiv-nomeriv/2015/2015\\_4.pdf](http://www.kpi.kharkov.ua/ite/uk/arhiv-nomeriv/2015/2015_4.pdf).
13. Бессонов А.А., Ілюнін О.О., Руденко О.Г. Нейросетевое управління травлінням несистемних дефектів сталю прокату. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2016. № 4. С. 52–61.
14. Пат. 104710 УКРАЇНА, МПК (2014.01) С23G 3/00, В08В 1/02 (2006.01), С23G 7/08 (2006.01), В08В 3/08 (2006.01), С23F 1/08 (2006.01), В08В 13/00. Пристрій для безперервного травління прокату листової вуглецевої сталі. Арсеньева О.П., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Подпружников П.М., Селяков О.М., Тимофеев В.А.; заявник та власник Харківський національний університет радіоелектроніки. № и 2012 09428; заявл. 02.08.12; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. URL: <https://uapatents.com/5-104710-pristriij-dlya-bezperernogo-travlennya-prokatu-smugi-vuglecevo-stali.html>.
15. Pyunin O., Rudenko O., Selyakov O., Sotnikov O., Arsenyeva O., Perevertaylenko O., Shamraev O., Trubitsyn M. Increasing the Life Cycle of Process Liquid Solutions for Resource Efficiency and Harmful Waste Reduction. *Proceeding of the 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES2015)*. Dubrovnik, September 27–October 2, 2015. SDEWES2015.1096. 1-139. SS8-1. P. 1–12. Special session: Industrial applications and IT tools for sustainable future. URL: <http://www.dubrovnik2015.sdewes.org/programme.php>. (Індексовано у **Scopus**).
16. Ілюнін О.О., Удовенко С.Г., Шамраєв А.А. Нечеткое управління процесом неперервного травління листової углеродистого сталі в умовах неопределенности. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2013)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. С. 98–101.
17. Ілюнін О.О., Шамраєв А.А. Интеллектуальное управление непрерывным процессом травления металлического полосового проката с нечетким выводом. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: матеріали ІІІ науково-технічної конференції*. Харків: ДП «ХНДІ ТМ», 2013. С.34–35.
18. Ілюнін О.О., Селяков А.М., Шамраєв А.А. Процедура нечеткой оценки параметров сред и контактных материалов тепловых систем. *Проблеми інформатизації: матеріали І науково-технічної конференції*. Черкаси: ЧДТУ, 2013. С.32.
19. Ілюнін О.О., Удовенко С.Г., Шамраєв А.А. Метод оцінки якості роботи контурів регулювання процесів виробництва листової сталі. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2014)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. С. 79–80.

20. Ілюнін О.О., Руденко О.Г. Нечеткая идентификация состава рабочего раствора непрерывного травильного агрегата полосовой стали. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції*. Полтава: ПНТУ, 2015. С.22–23.

21. Ілюнін О.О., Руденко О.Г., Селяков А.М. Нечеткий регулятор расхода потока через дисковый поворотный затвор. *Проблеми інформатизації: тези доповідей III науково-технічної конференції*. Полтава: ПНТУ, 2015. С.20.

22. Ілюнін О.О., Бессонов А.А., Ілюнін А.В. Нечеткий регулятор скорости травления стали. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління: матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: ДП «ХНДІ ТМ», 2016. С.25.

## АНОТАЦІЯ

Ілюнін Олег Олегович. Синтез автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної задачі розробки автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі з використанням нечітких та нейромережових моделей.

Запропоновано радіально-базисні нейромережові моделі, призначені для роботи в контурах автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі, дозволили адекватно описати технологічний процес безперервного травління смугової сталі в нестационарних умовах функціонування за наявності невизначеностей. Запропоновано регулятор температури, що дозволяє адаптивно коригувати температуру розчину з урахуванням впливу змін складу травильного розчину для підтримання регламентованої швидкості процесу. Запропоновано метод ідентифікації стану компонентів травильного розчину, що використовує нечітку кластеризацію для автоматизованого контролю вмісту мультігідратів у тавильному розчині.

Удосконалено процес ідентифікації дефектів поверхні смугового прокату з використанням нечіткої кластеризації, що дозволило автоматизувати контроль якості кінцевого продукту та визначати в процесі параметри тиску подачі травильного розчину в сопла попереднього зрошення. Удосконалено метод оцінювання якості функціонування технологічної лінії травління, який використовує кластеризацію факторів технологічного процесу з урахуванням їх взаємних впливів.

На основі розроблених інтелектуальних моделей та методів запропоновано модифіковану структуру системи інтелектуального керування безперервним травильним агрегатом, що в результаті дозволяє підвищити якість травління поверхні смугової сталі за умов оптимізації технологічних ресурсних витрат.

Результати імітаційного моделювання, експериментальні дослідження та випробування підтверджують ефективність синтезованої системи керування.

**Ключові слова:** автоматизована система інтелектуального керування, безпервний травильний агрегат, травління смугової сталі, нейромережеве моделювання, діагностування станів розчину, ідентифікація дефектів поверхні смугового прокату.

## ABSTRACT

Ilyunin Oleg Olegovich. Synthesis of an automated system for intelligent control of the process of continuous pickling of strip steel. - Manuscript.

Dissertation for candidate of technical sciences (Ph.D.) degree in specialty 05.13.07 – automation of control processes. – Kharkov National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2021.

Dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of developing an automated system of intellectual control of the process of continuous pickling of the strip steel with the use of fuzzy and neural network models.

Radial-based neural networks models designed to work in the contours of the automated intelligent control system of the process of continuous pickling of strip steel allowed to adequately describe the technological process of strip steel in non-stationary operating conditions in the presence of process uncertainties are proposed. A regulator allowing to adaptively adjust the temperature of the pickling solution taking into account the influence of changes in the composition of the solution to maintain the reglamented process speed is proposed. A method for identifying the state of the components of the pickling solution using fuzzy clustering for automated control of the content of multihydrates in the pickling solution is proposed.

The identification process of strip rolled surface defects with the use of fuzzy clustering was improved, which allowed to automate the quality control of the final product and to determine the parameters of the pickling solution supply pressure in the pre-irrigation nozzles. The method of assessing the quality of functioning of the technological line of pickling, which uses clustering of factors of the technological process taking into account their mutual influences is improved. Based on the developed intelligent models and methods, a modified structure of the control system of the continuous pickling unit, which as a result allows to improve the quality of pickling of the strip steel surface under the conditions of technological resource costs optimization is proposed.

The results of simulation modeling, experimental research and testing confirm the effectiveness of the synthesized automated system of intelligent control of the process of continuous pickling of strip steel.

**Key words:** automated intelligent control system, continuous pickling unit, striped steel pickling, neural network simulation, diagnostics of solution states, identification of defects of the surface of striped rolled metal.

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 0.9. Тир. 100 прим. Зам. № 186-21.  
Підписано до друку 24.03.2021. Папір офсетний.

Надруковано з макету замовника у ФОП Бровін О.В.  
61022, м. Харків, вул. Трінклера, 2, корп.1, к.19. Т. (057) 758-01-08, (066) 822-71-30  
Свідоцтво про внесення суб'єкта до Державного реєстру  
видавців та виготовників видавничої продукції серія ДК 3587 від 23.09.09 р.

---

---

**СТИЛЬ** ®  
**ИЗДАТ**  
ТИПОГРАФІЯ  
[www.stil-izdat.com](http://www.stil-izdat.com)