

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора

Купіна Андрія Івановича

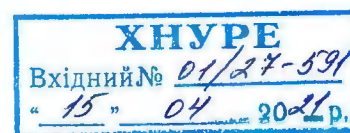
на дисертацію Ілюніна Олега Олеговича

на тему: «Синтез автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі», що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування

### 1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Металургійна промисловість в Україні є провідною галуззю економіки, яка здійснює найбільший внесок до щорічного внутрішнього валового продукту (ВВП) держави на рівні 15%, а також понад 30% від загальних валютних надходжень (дані Укрдержстату щодо соціально економічного розвитку за 2020 р.). Разом з тим для сталого розвитку цієї важливої галузі необхідно постійно поліпшувати її конкурентоспроможність за рахунок інвестицій, впровадження новітніх технологій, інтенсифікації виробництва (оптимізації собівартості та втрат), збільшення продуктивності праці та її ефективності за рахунок комплексної автоматизації, зокрема, на основі вимог стандартів Industry 4.0. При цьому попит на прокатну продукцію різного сортаменту на світовому та вітчизняному ринках зараз є достатньо високим.

До найбільш важливих технологічних процесів (ТП) виробництва прокату відносять процес травління смугової сталі, що здійснюється за допомогою безперервного травильного агрегату (БТА). Останній функціонує за умов невизначеності: частина змінних (зокрема, температура, концентрація травильного розчину, тощо) вимірюються зі значною похибкою, а деякі фактори взагалі не контролюються в реальному часі. Це безумовно негативно впливає на сталість та якість режимів травління, перш за все завдяки тому, що процес травління є нестационарним. Світовий досвід свідчить, що найкращим рішенням у таких умовах є комплексна автоматизація основних процесів керування. Тому вдосконалення систем автоматизованого керування базовими технологічними лініями травління, що визначають якість кінцевої продукції у виробництві сталевого прокату, є одним з перспективних та досить актуальних напрямків підвищення ефективності широкосмугових прокатних станів.



Збільшення попиту на прокат із особливими вимогами до його властивостей (товщини листа та стану поверхні, якості нанесення захисного покриття та додаткової термічної обробки тощо) останнім часом призвело до зростання випуску прокатного виробництва та більш високих вимог до якості обробки поверхні. Як наслідок зросли витрати теплової енергії, травильних розчинів (ТР) та технічної води на тону кінцевої продукції. Оптимізація цих витрат потребує постійного удосконалення технології, технічних засобів, та систем автоматизації керування виробництвом.

Ефективне керування процесом травління сталевго прокату є можливим лише на основі розробки моделей та методів, що повинні відповідати регламентованій точності, 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. Аспекти інтелектуального керування для відомих параметрів об'єкту достатньо досліджені та представлені в різноманітних публікаціях. Застосування інтелектуальних регуляторів для керування процесом травління дає можливість швидкої адаптації до змін динамічних характеристик, що є відсутнім в існуючих системах керування БТА.

Отже, враховуючи все вищезазначене автором дисертаційної роботи було поставлено та послідовно вирішено актуальне науково-прикладне завдання синтезу цифрових систем автоматизованого керування процесом травління смугової сталі, що базуються на використанні інтелектуальних моделей та методів.

## **2. Зв'язок дисертаційної 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 критерію оцінювання якості управління, та інформаційно-логічних моделей функціонування системи управління процесом.

Дисертаційну роботу виконано під керівництвом д.т.н., проф., завідувач кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Харківського національного університету радіоелектроніки Руденко О.Г.

### **3. Оцінка змісту дисертації, її завершеності та оформлення**

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, 4 додатків і за змістом, структурою та обсягом відповідає вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – автоматизація процесів керування.

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, відомості про апробацію результатів дисертації та кількість публікацій за темою дисертаційної роботи.

У **першому розділі** наведено аналіз об'єкта автоматизованого керування: опис особливостей травління сталевого прокату типовою лінією безперервного травління смугової сталі. та здійснено. Визначено контури керування цим нестаціонарним процесом з нелінійністю змін параметрів. Зазначено недостатній рівень автоматизації БТА, що не забезпечує потрібну якість та оперативність керування безперервним процесом травління.

У зв'язку з цим для покращення роботи БТА необхідно розробити вдосконалені моделі та методи керування ТП. Зокрема, за допомогою застосування методів інтелектуального керування та моделювання на базі нечіткої логіки та нейронних мереж, впровадити ці рішення з використанням сучасних технічних засобів у складі розробленої автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі. На основі результатів проведеного аналізу стану проблеми сформульовано мету і задачі дослідження.

У **другому розділі** розроблено радіально-базисну нейромережеву модель ідентифікації стану розчину, визначено параметри впливу на швидкість травління таких факторів як: температура розчину, масова концентрація сірчаної кислоти, група сульфатів заліза в травильному розчині. Запропоновано інтелектуальну нейронечітку нелінгвістичну модель Мамдані для оцінювання концентрації мультигідратів сульфатів заліза в ТР за яскравістю колірних RGB-складових окремих точок зображення. Розроблено інтелектуальну модель для визначення товщини дефектів поверхні прокату з метою подальшого розрахунку тиску попереднього зрошення поверхні прокату. Також в розділі представлено нейромодель ідентифікації кута повороту клапану, що забезпечує подачу питомої кількості теплоносія для оперативної підтримки активності ТР.

У **третьому розділі** визначено що процес керування споживанням теплової енергії в БТА є типовою задачею підтримки рівня теплотабезпечення ТП в нечіткому інтервалі, зумовленому кількістю протравленої окалини. Отримано сімейство одноканальних ПІ – регуляторів температури травильного розчину з параметрами, оптимізованими відповідно до характеристик елементів системи «ОК-регулятор». За принципом «наслідуючого нейрокерування», з використанням даних моделювання роботи ПІ-регуляторів побудовано нейромережевий регулятор температури травильного розчину. Змодельовано поведінку ПІ та нейрорегуляторів. Розроблено нейромережевий регулятор тиску травильного розчину в соплах попереднього зрошування дефектів, який оперативно враховує зміну товщини дефектів.

У **четвертому розділі** наведено модифіковану структуру та інформаційну модель автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління в частинах досліджень представленої роботи. За результатами дослідження роботи інтелектуальної цифрової системи регулювання температури травильного розчину доведено, що вона є умовно стійка. Представлено критерії оцінювання оптимальності функціонування модифікованої системи керування процесом травління смугового прокату з урахуванням взаємовпливу факторів ТП за відносним індексом очищення поверхні прокату від дефектів. Розроблено РБМ для оцінювання індексу якості керування процесами травління та класифікації станів ТП за результатами аналізу середніх значень та відхилень залишків,

що дозволяє оцінити поточний стан БТА без зупинки та скорочує вартість обслуговування ТП.

У висновку стисло відображено наукове завдання, що вирішено в дисертації та основні результати, отримані автором в роботі.

У додатках наведено деякі додаткові матеріали та акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

\* Автореферат повністю відображує основні положення дисертації.

### **3. Наукова новизна одержаних результатів**

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.

Основні результати, які визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

#### *1. 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 наявності невизначеностей;

– 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;

– 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.

#### *2. 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;

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

*3. Одержав подальший розвиток підхід до автоматизації процесів травління смугової сталі шляхом модифікації системи керування безперервним травильним агрегатом на основі запропонованих інтелектуальних моделей та методів, що дозволило підвищити точність регулювання технологічного процесу та якість травлення за умов економії ресурсів.*

#### **4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень і результатів**

Достовірність одержаних наукових результатів забезпечено коректним використанням сучасних методів системного аналізу, теорії автоматичного управління, теорії нейронних мереж нечіткої логіки, комп'ютерного, математичного та імітаційного моделювання. Зокрема, наприклад, модифікація структури системи автоматизованого керування БТА з використанням інтелектуальних методів дозволили істотно підвищити точність керування температурою травильного розчину, яка досягла  $\pm 0,5$  °С, а також знизити енергоємність процесу на 7,5%.

#### **5. Практичні результати роботи, їх рівень і ступінь впровадження**

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використані у процесі проектування, розробки, впровадження нових та модернізації існуючих автоматизованих систем керування процесами безперервного травління сталевих прокату та аналогічними (електрогальваніка).

Експериментальні дослідження та випробування, проведені на травильних лініях металургійних підприємств України, підтверджують основні положення, що виносяться на захист. Результати дисертаційної роботи було використано: для модернізації системи керування БТА-2 ВАТ Маріупольського металургійного комбінату; при розробці багатоканального мікроконтролерного регулятора витрат теплоносія для хімічних та енергетичних підприємств – ПрАТ «Теплоенергетичний центр Роганського промвузла», КП «Харківські теплові мережі» (акт від 14.05.2016р. ТОВ «АТ «Співдружність-Т»). Результати досліджень використовуються в освітньому

процесі на кафедрі комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Харківського національного університету радіоелектроніки в курсі «Нейронні обчислювальні структури», (акт від 15.12.2020р.) а також у курсовому та дипломному проектуванні.

## **6. Повнота викладення наукових та практичних результатів дисертації в опублікованих роботах, особистий внесок дисертанта в публікації**

– Основні наукові положення, результати, висновки та рекомендації дисертаційної роботи отримані автором самостійно. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 22 наукових роботи: 1 розділ у колективній монографії (Scopus), 9 статей в наукових фахових виданнях України з технічних наук, 3 статті в зарубіжних виданнях, що індексуються в Scopus, 8 тез та доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій (з них 1 – Scopus), зареєстровано 1 патент України.

## **7. Зауваження щодо змісту і оформлення дисертації та автореферату**

– 1. Тему дисертації сформульовано достатньо узагальнено. Слід було для підкреслення оригінальності («родзинки») роботи додати в кінці деякі уточнення з урахуванням головних ідей автора (наприклад, «...на основі нейро-нечітких чи нейро-супервізорних підходів» тощо).

2. В описі актуальності роботи (особливо в авторефераті), науковій новизні та загальних висновках не наводяться найбільш важливі чисельні показники, які досягнуті автором дослідження (наприклад, за точністю, ефективністю; стійкістю тощо).

3. Головними апроксимуючими нейроструктурами (починаючи з пп.2.3 і далі) у роботі застосовуються мережі на основі радіально-базисних функцій. При цьому не вдалося зв'язувати, чи аналізувалися інші архітектури? Чи проводилися відповідні порівняння?

4. Для параметризації (навчання) фактично всіх інтелектуальних структур у роботі автором застосовуються вибірки, отримані на основі еталонних математичних моделей детермінованого типу. Не зрозуміло, чи проводилися порівняння з реальними даними технологічного походження? Чи доводилась репрезентативність таких сукупностей?

5. В підрозділі 3.4 с.128 наведено: «РБМ налаштовано з використанням рекурентного однокрокового градієнтного алгоритму Качмажа» - слід було б навести його опис.

6. В підрозділі 4.4 слід було б сформулювати задачу оптимізації (4.8) більш строго, як багатокритеріальну, де ці критерії не існували б незалежно один від одного. Наприклад, з застосуванням множини Парето, і розглянути інтелектуальні методи (зокрема, еволюційні) її вирішення за поганої обумовленості (можливої наявності низки локальних екстремумів).

7. Питання стійкості запропонованих регуляторів досліджували автором фактично базуючись на припущення про стаціонарність їх робочих параметрів (с.147-153). При цьому ТП насправді є нестаціонарним (про що автор справедливо зазначає на початку роботи). Отже, слід було надати певні рекомендації щодо можливих обмежень працездатності підходу (наприклад, у визначених інтервалах стаціонарності).

8. В четвертому підрозділі роботи було б варто навести вимоги до обчислювальних ресурсів при експлуатації та оперативному переналаштуванні інтелектуальних нейро-нечітких моделей, що складають математичне забезпечення системи керування та надати розгорнуті технічні характеристики обраного програмованого контролера типу Simatic S7 (серії S7-300 Siemens) для доказового обґрунтування їх впровадження.

9. Щодо оформлення дисертації. У роботі також присутні деякі неточності застосування спеціальної термінології (наприклад, «управління» замість «керування», с.23, с.46; «ідентифікація дефектів» замість «визначення або розпізнавання», с.92; «обурення» замість «збурення», с.101), «русизмів» («таким чином», с. 22, с.38), небажане застосування прийменника «по» (с.3, с.21, с.90 тощо), у формулах автором не завжди наводяться відповідні одиниці вимірювання.

Але зазначені недоліки не є принциповими і суттєво не зменшують загального позитивного враження від поданої роботи.

## **8. Висновки**

Дисертація Ілюніна Олега Олеговича є завершеною науковою роботою, у якій отримані нові наукові та практичні результати, що вирішують важливу науково-технічну задачу розробки моделей і методів інтелектуального керування БТА, які склали основу розробки автоматизованої системи керування процесом безперервного травління смугової сталі з використанням підходів обчислювального інтелекту для підвищення ефективності



функціонування ТП, економії технологічних та енергетичних ресурсів. Актуальність і практична важливість результатів роботи підтверджується актами впровадження.

Всі теоретичні результати, висунуті на захист, отримані автором самостійно та повністю відповідають наспорту спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування, зокрема, за такими напрямками досліджень: -

- методи створення АСК процесами та комплексами різного призначення (пункт 1);
- моделювання об'єктів та систем керування (статичні та динамічні, стохастичні та імітаційні, логіко-динамічні тощо моделі) (пункт 3);
- ідентифікація та контроль параметрів об'єктів керування в різних галузях народного господарства (пункт 5).

Отже, з урахуванням усього вищезазначеного вважаю, що за актуальністю теми, науковою новизною, ступенем обґрунтованості наукових результатів, практичною цінністю, повнотою викладення результатів у працях здобувача і за оформленням дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до кандидатських дисертацій, зокрема, пунктам 9, 11 – 14 «Порядку присудження наукових ступенів», а її автор, Ілюїн Олег Олегович, заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Офіційний опонент

завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж

Криворізького національного університету,

доктор технічних наук, професор

А.І. Купін

