

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Глюнін Олег Олегович

УДК 681.54:004.896

ДИСЕРТАЦІЯ

**Синтез автоматизованої системи інтелектуального керування процесом
безперервного травління смугової сталі**

05.13.07 – автоматизація процесів керування
технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів
і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник
Руденко Олег Григорійович
доктор технічних наук,
професор

Харків – 2021

АНОТАЦІЯ

Льонін О.О. Синтез автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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 р.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу синтезу автоматизованої системи інтелектуального керування процесом безперервного травління смугової сталі.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування технологічними лініями безперервного травління смугової сталі. Предметом дослідження є математичні моделі та методи інтелектуалізації керування процесом травління смугової сталі за умов поточної невизначеності параметрів.

Дисертаційне дослідження базується на системному аналізі результатів сучасних теоретичних і прикладних розробок вітчизняних і зарубіжних учених. Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків та пропозицій, які сформульовано в дисертаційній роботі, забезпечено використанням комбінації наступних методів дослідження: системного аналізу та синтезу, теорії автоматичного керування, що дозволили синтезувати структуру системи автоматизованого інтелектуального керування процесом травління смугової сталі; методу кластеризації, що дозволив здійснювати поточну ідентифікацію станів травильного розчину; 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.

Теоретичні та експериментальні дослідження, проведені під час виконання дисертаційної роботи, дозволили вирішити задачу синтезу системи автоматизованого інтелектуального керування технологічними лініями травління смугової сталі, яка спрямована на ефективну організацію взаємодії людини-оператора з об'єктом керування. У рамках вирішення цієї задачі розв'язано комплекс взаємопов'язаних завдань по розробці нейромережевих моделей та методів, які склали основу математичного забезпечення синтезованої системи керування, та 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 наявності невизначеностей;

– *вперше отримано* радіально-базисну мережу – регулятор температури травильного 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 мультігідратів 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 енергетичних та технологічних ресурсів.

Запропоновані в роботі інтелектуальні моделі та методи дозволяють на їх основі вирішувати задачі контролю і автоматизованого керування процесом безперервного травління смугової сталі за умов оптимізації процесу.

В дисертаційній роботі наведено результати моделювання та експериментального дослідження режимів роботи системи автоматизованого інтелектуального керування безперервним травильним агрегатом, зокрема, впливу сигналів керування на величини питомих витрат енергії та ресурсів в межах застосованої технології травління. Експериментальні дослідження та випробування, проведені на травильній лінії ВАТ Маріупольського металургійного комбінату, підтверджують основні положення, що виносяться на захист.

Практичну значимість отриманих теоретичних результатів дисертаційної роботи підтверджено актом впровадження отриманих результатів в виробництво. Результати дисертаційної роботи було використано для модернізації системи керування БТА-2 ВАТ Маріупольського металургійного комбінату, та при розробці багатоканального мікроконтролерного регулятора температури робочих рідин (ТОВ «АТ Співдружність-Т», акт від 14.05.2016). Також окремі результати дисертаційної роботи впроваджено до освітнього процесу Харківського національного університету радіоелектроніки (акт від 15.12.2020).

Використання розроблених у дисертаційній роботі методів та моделей дає можливість підвищити ефективність використання виробничого обладнання безперервного травильного агрегату, скоротити прямі та опосередковані витрати на підтримку технологічного процесу, підвищити якість процесу травління. Достовірність отриманих практичних результатів підтверджена експериментальними дослідженнями методів та моделей.

Матеріали дисертації достатньо повно викладені у 22 наукових публікаціях (5 англійською мовою): 1 колективна монографія, 12 статей – з них: 3 статті в зарубіжних виданнях, що входять до міжнародної науко-метричної бази Scopus, 9

публікацій в наукових фахових виданнях України з технічних наук – з них 1 стаття опублікована одноосібно; 8 тез доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій, в т.ч. 1, що входить до міжнародної науко-метричної бази Scopus); в рамках дисертаційних досліджень зареєстровано 1 патент України.

Ключові слова: безперевний травильний агрегат, модель, метод, штучна нейронна радіально-базисна мережа, максимум абсолютної помилки, нечітка кластеризація, параметри стану травильного розчину.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ 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>. (Індексується у **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. (Індексується у **Scopus**).
3. Boldyryev S., Garev A., Ilunin 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. (Індексується 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>. (Индексується 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.

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.

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.

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., Шамраев А.А. Нечеткая процедура оценивания предельно допустимой концентрации сульфата железа в травильных растворах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С.120–124. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/

2014/2014_4.pdf.

12. Демирский А.В., Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю. Нечеткая интерполяция концентрации компонентов технологических растворов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 4. С. 35–41. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/ite/uk/archiv-nomeriv/2015/2015_4.pdf.

13. Бессонов А.А., Илюнин О.О., Руденко О.Г. Нейросетевое управление травлением несистемных дефектов стального проката. *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 травлення прокату листової вуглецевої сталі. Арсеньєва О.П., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Подпружников П.М., Селяков О.М., Тимофєєв В.А.; заявник та власник Харківський національний університет радіоелектроніки. № u 2012 09428; заявл. 02.08.12; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. URL: <https://uapatents.com/5-104710-pristriij-dlya-bezperernogo-travlennya-prokatu-smugi-yuglecevo-stali.html>.

15. Ilyunin 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>. (Індексується у **Scopus**).

16. Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Нечеткое управление процессом непрерывного травления листовой углеродистой стали в условиях неопределенности. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2013)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. С. 98–101.

17. Илюнин О.О., Шамраев А.А. Интеллектуальное управление непрерывным процессом травления металлического полосового проката с нечетким выводом. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування: матеріали ІІІ науково-технічної конференції*. Харків: ДП «ХНДІ ТМ»,

2013. С.34–35.

18. Илюнин О.О., Селяков А.М., Шамраев А.А. Процедура нечеткой оценки параметров сред и контактных материалов тепловых систем. *Проблеми інформатизації: матеріали першої науково-технічної конференції*. Черкаси: ЧДТУ, 2013. С.32.

19. Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Метод оценки качества работы контуров регулирования процессов производства листовой стали. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2014)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. С. 79–80.

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

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

ABSTRACT

Ilyunin, O. Synthesis of the automated system of the intellectual control of the process of continuous pickling of the strip steel. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

A thesis for the candidate degree in technical sciences in the specialty 05.13.07 – automation of processes. – Kharkov National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2021.

In the dissertation the solution of the actual scientific and practical task of the synthesis of the automated system of intellectual control of the process of continuous pickling of the strip steel is proposed. The object of the research in the work is the process

of automated control of technological lines of continuous pickling of strip steel, and the subject of research – is the mathematical models and methods of intellectual control of the pickling process of strip steel in the current uncertainty conditions.

The dissertation research is based on the systematic analysis of domestic and foreign scientists' modern theoretical and applied developments results. The validity and reliability of scientific results, conclusions and proposals formulated in the dissertation are provided by using a combination of the following research methods: system analysis and synthesis, the automatic control theory – allowed to synthesize the structure of automated intelligent control of strip steel pickling; the method of clustering – allowed the current identification of the states of the pickling solution; methods of the artificial neural networks theory – allowed to offer models developed in the NeuroPh environment, which are designed to optimize technological modes and identify defects of strip rolling in the contours of the intelligent control system; simulation methods in the ScieLab environment – allowed to carry out research and analysis of the synthesized system, a clear interpretation of the results, and confirm the effectiveness of the results and develop recommendations for ones' practical usage.

Theoretical and experimental research conducted during the dissertation allowed to solve the problem of synthesis of the system of automated intelligent control of technological lines of pickling of strip steel, which is aimed at effective organization of human-operator interaction with the control object. As part of solving this problem, a set of interrelated problems for the development of neural network models and methods, which formed the basis of the mathematical support of the synthesized control system, and the following scientific results were obtained:

for the first time:

- radial-based networks, which, unlike existing models, use Gaussian radial-based functions with parameters adjusted by the inverse error method, and allowed to adequately describe the technological process of continuous pickling of strip steel in non-stationary operating conditions in the presence of uncertainties;

- a radial-base network - a temperature controller of the pickling solution, which uses appropriate models, and, unlike existing regulators, allows adaptive adjustment of the solution temperature taking into account the influence of changes in solution composition to maintain its activity and regulated process speed. technological resource costs;

– a radial-base network, which, in contrast to the existing ones, implements fuzzy clustering of the pickling solution components state, thanks to which it allowed to automate the process of identification and operative control of multihydrates content in solution;

were improved:

– the process of strip rolled surface defects identification with the use of fuzzy clustering, which allowed to automate the quality control of the final product and to determine the parameters of the pickling solution supply pressure to the pre-irrigation nozzles of rolled surface defects;

– the method of the quality assessing of the technological pickling line functioning, which, in contrast to the existing ones, uses clustering of the technological process factors taking into account their mutual influences;

– the approach to automation of strip steel pickling processes by modification of control system of the continuous pickling unit on the basis of the developed intelligent models and methods that allowed to increase accuracy of regulation of technological process and quality of pickling in conditions of energy and technological resources economy *was received further development.*

The intellectual models and methods offered in the work allow to solve on their basis the problems of control and automated control of the process of continuous pickling of strip steel in the conditions of process optimization and energy and material resources saving.

In practical applications of the dissertation, the results of simulation and experimental study of the operating modes of the automated control system of a continuous pickling unit, in particular, the influence of control signals generated by the developed intellectual regulators on the magnitude of the specific energy consumption and resources within the limits of the used pickling technology are presented. Experimental researches and tests carried out on the pickling line of the Open Joint Stock Company of Mariupol Metallurgical Combine (OJSC “MMC”) confirm the basic provisions that are put forward for protection. The results of the dissertation were used for the modernization of the control system of the pickling line of the OJSC “MMC” and when developing a multichannel microcontroller controller of the heated flow temperature (LLC "AO Sodrugestvo -T", act dated 14.05.2015), and also some results introduced into the educational process of Kharkiv National University of Radio Electronics (act dated 15.12.2020).

The use of methods and models developed in the dissertation provides an opportunity to increase the efficiency of the use of production equipment of a continuous pickling unit, to reduce direct and indirect costs to support the technological process, to increase the quality of the digestive process. The reliability of the obtained results is confirmed by experimental researches of the method and models.

The materials of the dissertation are quite fully detailed in 22 scientific publications: 1 section of the collective monograph (is indexed in Scopus), 12 articles – 3 of them are articles in foreign publications that are part of the international scientific-metric database (are indexed in Scopus) and 9 publications in scientific journals publications of Ukraine on technical sciences – of which 1 article was published alone; 8 collections of materials and abstracts in proceedings of international scientific conferences, 1 (is included in Scopus). Within the dissertation researches 1 patent of Ukraine is registered.

Key words: continuous pickling unit, model, method, artificial neural radial-basis network, maximum absolute error, fuzzy clusterization, parameters of the state of the pickling solution.

LIST OF PUBLICATIONS

The list of publications, which reflect the main scientific results of the thesis:

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 Dovbnya, 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>. (Indexed in 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. (Indexed in **Scopus**).

3. Boldyryev S., Garev A., Ilunin 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. (Indexed in **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>. (Indexed in **Scopus**).

5. Илюнин 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.

6. Илюнин 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.

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

8. Илюнин 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.

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

11. Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраев А.А. Нечеткая процедура оценивания предельно допустимой концентрации сульфата железа в травильных растворах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С.120–124. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2014/2014_4.pdf.

12. Демирский А.В., Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю. Нечеткая интерполяция концентрации компонентов технологических растворов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 4. С. 35–41. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/ite/uk/arhiv-nomeriv/2015/2015_4.pdf.

13. Бессонов А.А., Илюнин О.О., Руденко О.Г. Нейросетевое управление травлением несистемных дефектов стального проката. *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 травлення прокату листової вуглецевої сталі. Арсеньєва О.П., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Подпружников П.М., Селяков О.М., Тимофєєв В.А.; заявник та власник Харківський національний університет радіоелектроніки. № u 2012 09428; заявл. 02.08.12; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. URL: <https://uapatents.com/5-104710-pristriij-dlya-bezperernogo-travlennya-prokatu-smugi-yuglecevo-stali.html>.

15. Ilyunin 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>. (Indexed in **Scopus**).

16. Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Нечеткое управление

процессом непрерывного травления листовой углеродистой стали в условиях неопределенности. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2013)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. С. 98–101.

17. Ілюнин О.О., Шамраев А.А. Интеллектуальное управление непрерывным процессом травления металлического полосового проката с нечетким выводом. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування: матеріали ІІІ науково-технічної конференції*. Харків: ДП «ХНДІ ТМ», 2013. С.34–35.

18. Ілюнин О.О., Селяков А.М., Шамраев А.А. Процедура нечеткой оценки параметров сред и контактных материалов тепловых систем. *Проблеми інформатизації: матеріали першої науково-технічної конференції*. Черкаси: ЧДТУ, 2013. С.32.

19. Ілюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Метод оценки качества работы контуров регулирования процессов производства листовой стали. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2014)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. С. 79–80.

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

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

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

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	17
ВСТУП.....	18
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТРАВЛІННЯ СТАЛЕВОЇ СМУГИ І ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
1.1 Загальна характеристика лінії травління смугової сталі як об'єкта автоматизованого керування.....	30
1.1.1 Агрегат безперервного травління вуглецевої листової сталі в розчині сірчаної кислоти.....	30
1.1.2 Процес травління дефектів поверхні сталевих смуг.....	36
1.2 Хімічні особливості процесу травління сталю прокату.....	40
1.3 Автоматизоване керування травильною лінією.....	45
1.4 Аналіз методів нечіткої та неймережевої ідентифікації нелінійних об'єктів цифрового керування.....	52
1.5 Особливості використання нечітких і неймережевих моделей в системах цифрового керування.....	60
1.6 Висновки до першого розділу та постановка завдань дисертаційного дослідження.....	65
2 МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАВЛІННЯ СМУГОВОЇ СТАЛІ	67
2.1 Модель інтелектуальної ідентифікації стану параметрів травильного розчину.....	67
2.2 Ідентифікація вмісту мультігідратів в травильному розчині.....	73
2.2.1 Особливості ідентифікації вмісту мультігідратів.....	73
2.2.2 Нечітка модель ідентифікації мультігідратів в травильному розчині.....	76
2.2.3 Нейронечітка модель ідентифікації моногідрату в травильному розчині	84
2.3 Інтелектуальна модель ідентифікації дефектів поверхні прокату.....	90

2.4 Нейромережева модель ідентифікації кута повороту клапану регулювання подачі теплоносія.....	93
2.5 Висновки до другого розділу	97
3 ЦИФРОВЕ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ БТА	98
3.1 Особливості керування споживанням теплової енергії в БТА.....	98
3.2 Безперервний ПІ – регулятор температури травильного розчину.....	102
3.3 Нейромережевий регулятор температури травильного розчину.....	111
3.4 Нейромережевий регулятор тиску травильного розчину в соплах попереднього зрошування дефектів.....	118
3.5 Висновки до третього розділу	128
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БТА	130
4.1 Модифікація структури автоматизованої системи керування БТА	130
4.2 Інформаційна модель системи інтелектуального керування БТА.....	138
4.3 Нейромережевий супервізор системи інтелектуального керування БТА...	142
4.4 Дослідження стійкості роботи інтелектуальної цифрової системи регулювання температури травильного розчину.....	147
4.5 Критерії оптимальності функціонування модифікованої системи керування процесом травління полосового прокату.....	153
4.6 Оцінювання якості керування процесами травління.....	157
4.7 Висновки до четвертого розділу	163
ВИСНОВКИ.....	166
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	168
ДОДАТОК А.....	180
ДОДАТОК Б.....	183
ДОДАТОК В.....	187
ДОДАТОК Д.....	188

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АСК – автоматизована система керування;
- АКТЗ – автоматизований комплекс технічних засобів;
- БП – багатошаровий персептрон;
- БТА – безперервний травильний агрегат;
- ВКЕБ – високоефективний керований енергоблок;
- ВНД – виявлення несправностей і діагностика;
- ГДК – гранично допустима концентрація;
- ДПЗ – дисковий поворотний затвор;
- КТЗ – комплекс технічних засобів;
- МН – модуль нагріву травильного розчину;
- МРНК – модифікований рекурентний метод найменших квадратів;
- ППКВ - підсистема подачі кислоти і води;
- ПТА – пластинчастий теплообмінний апарат;
- РБМ – радіально-базисна мережа;
- ТП – технологічний процес;
- ТР – травильний розчин;
- ОК – об'єкт керування;
- ШНМ – штучна нейронна мережа;
- ANFIS – Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System (адаптивна мережа нечіткого виведення);
- BP – Back-propagation (зворотне поширення помилки);
- GDR – Generalized Delta Rule (узагальнене дельта-правило);
- ERP – Enterprise Resource Planning;
- MRP – Material Requirement Planning;
- MISO – (multi-input-simple-output) – багатопараметричний об'єкт керування
- NARMA – нелінійна ARMA-модель;
- SISO – (simple-input-simple-output) однопараметричний об'єкт керування

ВСТУП

Актуальність теми. Останнім часом набули широкого поширення цифрові системи керування різноманітними детермінованими та стохастичними об'єктами, реалізовані за допомогою мікропроцесорних засобів. Успішна практична реалізація таких систем здійснюється в основному при керуванні лінійними об'єктами керування (ОК) за допомогою комп'ютерної реалізації лінійних цифрових регуляторів [1–5]. У той же час лінійна апроксимація динаміки цілого ряду нестационарних технічних ОК є недостатньо коректною – , наприклад, складних нелінійних хіміко-технологічних процесів в безперервних травильних агрегатах (БТА) смугової сталі.

Перспективною альтернативою класичним методам побудови систем керування нелінійними об'єктами є штучні нейронні мережі (ШНМ) [6,7]. Найбільш корисною властивістю ШНМ є їх здатність до навчання за допомогою навчальних процедур, заснованих на аналізі співвідношень "вхід-вихід". Це дозволяє отримати досить прості рішення для складних завдань керування. Також наявність в структурі ШНМ нейронів з нелійними функціями активації дозволяє використовувати їх для вирішення задач керування нелінійними об'єктами.

Побудова автоматизованої системи керування (АСК) для БТА передбачає необхідність вирішення ряду взаємопов'язаних завдань розробки і моделювання деяких контурів керування та регуляторів для окремих блоків і секцій БТА.

Зокрема, для стабілізації швидкості травління смугового прокату нелінійно регулюються концентрації і температури травильного розчину (ТР) в ваннах. Для цього доцільно розробити мікропроцесорні блоки ідентифікації і цифрового регулювання:

- «забруднень» поверхні металу окалиною і оксидними плівками;
- стану ТР;
- тиску ТР в соплах попереднього зрошення дефектів поверхні прокату;
- температури ТР в ваннах.

Створення та впровадження цифрових систем керування БТА вимагає переходу від емпіричних методів розробки алгоритмів керування в структурі АСК

БТА, налагодження та випробування регуляторів безпосередньо на об'єктах автоматизації до сучасних науково обґрунтованих методів синтезу контурів систем керування та регуляторів з використанням інструментальних програмних засобів автоматизованого проектування та моделювання.

Однією з важливих задач при травлінні смугового прокату є вимір гранично допустимих концентрацій солей сульфату заліза в ТР. Найбільш точними є методи вимірювань вручну – з використанням титровальних розчинів-реагентів з перерахунком за таблицями-номографами, та метод отримання сухих залишків. Точність вимірювань при цьому в значній мірі залежить від якості використовуваних реагентів, місця забору робочих розчинів в травильних ваннах, умов видалення води до сухого залишку і т.д. І навіть якщо якість вимірювань задовільна для здійснення ТП, то їх швидкодія далека від технічних вимог до загальної автоматизації процесу.

Для обліку всіх факторів ТП необхідна побудова математичних моделей, які, з одного боку, повинні найбільш повно відображати властивості досліджуваного об'єкта, а з іншого – бути зручними для реалізації алгоритмів керування. Відсутність повної інформації про умови функціонування об'єкта, а також про їх динамічні характеристики та характер діючих перешкод обумовлюють застосування інтелектуальних підходів керування об'єктами, що допускають можливість використання спрощених (зокрема псевдолінійних) моделей при синтезі регуляторів.

Розробка цифрових систем керування БТА повинна супроводжуватися як вдосконаленням алгоритмів керування, так і вдосконаленням технічної бази реалізації. На сучасному етапі рівня розвитку комплексу технічних засобів (КТЗ) керування БТА на передній план висуваються вимоги підвищення точності стабілізації технологічних параметрів і регулювання керуючих впливів в несиаціонарних умовах ТП, постійно діючих збурень, обумовлених зміною кількості окалини та умов експлуатації БТА при складному взаємному впливі змінних стану ТП.

Ефективним засобом розробки та оцінки якості та ефективності нових алгоритмів керування є використання універсальних програмних комплексів моделювання систем (ScieLab, Neuroph). На етапі проектування важливим є

детальний аналіз процесів в контурах АСК БТА та вплив на них різноманітних зовнішніх і внутрішніх збурень, змін умов експлуатації, параметрів об'єкта керування і налаштувань цифрових регуляторів.

Системи керування БТА, в своїй більшості будувалися в 1990-х рр. із застосуванням локальних аналогових ПД-регуляторів і в основі реалізації мали класичний принцип керування за відхиленням. Особливо цей підхід поширений в європейських країнах, де застосовувався при використанні в ТП соляної кислоти в якості ТР [8,9], що було обумовлено стабільністю системи хімічних реагентів і, отже, поведінки БТА при збуреннях. На додаток, існуючі математичні моделі процесів, які використовуються для розробки і корекції технологічних режимів роботи БТА, досить громіздкі, і не можуть врахувати вплив на якість системи керування багатьох чинників. При наявності значних внутрішніх і зовнішніх збурень в подібних системах можливий вихід регульованих змінних за межі обмежувальних допусків (зокрема, концентрація побічних продуктів процесу в робочих розчинах).

Ефективне керування травлінням смугової сталі є можливим за розробкою більш точних моделей та методів, що мають 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 [10], І.З. Батиршіна [11], А.П. Ротштейна [12], А.А. Ускова [13], О.І. Галушкіна [14], С.Омату [15], С.Хайкіна [16], R. Yager [17], L. Zadeh [18], R. Babuska [19], D. Filev [20], та інших відомих учених.

Близько 40% експорту металургійної продукції України займає листовий прокат, в тому числі і холоднокатаний лист. Видалення окалини з поверхні листа є важливим технологічним процесом (ТП), який визначає якість вихідної продукції. Технічна досконалість даного процесу визначає вихідну продуктивність лінії прокату. Процес травління листової сталі полягає в руйнуванні шару окалини на поверхні листа в процесі хімічних реакцій з оксидами заліза, що формують шар окалини. Детально механізм взаємодії травильного розчину з окалиною описаний в

[21, 22]. На металургійних підприємствах України, що виробляють листовий прокат з вуглецевої сталі, в якості ТР поширено використання розчинів сірчаної кислоти з концентрацією до 24%, що після відпрацювання направляються на вузол достатньо затратної енергетично операції регенерації розчину [23].

Одним з перспективних шляхів підвищення ефективності безперервних широкосмугових станів прокатки є вдосконалення АСК за ключовими стадіями, що визначають якість сталевого прокату [22]. До їх числа відноситься технологічна безперервна лінія травління (БТЛ) смугової сталі, що формує важливі фізико-механічні характеристики прокату. Ця лінія функціонує в специфічних умовах невизначеності, що істотно ускладнює керування режимом травління. Частина змінних (температура кінця прокатки і ТР) вимірюються з великою похибкою, а ті змінні і фактори, що збурюють ТП (точний хімічний склад травильного розчину, забивання шламом мікроуглублень на поверхні прокату), не піддаються точному вимірюванню і контролю. Нарешті, існують вимірювані змінні (товщина смуги, швидкість її руху), які істотно впливають на динамічні характеристики процесу.

У прокатних цехах споживається близько 10% палива і 12% електроенергії від загальних витрат по підприємству [24]. Паливо використовується для підігріву і термічної обробки металу, електроенергія – для роботи двигунів приводів клітей стану, рольгангов і допоміжного обладнання. Крім того, в цих цехах використовується кисень, теплова енергія, стиснене повітря та вода. Зростання потужностей прокатного виробництва в останні роки спричиняє збільшення витрат енергії та ресурсів на тонну готової продукції [25]. Об'єктивне зростання споживання енергії необхідно компенсувати постійним вдосконаленням обладнання, технології та організації керування виробництвом.

Значний внесок у дослідження, розробку і вдосконалення технологій, що визначають ефективність роботи БТА, внесли Ледков В.Г., Зайцев І.В., Герасімов Я.І., Іванов С.С., Лукашкін Н.Д., Хламкова С.С., Малишева Т.В., Руденко Н.П., Чудновський Є.М. та інші вітчизняні вчені. Дослідження, спрямовані на вдосконалення виробництва смугової сталі, відображені в роботах Целікова А.І., Полухіна П.І., Видріна В.Н., Чекмарьова А.П., Полухіна В.П., Железнова Ю.Д., Піменова А.Ф., Третьякова А.В., Коцаря С.Л., Кузнєцова Л.А., Гарбера Є.А.,

Коновалова Ю.В., Мазура В.Л., Ноговіцина А.В., Хензель А., Шпіттеля Т., G.Sorgrl, T.Porre, M.Schlang та інших вітчизняних і зарубіжних вчених. При цьому основні результати були отримані для систем зі скалярними виходами без урахування характеру невизначеностей, що мають місце в технічних системах. У той же час для систем керування такими нестационарними об'єктами керування, як ТП травління характерна наявність великої кількості вхідних впливів і неконтрольованих збурень.

Ефективне керування БТА, що функціонує в специфічних умовах невизначеності, можливо на основі створення більш точних [26] динамічних і статичних моделей. Такі моделі повинні бути нечутливими до великих перешкод і похибок вимірювання [27], легко адаптуватися до часто мінливих динамічних характеристик лінії травління і задовольняти прийнятним умовам адекватності. Зазначеним вимогам найбільше задовольняють інтелектуальні нечіткі і ШНМ-методи контролю, ідентифікації та керування динамічними об'єктами [28, 29].

Сучасна тенденція спільного використання методів нечіткої логіки і нейромережевих методів для створення комбінованих систем інтелектуального керування дозволяє досить формально враховувати зміни динамічних властивостей лінії травління та швидко адаптувати ТП до динамічних змін параметрів, що відсутнє в існуючих системах керування. Такий підхід дозволить значною мірою усунути недоліки, властиві традиційним системам керування, побудованим на основі детермінованих або статистичних моделей [30], та підвищити якість смугової сталі за умов додаткової економії енергоспоживання та ресурсів.

Впровадження мікроконтролерної системи підігріву робочих середовищ ванн травління для підтримки активності розчину за допомогою високоефективних керуваних енергоблоків (ВКЕБ) технологічних ліній травління смугової сталі дає можливість перейти до використання насиченої пари з низьким потенціалом, що суттєво зменшує енергетичні витрати ТП. Система попереднього зрошення дефектів поверхні прокату суттєво підвищує якість оброблюваної поверхні прокату. Таким чином, синтез цифрових систем автоматизованого інтелектуального керування процесами травління смугової сталі, що базуються на використанні інтелектуальних моделей та методів для об'єктів класу, який розглядається, є *актуальною* науково-практичною задачею.

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 завдання:

– 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 для попереднього зрошення дефектів;

– удосконалення структури автоматизованої системи керування процесом травління на основі запропонованих інтелектуальних моделей та методів.

– імітаційне моделювання та експериментальні дослідження режимів роботи інтелектуальної системи керування процесом безперервного травління;

– удосконалення методу оцінювання якості функціонування технологічної лінії травління сталю прокату;

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. Під час розв'язання поставлених задач у роботі використовувалися 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 розчину; методів теорії штучних нейронних мереж, що дозволили запропонувати розроблені в середовищі NeuroPh моделі, 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, чітко тлумачення результатів, і підтвердити ефективність отриманих результатів та розробити рекомендації щодо їх практичного використання.

Наукова новизна отриманих результатів. В рамках рішення задачі синтезу системи автоматизованого інтелектуального керування технологічними лініями травління смугової сталі, що функціонують за умов поточної невизначеності, отримані наступні наукові результати, що визначають наукову новизну дисертаційної роботи:

а) вперше:

– отримані РБМ моделі, що використовують гауссівські РБ-функції з параметрами налагоджуваними за методом зворотної помилки, та які на відміну від існуючих дозволили адекватно описати ОК в нестационарних умовах функціонування та за наявністю збурень;

– отримано РБМ-регулятор температури ТР, який, на відміну від існуючих, дозволив адаптивно регулювати температуру з урахуванням впливу зміни складу ТР для підтримання регламентованої швидкості ТП за умов економії енергетичних та технологічних ресурсів;

– отримано РБМ модель нечіткої кластеризації стану компонентів травильного розчину смугового прокату на основі моделі Мамдані, яка на відміну від існуючих дозволила автоматизувати процес ідентифікації та оперативний контроль технологічних параметрів ТР (вміст муьтїгїдратїв);

б) 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 дефектів поверхні прокату;

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

в) 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 дозволяє підвищити якість смугової сталі за умов економії енергетичних ресурсів.

Особистий внесок здобувача. Всі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. У роботах, згідно списку публікацій, здобувачу належать наступні результати: [1] – розроблено структурну схему багатоканального регулювання в системах теплозабезпечення; в [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; в [4] – розроблено нейронну мережу оптимізації параметрів процесу травління при регламентованій швидкості та нейросупервізор системи керування; в [5] – запропоновано удосконалену процедуру нечіткого оцінювання товщини окисної плівки та логічні правила керування концентрацією сірчаної кислоти в розчині; в [6] – вдосконалено метод прискореного селективного травління несистемних дефектів; в [7] – запропоновано підхід використання кращої керуючої альтернативи гарантованого досягнення цілей керування за умов нечітко заданої початкової інформації; в [8] – запропоновано модель процесу травління, як розподіленої мережі теплопостачання з запізненням та інтервально невизначеним попитом; в [9] – запропоновано метод нечіткого керування концентрацією та тиском розчину для видалення окисних дефектів за їх кольором; [10] – вдосконалено набір логічних правил керування тиском подачі розчину в сопла попереднього зрошування; в [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

зрошення 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] – вдосконалено метод нечіткого оцінювання концентрації сольових сполук в розчинах за допомогою функцій належності їх нехімічних параметрів; [19] – розроблено нейромережеву 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 складу та температури розчину.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень були повідомлені, 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).

Обсяг і структура дисертації. Дисертаційна робота 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.

У **першому розділі** наведено опис типової лінії травління смугової сталі, та здійснено її аналіз як об'єкта автоматизованого керування. Визначено особливості технологічного травління та контурів керування цим процесом. 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** розглянуті модифікації методів інтелектуальної (нечіткої та нейромережевої) ідентифікації, що використані для розробки математичних моделей елементів автоматизованої системи інтелектуального керування ТП безперервного травління смугової сталі, 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 реальному часі в складі системі керування динамічним об'єктом (зокрема, керуванням безперервних травильних агрегатів при виробництві смугової сталі).

У **третьому розділі** ТП спрощено представлений типовою MRP-II (Manufacturing Resource Planning) задачею поповнення запасів теплової енергії, травильного розчину. Наведено результати застосування нейромережевих моделей в контурах регулювання основних параметрів процесу: температури та концентрації сірчаної кислоти в ТР для підтримки рівня його активності. Також представлено

підхід до нейронечіткого регулювання тиску ТР в соплах попереднього зрошування для підвищення якості кінцевого продукту та зменшення витрат на виробництво.

У четвертому розділі наведені рекомендації з модернізації автоматизованої системи керування 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 та інтегральний індекс оцінювання якості керування ТП, що враховує сумарні показники за всіма видами дефектів на виході і вході БТА. За цим індексом проводиться аналіз середніх значень і відхилень помилок керування та оцінюється якість роботи контурів регулювання процесу в часових вікнах. Отримані залежності між характеристиками помилок і індексом якості дозволяють оцінити поточний стан лінії без її зупинки, що скорочує загальну вартість обслуговування ТП. Запропоновані на основі використання отриманих у дисертації наукових результатів рішення враховують особливості сучасних БТА та ефективних засобів автоматизації і мікропроцесорної техніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з виконанням наукових досліджень 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» (№ ДР0113U000357). Особистий внесок автора полягає в аналізі взаємовпливу та класифікації типів факторів, які впливають на процес адаптивного керування, розробці критерія оцінювання якості керування, та інформаційно-логічних моделей функціонування системи керування процесом.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані в роботі моделі та методи дозволяють вирішувати задачі контролю і автоматизованого керування процесом безперервного травління смугової сталі на основі запропонованих інтелектуальних моделей та методів, що дозволить підвищити якість смугової сталі

за умов економії теплової енергії та технологічних ресурсів. В дисертаційній роботі наведено результати моделювання та експериментального дослідження режимів роботи системи автоматизованого керування безперервним травильним агрегатом, зокрема, впливу сигналів керування, що формуються розробленими інтелектуальними регуляторами, на величину питомої витрати енергії та ресурсів в межах застосованої технології травління. Експериментальні дослідження та випробування, проведені на травильній лінії ВАТ Маріупольського металургійного комбінату, підтверджують основні положення, що виносяться на захист. Результати дисертаційної роботи було використано для модернізації системи керування на металургійних підприємствах України (ТОВ «АТ Співдружність-Т», акт від 14.05.2015, Додаток А) при розробці багатоканального мікроконтролерного регулятора температури, а також впроваджено у навчальний процес на кафедрі комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Харківського національного університету радіоелектроніки в курсі «Нейронні обчислювальні структури», у курсовому та дипломному проектуванні (акт від 15.12.2020, Додаток А).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 22 наукових роботи: розділ у 1 колективній монографії (індексовано у Scopus), 9 статей в наукових фахових виданнях України з технічних наук, 3 статті в зарубіжних виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази (індексовано у Scopus), 8 публікацій у збірниках матеріалів та тез доповідей на міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференціях (з них 1 – Scopus), зареєстровано 1 патент України.

Список використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [1-30].

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ТРАВЛІННЯ СТАЛЕВОЇ СМУГИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Чорна металургія є надзвичайно важливою галуззю промисловості України, забезпечуючи до 20% надходжень до бюджету. Зростання обсягу виробництва металів визначається розширенням асортименту виробів з металів і сплавів і підвищенням їх якісних показників, що значною мірою залежить від методів пластичної обробки. Серед цих методів прокатка займає особливе становище, оскільки дозволяє виробляти широкий асортимент (листову сталь, рейки, профілі машинобудування та ін.). До числа найважливіших стратегічних завдань, що стоять перед чорною металургією, можна віднести поліпшення якості металопродукції, розширення її сортаменту і збільшення обсягу виробництва чорних металів. Зазначені завдання повинні вирішуватися в процесі технічного реінжинірінга та модифікації систем автоматизованого керування металургійними підприємствами та їх ділянками.

1.1 Загальна характеристика лінії травління смугової сталі як об'єкта автоматизованого керування

1.1.1 Агрегат безперервного травління вуглецевої листової сталі в розчині сірчаної кислоти

У багатьох галузях промисловості з кожним роком збільшується потреби тонколистової сталі з високими механічними властивостями, рівномірною товщиною по ширині і довжині, високою якістю поверхні. На сучасних станах листи товщиною менше 1,5 мм прокочують в холодному стані. Холодна прокатка в поєднанні з термічною обробкою дозволяє виготовити листову сталь, що задовольняє зазначеним вимогам. Матеріалом для холодної прокатки листової сталі є гарячекатані рулони, одержувані переважно з виходу безперервних широкосмугових станів гарячої прокатки. Першою операцією технологічного процесу холодної прокатки цієї сталі є травління рулонів в кислотних розчинах для очищення поверхні від окалини.

Окалину з поверхні гарячекатаних рулонів видаляють для того, щоб вона не

вдавлювалася в метал на етапі холодної прокатки, щоб зменшити знос валків і забезпечити чистоту поверхні листової сталі, яка піддається різним покриттям (луження, цинкування та ін.). Видалення окалини з поверхні гарячекатаної смуги з вуглецевої сталі здійснюють в БТА.

Як показує практика травління, тільки частина окалини розчиняється в кислоті, інша частина її осідає на дно травильної ванни у вигляді шламу. Цьому явищу сприяє водень, що виділяється при взаємодії кислоти з чистим залізом, що знаходяться в окалині. При виділенні водню досить розпушений шари окалини механічно відділяються і падають на дно травильних ванн. Швидкість травління в розчині сірчаної кислоти з підвищенням її концентрації збільшується і досягає максимуму при концентрації $\approx 25\% \text{ H}_2\text{SO}_4$. Швидкість травління значно зростає з підвищенням температури ТР. При підвищенні температури ТР сірчаної кислоти на 15°C час травління t_p зменшується приблизно в два – три рази для різних значень концентрації, згідно залежностей, наведених в [21, 26, 27]. Розчин сірчаної кислоти в ТП нагрівають до $80\div 90^\circ\text{C}$.

Також швидкість (тривалість) травління залежить від насиченості травильного розчину залізним купоросом, розчинність якого збільшується з підвищенням температури ТР і зменшується зі зниженням концентрації кислоти в ньому. Тому при накопиченні в ТР залізного купоросу, близькому до концентрації насичення, і зниженні концентрації кислоти в розчині до певних величин при різних температурах ТР, розчин зливають з ванни і замінюють новим. Для зменшення витрат кислоти і запобігання зайвого розчинення кислотою металу застосовують інгібітори з органічних матеріалів (хімічні регулятори травління), які незначно впливають на розчинність окалини і уповільнюють процес розчинення металу. У сучасних цехах холодної прокатки травління здійснюють в розчині сірчаної кислоти в БТА травильного відділення цеху. Безперервний спосіб травління листової сталі повинен забезпечувати максимальну механізацію та автоматизацію, високу продуктивність, мінімальні витрати кислоти та теплової енергії.

На рис. 1.1 наведено загальний вид БТА травління вуглецевої листової сталі в розчині сірчаної кислоти.



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд травильної лінії і секції підігріву розчину

Щоб забезпечити безперервність процесу, до заднього кінця попередньої смуги приварюють або «пришивають» передній кінець смуги подальшого рулону, що виходить з травильних ванн; нескінченну смугу змотують в рулон, поки він не досягне заданої величини; потім смугу розрізають, і готовий рулон прибирають. БТА розділяється на три ділянки: подачі, розмотування рулонів і зварювання кінців смуг; травління, промивання і сушіння смуги; промаслювання, змотування смуги і прибирання рулонів. Для забезпечення незалежності роботи ділянки повинні мати запас смуги, що укладається в петльові ями № 1 і 2. Механізми ділянки розмотування рулонів розташовуються зазвичай в наступному порядку:

1. Розмотувач. Відігнутий кінець смуги подається в обертові ролики, які тягнуть її і розмотують рулон.
2. Окаліноломатель. При проходженні смуги через ролики цього механізму окалина ламається.
3. Правильна машина. Призначена для правки смуги з метою безперешкодного просування її через подальші механізми ділянки.
4. Ножиці з рухомим нижнім супортом. Призначені для обрізки переднього і заднього «хвостів» смуги.
5. Зварювальна машина. Зварює кінці сусідніх смуг з метою отримання великовагового рулону для наступних за травлінням операцій.
6. Прес-зшивна машина.

Робота ділянки підготовки характеризується періодичністю руху смуги: задній

кінець смуги, яка подається в петлеву яму, затримується в ножицях для обрізки «хвоста», а потім на тихому ході доводиться до зварювальної або зшивної машини і встановлюється в початковий для виконання операції стан. В період затримки смуги ділянкою підготовки травильні ванни працюють на запасі, накопиченому в петлевій ямі №1. Петлева яма № 1 заповнюється гарячою водою, яка змиває ту частину окалини, зчеплення якої з смугою було зруйновано окаліноломателем. Підігрів смуги гарячою водою в петлевій ямі сприяє інтенсифікації процесу травління, останній при цьому починається негайно, як тільки підігріта смуга потрапляє в контакт з гарячим кислотним розчином. Ділянка травління складається з 4-5 травильних ванн, ванни холодної промивки, ванни гарячої промивки та сушильної установки. Перші приводні ролики витягають смугу з петлевої ями № 1 і подають її в травильні ванни. Другі приводні ролики витягають смугу з ділянки травління і подають її в петлеву яму № 2. Смуга в травильних ваннах провисає, спираючись на підтримуючі ролики, встановлені між ваннами. Величина провисання смуги повинна автоматично регулюватися, так як при великому провисанні буде псуватися поверхня смуги об дно ванни, а при малому значна частина смуги буде поза розчину, що призведе до зниження продуктивності лінії. Для автоматичного регулювання провисання смуги застосовують «танцюючий ролик», який стикається з смугою при її русі. При опусканні або підйомі смуги важелі ролика повертаються навколо осі, спільної з віссю реостата тонкого регулювання швидкості електродвигуна приводних роликів № 1 (або № 2). Зазвичай застосовується каскадний метод роботи травильних ванн, найбільш ефективний з точки зору продуктивності лінії: всі ванни з'єднуються між собою послідовно так, що розчин з ванни № 4 переливається в ванну № 3, потім в ванни № 2 і № 1. Кислота і вода подаються в ванну № 4 в тому місці, де протравлена смуга виходить з ванни. Відпрацьований розчин зливається в каналізаційний приямок з ванни № 1 в тому місці, де нетравлена смуга входить в травильну ванну. Після травління смуга промивається спочатку в холодній проточній воді, де змивається основна маса кислоти з її поверхні, а потім в гарячій воді, де видаляються залишки кислоти і смуга нагрівається до можливо високої температури. При великих швидкостях смуги кращий ефект дає промивання струменями води під тиском до 10 атм. На початку ділянки змотування смуги встановлені тягнучі ролики, які подають смугу до ножиць для вирізки місця зшивання і потім ставлять передній кінець смуги в моталку. За ножицями розташовано

короткий рольганг з легкими неприводними роликками для направлення переднього кінця смуги в промаслювальну машину, а потім в моталку. Для промаслювання смуги після травління застосовують мінеральне масло або розведений до консистенції рідкого масла емульсол. Промаслення смуги здійснюється парою приводних роликів, набраних з фетру або фланелі, або розбризкуванням за допомогою форсунок.

Сучасні травильні лінії в залежності від використання робочого часу, сортаменту смуг і конструктивних особливостей мають продуктивність від 400 до 1000 тисяч тон на рік. На деяких підприємствах, що мають невеликі виробничі потужності, встановлені травильні лінії з меншою продуктивністю, ніж у безперервних ліній. До таких ліній відносять напівбезперервні лінії і лінії для травління смуг в рулонах. Такі ванни прості за конструкцією хоча і повинні бути виготовлені з кислотоупорного матеріалу і добре протистояти стиранню.

Успішна робота травильних ліній залежить від багатьох факторів, у тому числі головними є наступні:

- якість окалини на смузі (при наявності легко видалюємої окалини смузі можна встановлювати велику швидкість руху через травильні ванни, що забезпечить підвищення продуктивності лінії);

- активність травильних розчинів, яка визначає час повного стравлювання окалини;

- якість підготовки окалини смуги перед зануренням в травильний розчин (попереднє механічне або/ та гідравлічне розпушення окалини сприяє проникненню в неї кислотного розчину, як тільки смуга надійде в розчин, що значно скорочує час травління);

- склад і взаємне розташування механізмів лінії.

В типовій схемі БТА (рис.1.2) штрихпунктиром виділено об'єкти автоматизації БТА, розглянуті в роботі. Червоним виділено наступні елементи КТЗ та контурів керування, що використовують інтелектуальні методи та моделі, представлені в роботі:

ОД – оптичні датчики вхідного/вихідного контролю дефектів; НРГТ – нейрорегулятор температури ТР; ППЗ – підситсема попереднього зрошування дефектів ТР, що подається в сопла з керованим тиском; НАР – нечіткий аналізатор стану розчину.

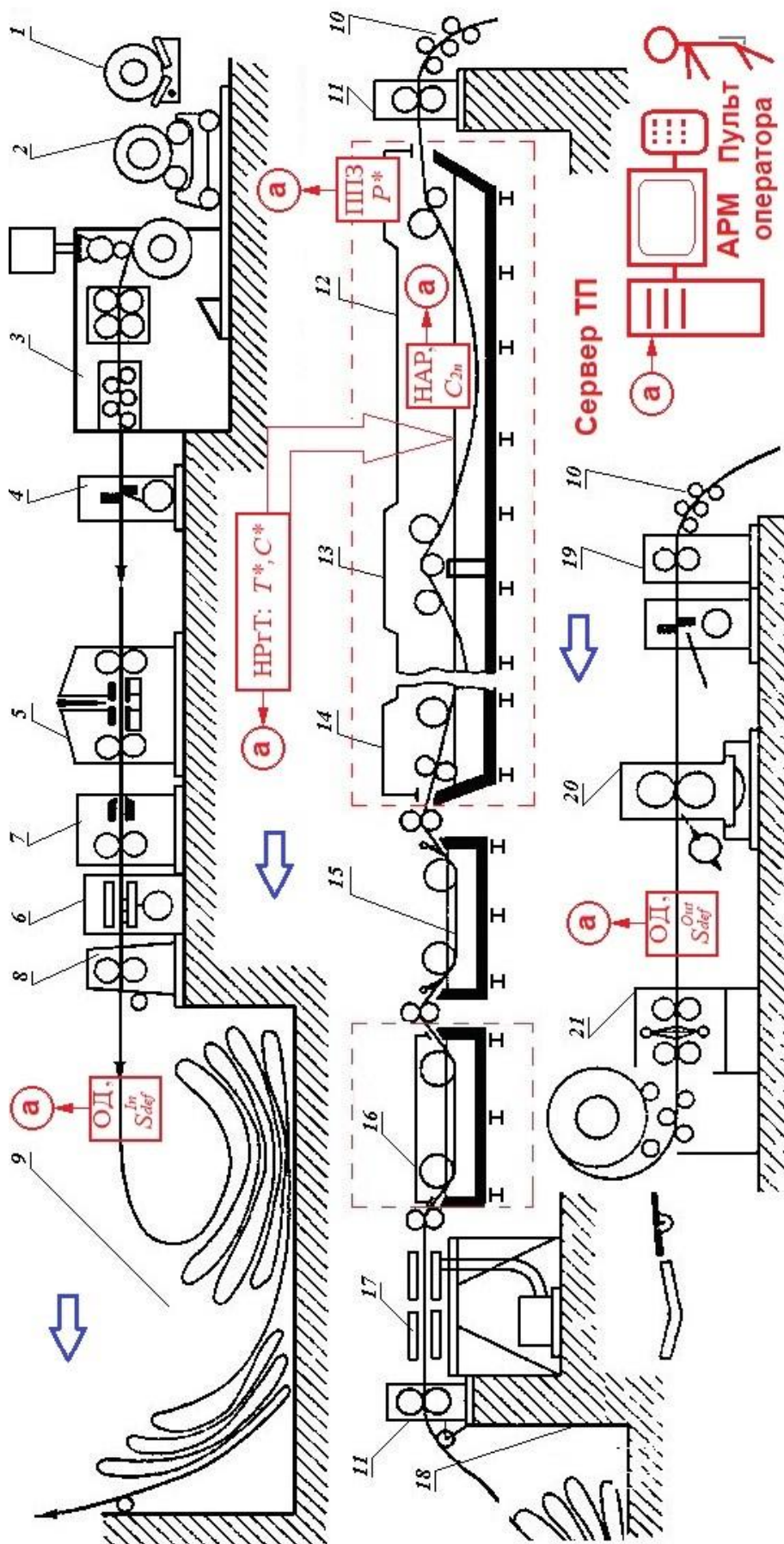


Рисунок 1.2 – Схема безперервного травильного агрегату:

1 - конвеєр подачі рулонів; 2 - візок підготовки та подачі рулонів в розмотувач; 3 - розмотувач, окалиноломатель і правильна машина; 4 - ножиці з нижнім різом; 5 - стикосварочна машина; 6 - грагознімач; 7 - зшивна машина; 8 - тягнучі ролики; 9 - петлева яма №1; 10 - правильні ролики непряводні; 11 - тягнучі і подаючі ролики; 12 - травильна ванна №1; 13 - травильна ванна №2; 14 вихідний торець останньої травильної ванни з віджимними роликками; 15 - ванна холодної промивки; 16 - ванна гарячої промивки; 17 - установка для сушіння смуги; 18 - петлева яма №2; 19 - тягнучі ролики; 20 - дискові ножиці з кромкокрощителем; 21 - промаслюючий пристрій і моталка роликкового типу

1.1.2 Процес травління дефектів поверхні сталевих смуг

Дефекти поверхні смуги виникають на різних стадіях обробки. При неякісному контролі процесу травління гарячекатаних смуг можливі недотрав і перетрав. У першому випадку на поверхні смуги залишаються темні смуги або плями нестравленої окалини, в другому випадку поверхня металу виходить грубо шорсткою, роз'їдена кислотним розчином. Закономірності утворення цих дефектів потребують глибокого вивчення режимів травління. Рівень наявності дефектів оцінюється за допомогою узагальнених характеристики якості. Утворені дефекти смуги за фізико-механічними властивостями залежать головним чином від дотримання правильних термічних режимів при охолодженні рулонів. Разом з тим слід враховувати істотний вплив режимів деформації, які повинні бути обрані з урахуванням кінцевих властивостей металу. Незначна товщина, крихкість і висока твердість складових частин окалини та міцне зчеплення шарів ускладнюють дослідження окалини. Кількість, склад і товщина окалини змінюються в залежності від локалізації по поверхні всієї довжини рулону, умов і часу його рулонування та охолодження і є фактором невизначеності ТП. Нижче наведено короткий опис результатів досліджень процесу окислення [31].

У діапазоні температур $250 \div 350$ °С, в залежності від тривалості нагрівання, утворюється плівка, що складається з окисів заліза. Товщини оксидних плівок стають сумірними з довжинами хвиль видимих кольорів спектру (рис.1.3). Цю стадію окислення визначають як стадію утворення кольорів мінливості.

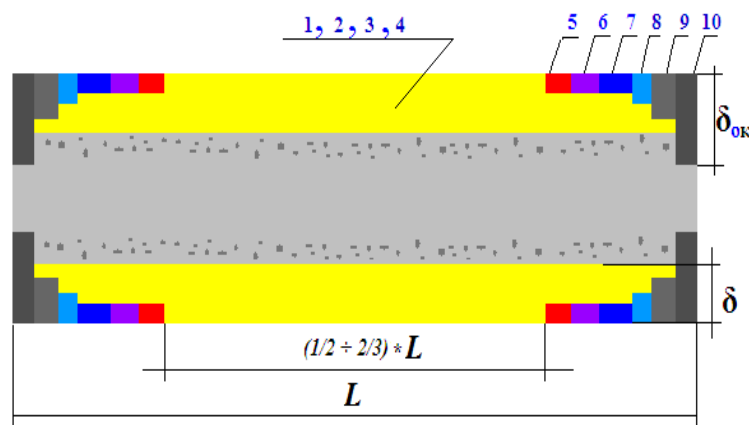


Рис.1.3 – Схема розміщення окалини на гарячекатаній смузі (перетин)

Нумерація позицій (1–10) на рис.1.3 відповідає значенням n в таблиці 1 товщин оксидних плівок δ_n , представлених у вигляді нечітких LR – інтервалів (D_n, c_n) .

Таблиця 1

Характеристика оксидних плівок

n	$X_m =$ Колір	$T_{\text{утворення}},$ °C	Товщина оксидної плівки $\delta_n = (D_n, c_n), \text{Å}$	
			D_n	c_n
1	Солом'яний	220	425	35
2	Золотистий	230	495	25
3	Коричневий	240	500	30
4	Червоно-коричневий	250	540	40
5	Пурпурний	260	595	35
6	Фіолетовий	260	660	35
17	Синій	300	690	40
8	Волошковий	немає даних	860	75
9	Темно-сірий		900	80
10	Майже чорний		1200	110

Кожному з них відповідає своя температура утворення при охолодженні та товщина плівки. При охолодженні від 200 °C до кімнатної температури залізо завжди вкрите окисною плівкою, яка після досягнення малої товщини значно гальмує подальше окислення і навіть повністю його припиняє. Колір плівки буде зберігатися при збільшенні її товщини в 2–3 рази в процесі охолодження у порівнянні із начальними значеннями.

На етапі холодної прокатки після травління на поверхні смуг нерідко утворюються поглиблення або виступи, відбитки у вигляді заглиблень різних форм і розмірів. Крім того, істотний перетрав смуги може служити причиною бракування всього рулону або ж його частини, що обумовлено незадовільною якістю керування БТА. Прикордонний шар «залізо-окалина», з якого йдуть іони заліза, стає пористим, і контакт між шарами перестає бути суцільним, що власне і робить можливим процес

травління. Назустріч залізу всередину окалини дифундують атоми кисню. Невелика кількість кисню проникає в залізо, утворюючи твердий розчин. Таким чином, окалина зростає як назовні, так і всередину від поверхні прикордонного шару. Товщину шару окалини і її якісний склад, які впливають на швидкість травління, необхідно враховувати як фактор невизначеності в силу складності прямого виміру безпосередньо в ТП та побічних ефектів [32].

На етапі холодної прокатки на поверхні смуг нерідко утворюються поглиблення або виступи, відбитки у вигляді заглиблень різних форм і розмірів. Крім того, істотний перетрав смуги може служити причиною бракування всього рулону або ж його частини, що обумовлено незадовільною якістю керування БТА.

З огляду на неоднорідність якості окалини на поверхні смуги, швидкість травління (швидкість руху смуги в ваннах) буде визначатися ділянками смуги з найбільш важко видаляємою окалиною. Додатковим фактором невизначеності є утворення областей з вкатаними точковими залишками окалини і металевої крихти, починаючи з етапу формування слябів.

Поверхня рулону прокату перед процесом травління багат шарова, її структура і фізико-хімічні процеси під час охолодження, яке походить від внутрішніх шарів смуги до поверхні рулону, представлені на рис.1.4.

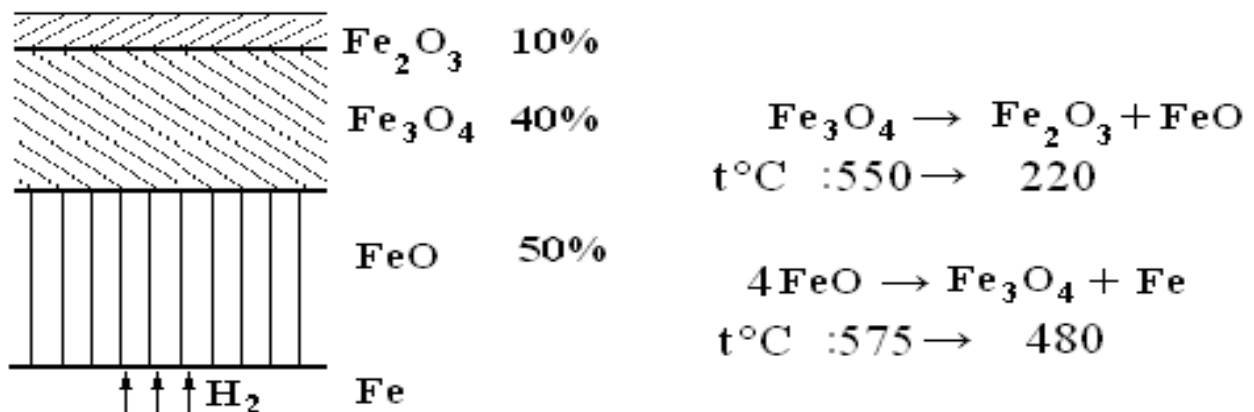


Рис.1.4 – Структура поверхні сталюого прокату під час охолодження

Для об'єктивної оцінки процесу травління необхідно враховувати вплив технологічних чинників на основні параметри ТП в їх сукупності і взаємодії, що можна

зробити тільки на основі математичної моделі процесу травління. Форма загального розподілу системних дефектів по поверхні рулону схематично представлена на рис. 1.5, де: 1 – область утворення оксидних плівок, 2 – область пухкого шару, 3 – область утворення товстого шару щільної окалини, стрілкою зазначено напрям до верхньої частини рулону в період його охолодження.

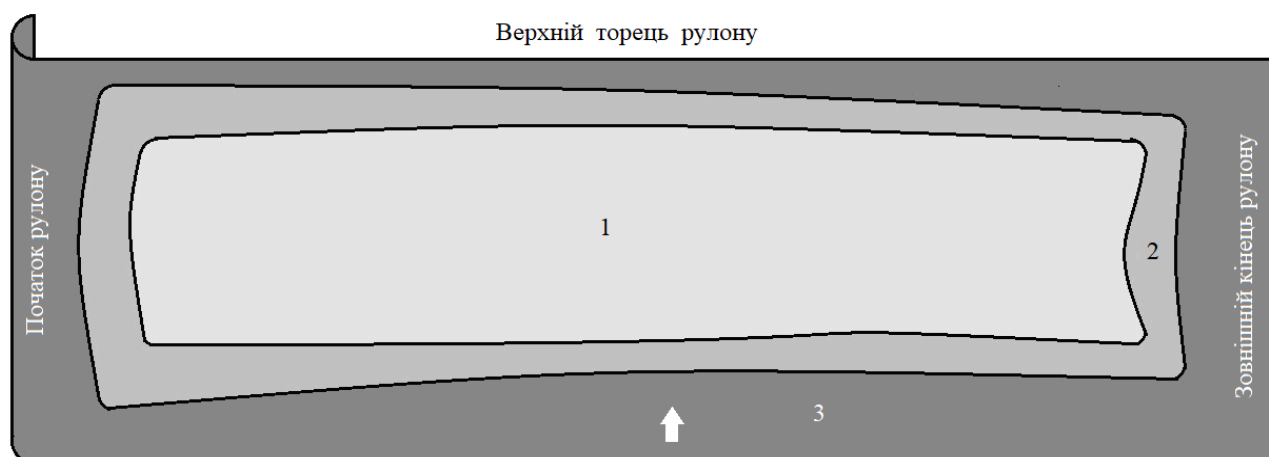


Рис.1.5 – Схема загального розподілу окалини по поверхні рулону

Інтервальні оцінки товщини дефектів, їх випадковий нерівномірний розподіл по поверхні смуги допускає віднесення технологічного процесу травління смугової сталі до класу об'єктів інтелектуального нейронечіткого керування [33, 34]. Таким чином, проведений аналіз дозволяє виділити наступні параметри системи керування процесом травління смугової сталі:

- вхідні контрольовані параметри: швидкість руху стальної смуги, температура та концентрація травильного розчину, геометричні координати та оцінки товщин дефектів поверхні стальної смуги;
- вихідні параметри: оцінка чистоти поверхні стальної смуги;
- параметри керування: температура та концентрація травильного розчину, тиск у соплах попереднього зрошування дефектів.

Крім того, на якість процесу впливають деякі неконтрольовані параметри (в тому числі площа та товщина дефектів), що створюють невизначеність його опису та низьку ефективність застосування традиційних схем автоматизованого керування.

1.2 Хімічні особливості процесу травління сталюого прокату

Наведені в літературі лінійні рівняння для кислотного травління сталей не завжди адекватно описують систему, до того ж автори не дають їх інтерпретації та не наводять параметри оптимуму ТП. Порівняно добре досліджено вплив на тривалість видалення окалини і швидкість корозії сталей таких факторів, як C – концентрація соляної кислоти та T – температура травильного розчину [23]. Процеси електрохімічної корозії заліза і сталей в травильних розчинах зазвичай представляють за допомогою методів математичного моделювання кінетики гетерогенних процесів [26]. В класичному вигляді процес може бути описаний поліноміальними рівняннями 2-го та 3-го ступенів [27], але така модель досить громіздка для оперативного застосування.

На даний час встановлено загальні закономірності кислотного травління сталей:

- активність розчину зростає тільки до певної межі, а далі починає падати;
- підвищення температури розчину до температури, близької до кипіння, завжди веде до збільшення його активності [24, 26];
- в процесі травління розчин насичується гідратами сульфатів заліза структури $FeSO_4 \cdot n(H_2O)$ $n=1-7$, які з охолодженням розчину або при перевищенні певних концентрацій $FeSO_4$ в розчині випадають у вигляді кристалів аж до зупинки процесу травління. Але з підвищенням температури розчину до температури, близької до кипіння, при концентрації групи мультігідратів сульфату заліза в діапазоні 5–15% час травління суттєво зменшується [27].

Згідно досліджень, оптимальна активність розчину досягається при таких інтервалах параметрів: $C = 20-22\%$, $T = 95-99\text{ }^\circ\text{C}$. За цих умов мінімальна тривалість часу до повного видалення чорної ($n = 10$, табл.1) окалини з поверхні металу становить 28 с. Для вивчення явищ в постійно мінливих травильних розчинах і отримання необхідних даних для розрахунків користуються діаграмами, в яких показані ізотерми розчинності $FeSO_4$ в суміші вода – кислота (рис. 1.6).

При цьому насичення солями гідратів $FeSO_4$ в розчині повинно становити близько 15%. Природа цього явища не досліджена, але факт укладається в схему підвищення активності розчинів: з підвищенням кислотності розчину за рахунок

збільшення концентрації неосновних компонентів розчину тривалість реакції травління зменшується.

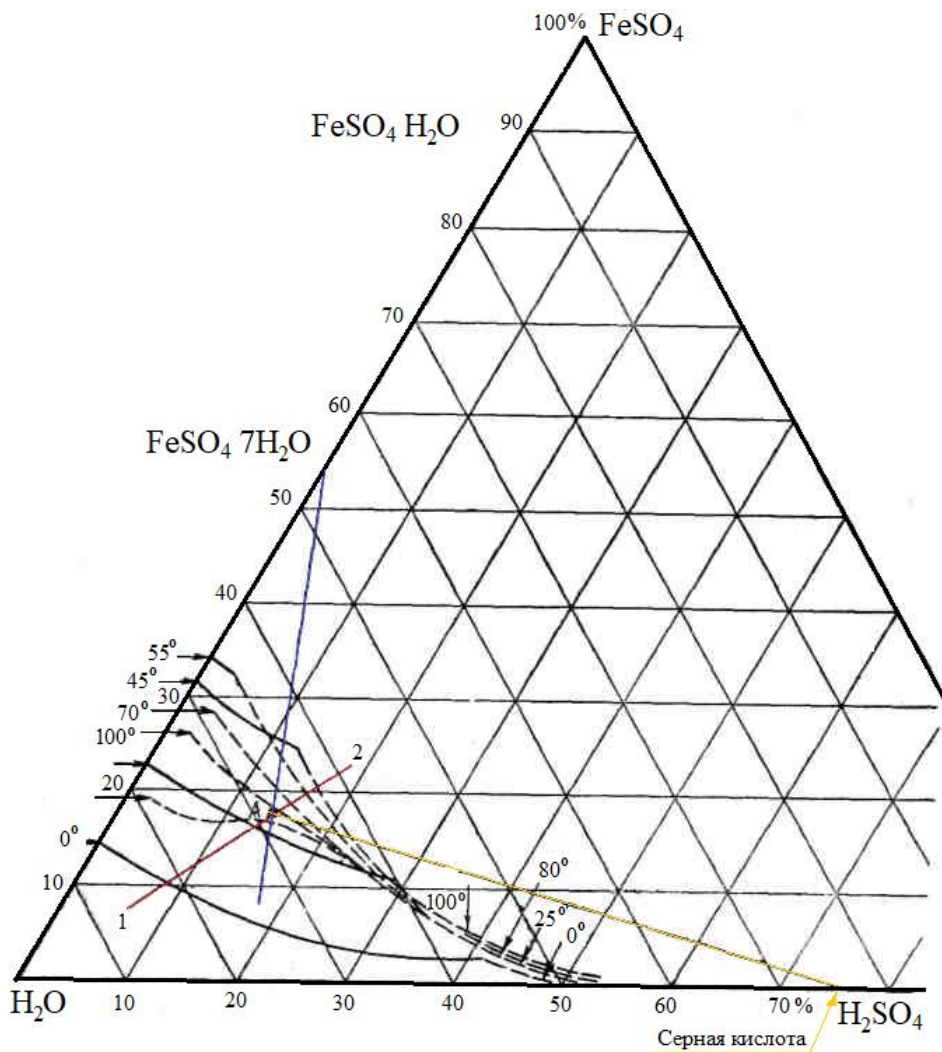
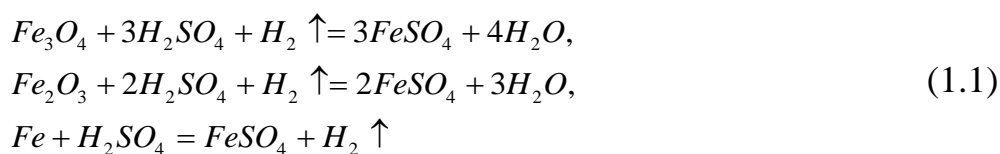


Рисунок 1.6 – Діаграма стану розчинів $H_2O - H_2SO_4 - FeSO_4$

Для травильних розчинів в БТЛ застосовують гарячі розчини сірчаної кислоти. Як тільки сталева смуга потрапляє в гарячий розчин кислоти, починаються реакції взаємодії з окалиною і металом:



В результаті цих реакцій з'являється сірчаноокисла сіль заліза (сульфат заліза

$FeSO_4$), яка розчиняється в гарячому розчині з утворенням мультигідратів. На рис. 1.7 і 1.8 наведені експериментально отримані залежності швидкості травління від концентрації H_2SO_4 , температури розчину і якості окалини [35].

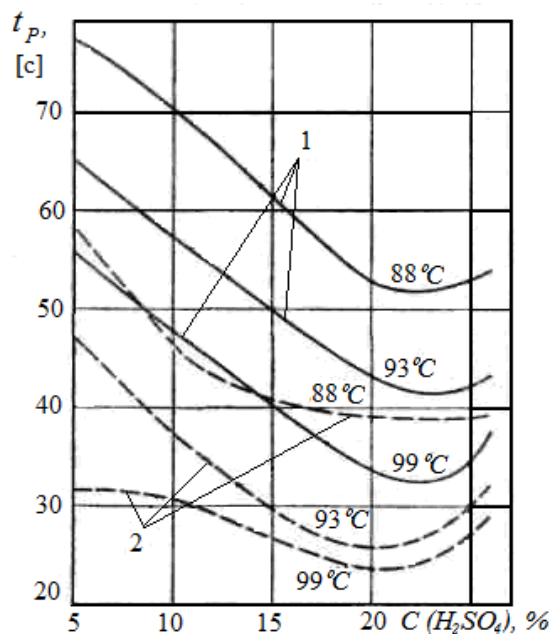


Рисунок 1.7 – Вплив кислотності і температури розчину на швидкість травління ($FeSO_4$ відсутній): 1 – зразки від задніх кінців рулонів; 2 – зразки від середини довжини рулонів

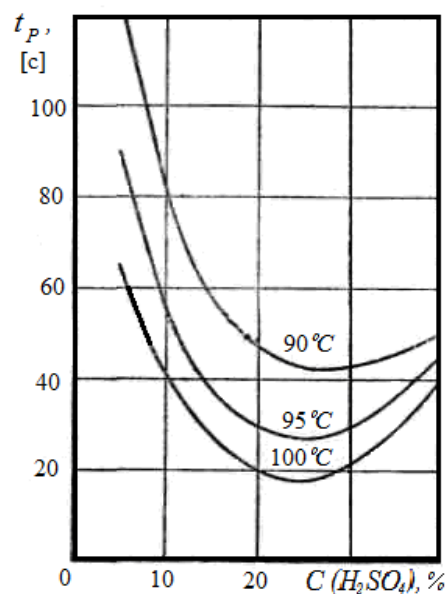


Рисунок 1.8 – Залежність швидкості травління від температури і концентрації розчину

Під терміном «швидкість травління» розуміють час (тривалість) перебування смуги в розчині – t_p , необхідний для повного видалення окалини з її поверхні. Видно, що t_p залежить від якості окалини і що найбільша активність розчинів спостерігається приблизно при $C_{H_2SO_4} = 23\%$ як для окалини різної якості, так і для застосованих температур розчинів. При подальшому підвищенні концентрації кислоти активність розчинів падає. Максимум активності кислотного розчину досить точно відповідає максимальній концентрації активних іонів водню у водних розчинах сірчаної кислоти.

На рис. 1.9, 1.10 наведено залежності: активності кислотного розчину від вмісту водневих іонів та швидкості розчинення сталі від концентрації сірчаної кислоти в розчині.

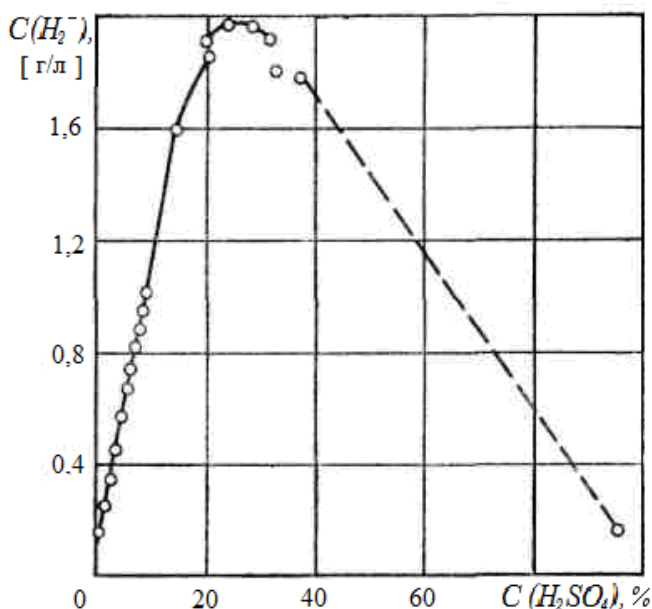


Рисунок 1.9 – Концентрація водневих іонів у водних розчинах сірчаної кислоти

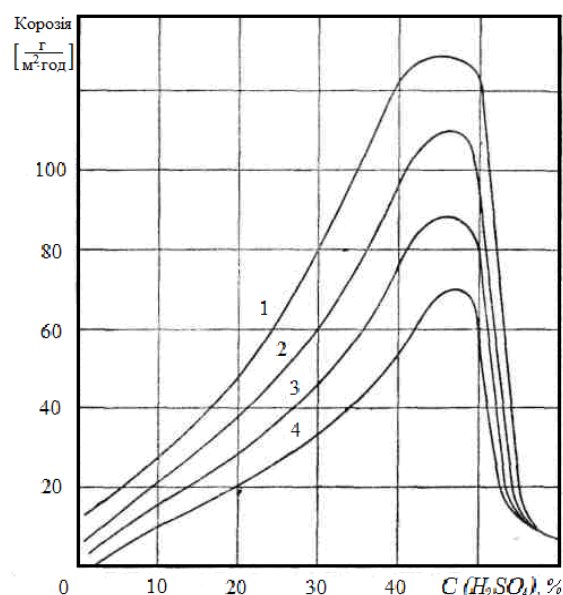


Рисунок 1.10 – Залежність швидкості розчинення сталі в сірчаній кислоті від концентрації та різного змісту вуглецю в сталі: 1 – 0,90%; 2 – 0,60%; 3 – 0,32%; 4 – 0,05%

Сталь з малим вмістом вуглецю розчиняється значно повільніше, ніж високовуглецева сталь при рівних умовах; для кожної сталі існує максимум активності розчину. На поверхні смуги остигаючого рулону утворюється окалина, що складається з найближчого до металу шару вюстита, покритого шаром магнетиту і шаром гематиту. Із складових окалини магнетит і гематит є щільними та крихкими і важко розчинними в кислоті. Вюстит дуже швидко розчиняється в кислоті, поки він знаходиться в контакті з залізом смуги. Успішність травління залежить від того, як швидко будуть розчинені кислотою верхні шари окалини, і від кількості рівномірно розподілених по площі смуги тріщин, через які кислота проникне до вюстита, швидко його розчинить і тим порушить зв'язок зовнішніх шарів окалини з металом і відірве їх завдяки дії зсередини виділяється водню. Ідеальною для травління структуру окалини вважають, коли безперервний шар вюстита знаходиться в контакті з металом смуги та весь шар товщини окалини пронизує велика кількість рівномірно розподілених поверхневих тріщин буде: кислота зможе викликати появу найбільшої кількості

електрохімічних пар всередині шару окалини.

Кількість технічної сірчаної кислоти для складання розчину заданої концентрації можна визначити за формулою:

$$A = V \cdot \gamma \frac{a}{s}, \quad (1.2)$$

де A – необхідна вага технічної кислоти, т;

V – об'єм розчину в ванні, м³;

γ – питома вага розчину при заданій концентрації кислоти (визначається за таблицями);

s – зміст моногідрату в застосовуваній технічній сірчаній кислоті, % (вага);

a – задана концентрація H₂SO₄, % (питома вага).

Подача кислоти в ванни при каскадному методі травління автоматизована із використанням дозаторів.

Для того щоб підтримувати активність травильних розчинів і мати можливість регулювати додавання кислоти так, щоб до призначеного моменту зливу розчин мав бажаний склад, необхідно контролювати зміну концентрації травильних розчинів. Слід також зазначити, що застосування високоефективних керованих енергоблоків (ВКЕБ) в технологічних лініях травління смугової сталі дозволяє відмовитися від високопотенційної перегрітої пари і перейти до використання низькопотенційної насиченої пари, що значно зменшує споживання природного газу при керуванні ТП.

Основні перспективи зниження витрат сірчаної кислоти і енерговитрат при травлінні, а також підвищення якості очищення смугового прокату пов'язані, перш за все, з удосконаленням методів і засобів автоматизації керування технологічними лініями травління [29, 36, 37].

На стійкість процесу прокатки і можливість його ведення з високими швидкостями сильно впливає якість смуги, отриманої з травильного відділення. На смугі не повинно бути плям недотрава і перетрава; смуга повинна бути добре промита і не мати слідів залізного купоросу. Дефекти смуги за фізико-механічними властивостями залежать головним чином від дотримання правильних термічних режимів при травлінні. Разом з тим слід враховувати істотний вплив режимів деформації, які повинні бути обрані з урахуванням кінцевих властивостей металу.

У процесі холодної прокатки після травління на поверхні смуг нерідко утворюються поглиблення або виступи, залишаються відбитки у вигляді заглиблень різних форм і розмірів та вкатана металева крихта. Крім того, істотний перетрав смуги може служити причиною бракування всього рулону сталі або ж його частини. Причинами цього можуть бути описані вище дефекти, обумовлені незадовільною якістю керування БТА. Все це дозволяє зробити висновок доцільність віднесення технологічного процесу травління смугової сталі до класу об'єктів нейромережевого керування. Застосування традиційних моделей і методів керування в цьому випадку спричиняє значні коливання процесу.

1.3 Автоматизоване керування травильною лінією

Розглянемо виконавчі механізми, що застосовуються при керуванні травильної лінії. За функціональним призначенням їх можна розділити на три групи.

1. Механізми, що виконують епізодичну роботу, повторювану при кожному новому рулоні (ножиці для обрізки «хвостів», зварювальна машина, гратознімач, зливна машина, ролики, що витягають смугу з петлевої ями № 2, ножиці для вирізання шва і всі механізми подачі рулону в розмотувач).

2. Механізми, призначені для транспортування смуги на ділянці лінії (тягнучі ролики № 1 і 2, які транспортують смугу через травильні і промивні ванни та сушилу).

3. Механізми, що виконують технологічні і транспортні операції (окаліноломатель, правильна машина, дискові ножиці і моталка).

Механізми другої і третьої груп мають приводи від електродвигунів, швидкість яких може регулюватися в межах 1:10. Кожна з трьох ділянок травильної лінії має окремий пост незалежного керування електродвигунами.

Травильну лінію в ручному режимі обслуговує 4 оператора за допомогою пультів керування, а також засобів сигналізації та блокування, що знижують вірогідність виникнення аварійних станів ТП при несвоєчасному або неправильному включенні операторами будь-якого з механізмів.

При великих швидкостях розмотування мають місце випадки «втрати» кінця смуги оператором, що викликають втрати продуктивності лінії. Робота оператора значно полегшиться, якщо будуть впроваджені методи і засоби автоматичного

перекладу ділянки на заправну швидкість перед закінченням розмотування рулону.

Прийнявши керування розмотувачем, оператор ділянки проводить на заправній швидкості передній кінець смуги уздовж всієї ділянки розмотування, допомагаючи своєму підручному виконувати обрізку, зварювання або зшивання кінців смуг. Зварювальної машиною і гратознімачем управляє спеціально підготовлений кваліфікований оператор.

Як тільки зварювання або зшивання закінчені, оператор дає сигнал на головний пост, дозволяючи роботу травильних ванн на повній швидкості, включає всю ділянку розмотування на повну швидкість і стежить за наповненням смугою петлевої ями № 1. Його завдання полягає також в тому, щоб до кінця розмотування рулону петлева яма № 1 була заповнена повністю.

З переходом ділянки розмотування на швидкість заправки оператор з підручним обрізають задній кінець смуги і встановлюють її в зварювальної або зшивної машині. Оператор зобов'язаний припинити просування смуги в травильних ваннах, якщо з петлевої ями № 1 вибрані всі петлі.

У відповідальності оператора головного поста знаходиться керування швидкістю руху смуги в травильних ваннах, вирізанням шва, змотуванням і виштовхуванням рулону з моталки. Оператор погоджує з травильником допустимі швидкості руху смуги в ваннах, несе відповідальність за брак по недотраву і перетравити смуги через недотримання необхідної швидкості смуги в ваннах і вимагає від травильника підтримки активності розчинів, що забезпечує високі швидкості травління. Для об'єктивної оцінки процесу травління необхідно враховувати вплив технологічних чинників на основні параметри в їх сукупності і взаємодії, що можна зробити тільки на основі адекватної математичної моделі процесу травління. Застосовувані в даний час лінійні моделі кислотного травління сталей не завжди дозволяють отримати задовільні результати.

Автоматизація керування розглянутими процесами травління передбачає, перш за все, створення систем цифрового керування концентрацією кислоти і температурою травильного розчину для отримання заданої якості очищення сталевих смуг з використанням відповідних математичних моделей. Очевидно, що створення автоматизованої системи керування безперервними травильними агрегатами можливо лише в складі загальної автоматизованої системи управління технологічними

процесами (АСУТП) широкополосного стану холодної прокатки. На рис. 1.11 наведена загальна структура АСУТП [38], яка використовується на даний час на сучасних металургійних підприємствах, що виробляють сталевий листовий прокат.

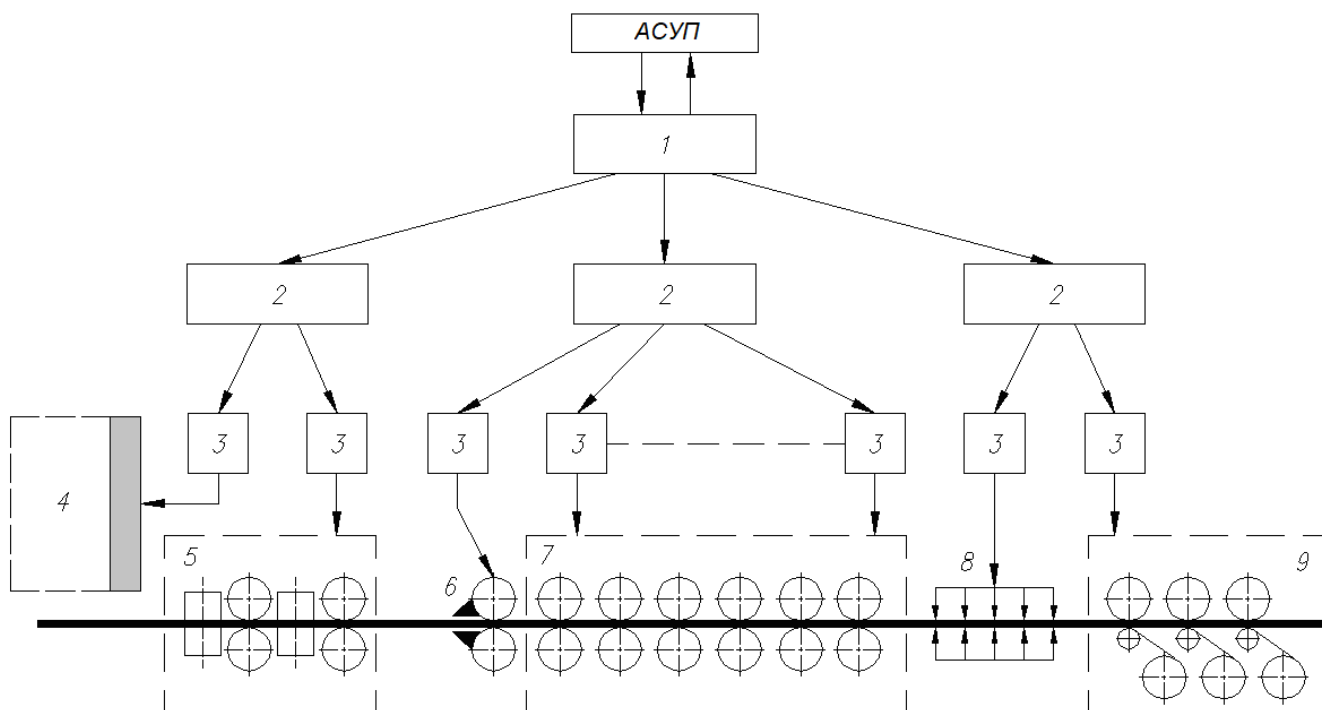


Рисунок 1.11 – Загальна структура АСУ ТП широкополосного стану холодної прокатки

На рис. 1.11 прийняті наступні позначення: 1 – сервер ТП верхнього рівня (планування та оперативне керування, збір і обробка виробничої інформації, контроль параметрів смуги уздовж лінії стану, формування уставок для локальних систем керування); 2 - мікропроцесорні контролери; 3 - локальні системи керування; 4 - безперервні травильні агрегати; 5 - чорнова група клітей; 6 - летючі ножиці; 7 - чистове група клітей; 8 - система охолодження смуги; 9 - моталки.

Для керування окремими механізмами і технологічними ділянками застосовуються локальні системи контролю і керування (ЛСКК), які можуть виконуватися як на цифрових, так і на аналогових елементах. Для керування основними технологічними лініями доцільно застосовувати мікропроцесорні контролери, що функціонують в режимі прямого цифрового керування, при цьому ЛСКК будуть використовуватися для реалізації завдань технологічного контролю і

стабілізації значень окремих параметрів. ЛСКК спільно з датчиками технологічного контролю складають нижній рівень автоматизації, керований від середнього рівня.

Застосування цифрових обчислювачів на всіх рівнях АСКТП стану холодної прокатки відповідає сучасній концепції створення децентралізованих систем автоматизованого керування складними технологічними комплексами [39]. Ядром середнього рівня є мікропроцесорні контролери, які забезпечують поточне цифрове керування станом на основі прийнятих моделей, критеріїв та отриманої інформації про хід технологічного процесу, початкову настройку стану, збір і обробку технологічної інформації.

Верхній рівень АСУТП призначений для цілей планування і оперативного керування виробництвом, для супроводу металу по лінії стану, ідентифікації стану ТП і керування ритмом прокатки, а також для збору і обробки виробничої інформації. ЕОМ верхнього рівня пов'язана з АСУП металургійного підприємства і в ряді випадків може виконувати функції нижчого рівня АСУП.

Застосування цифрових обчислювачів на всіх рівнях АСУТП стану холодної прокатки відповідає сучасній концепції створення децентралізованих систем автоматизованого керування складними технологічними комплексами.

На даний час в АСУТП стану холодної прокатки застосовуються різні контролери та мережеве обладнання. Наприклад, в [40] пропонується керування механізмами технологічних ліній здійснювати шляхом програмної обробки даних, що надходять через функціональні модулі вимірювання, керування і регулювання в програмований контролер (PLC). Для керування всім автоматизованим комплексом використовуються високопродуктивні універсальні гнучко програмовані контролери Simatic S7-400 з модулями децентралізованої периферії ET-200M. Включення і вимикання електроприводів механізмів здійснюється контролером через контакти вихідних реле, які здійснюють гальванічну розв'язку ланцюгів різного рівня напружень і призначення. Локальні системи керування електроприводами технологічних ліній побудовані на основі мережі PROFIBUS з кільцевою топологією. Автоматизована система комплектується сенсорною панеллю керування, для транспортних операцій з рулонами застосована традиційна апаратура на пультах (ключі і кнопки керування). АСУП стану холодної прокатки функціонально включає дві взаємопов'язані частини: підсистему автоматизованого керування

електроприводами (АСКЕП) і автоматизовану систему контролю роботи (АСКР). На рисунку 1.12 наведена загальна схема розташування основних блоків автоматизованого комплексу технічних засобів (АКТЗ) БТА, де прийняті наступні позначення:

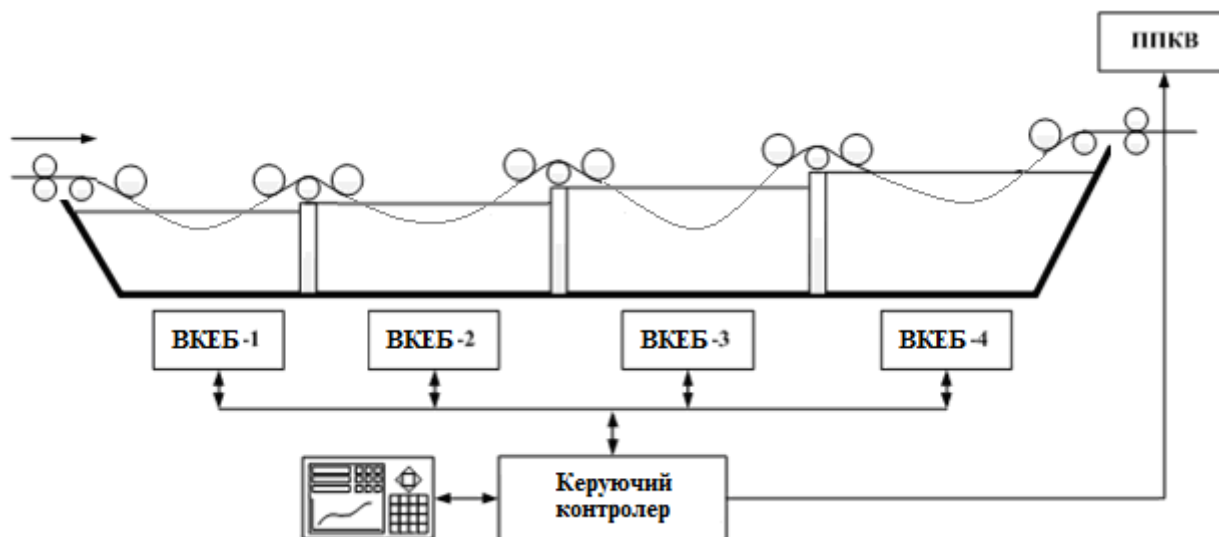


Рисунок 1.12 – Схема розташування основних блоків АКТЗ БТА

ППКВ – підсистема подачі кислоти і води; ВКЕБ – високоефективний керований енергоблок. Рішення відповідно найсучаснішої з існуючих в даний час систем автоматизації роботи безперервних травильних агрегатів, що застосовується на Маріупольському металургійному комбінаті (ММК) ім. Ілліча.

Основні функції АСКЕП – керування всіма електроприводами лінії, АСКР – контроль параметрів і відображення інформації. Верхній і середній рівні системи містять два сервера WinCC і два автоматизованих робочих місця (станції) (АРМ). У якості серверів і робочих станцій використовуються промислові комп'ютери серії SIMATIC RACK 840 специфікованої конфігурації зі SCADA – системою WinCC. Мережа системи побудована за принципом «клієнт-сервер» і має два кільця мережі: Industrial Ethernet (для зв'язку контролерів і серверів) і Ethernet (для зв'язку серверів і клієнтських станцій). У мережі використовується оптоволоконний зв'язок (на основі оптичних модулів зв'язку OSM TP62). Ключові параметри, що задають продуктивність і якість роботи БТА (блоки 3 і 4 на рисунку 1.11), формуються на верхньому рівні АСКТП стану холодної прокатки (блок 1 на рисунку 1.11). При цьому важливим завданням є створення ефективної схеми автоматизованого керування травильними

лініями із застосуванням сучасних мікропроцесорних засобів і методів цифрового регулювання.

На рис.1.13 наведена структура автоматизованого комплексу технічних засобів (АКТЗ) контролю та керування БТА.

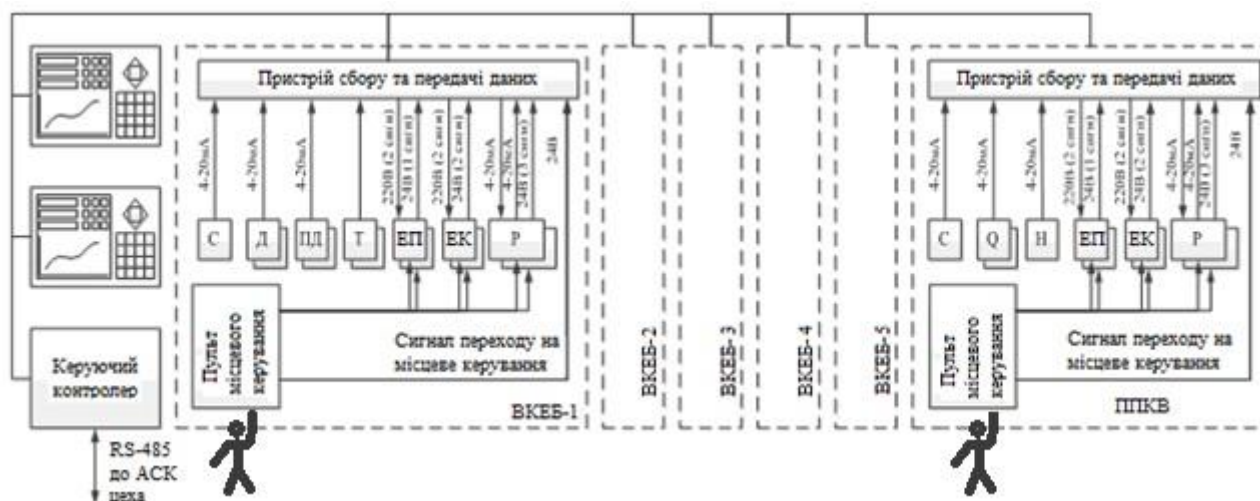


Рисунок 1.13 – Структура автоматизованого комплексу технічних засобів

На рисунку 1.13 прийняті наступні позначення: С – кондуктометр; ЕП – електромагнітний пускач; ЕК – електричний клапан; Р – регулятор; ПД – датчик перепаду тиску; Т – термопара; Д – датчик тиску; Q – датчики витрати води і кислоти; Н – датчик рівня конденсату; ВКЕБ – вискоєфективний керований енергоблок; ППКВ – підсистема подачі кислоти і води.

Блоки ВКЕБ-1 – ВКЕБ-4 аналогічні за складом функцій і являють собою модулі нагріву травильного розчину; блок ВКЕБ-5 (гаряча промивка) виконаний за бівалентної схемою [41] на базі утилізаційного теплообмінника по системі обміну теплоагентів «вода-вода» і теплообмінника подальшого підігріву «пар-вода» з пластинами зі сталі AISI 316 для роботи в неагресивному середовищі.

АКТЗ БТА забезпечує ведення ТП по регламентованій технології і виконує такі основні функції:

- збір даних від датчиків і їх обробку;
- керування режимом роботи БТА;
- постійний контроль і реєстрацію показника загальної кислотності конденсату (і води у ванні гарячої промивки);

- регулювання подачі пари по зворотній лінії конденсації;
- постійний контроль, реєстрацію і підтримку заданих температур розчинів в ваннах;
- постійний контроль процентного показника масового складу компонентів травильного розчину в ваннах;
- регулювання подачі води і кислоти в ванни;
- постійну ідентифікацію, контроль дефектів поверхні сталевих смуг на вході / виході БТА з подальшим формуванням керуючих сигналів для корекції помилки по зворотного зв'язку (температура, кислотність розчину, швидкість змотування сталевих смуг);
- обмін інформацією з системами керування більш високого рівня.

Даний АКТЗ відноситься до класу АСК нижнього рівня керування з безперервним характером технологічного процесу і забезпечує режим прямого цифрового керування процесами нагріву і регулювання концентрації травильного розчину.

До недоліків цієї системи слід віднести:

- відсутність моделей і методів точного керування температурним режимом і концентрацією кислоти в ТР, що дозволяють в належній мірі врахувати специфіку ОК: високий рівень невизначеностей, викликаних наявністю неконтрольованих параметрів і нестационарних збурень, та оптимізувати витрати ресурсів та енергії;
- відсутність моделей і методів оперативної діагностики активності ТР, призначених для ідентифікації параметрів ТР і регулювання його стану;
- відсутність формалізованих методів входної / вихідної ідентифікації дефектів листового прокату та їх реєстрації;
- відсутність відповідного критерію якості обробки сталевих смуг в травильних ваннах з урахуванням поточного стану ТП;
- відсутність моделей і методів оперативного автоматизованого контролю концентрації окремих компонентів складу ТР, вихід за припустимі межі яких призводять до нештатних ситуацій та зупинки ТП;
- відсутність контуру керування процесом попереднього зрошення дефектів сталевих смуг.

У зв'язку з різноманітністю задач керування БТА, для їх вирішення доцільно

розробити спрощені моделі роботи контурів керування підсистемами ТП, засновані зокрема на використанні інтелектуальних засобів ідентифікації нелінійних об'єктів цифрового керування – методів нечіткої ідентифікації та нейромережевого моделювання. З огляду на застосовані у роботі методи та моделі, ТП безперервного травління смугової сталі може бути віднесений до класу об'єктів інтелектуального нейронечіткого керування. Тому розглянемо загальні принципи такого керування і доцільність його використання при автоматизації роботи БТА. У підрозділах 1.4 та 1.5 наведені результати аналізу таких методів.

1.4 Аналіз методів нечіткої та нейромережевої ідентифікації нелінійних об'єктів цифрового керування

Рішення задач нечіткої ідентифікації нелінійних об'єктів може бути модифіковано з урахуванням реальних особливостей модельованих процесів.

Розглянемо основні етапи процедури ідентифікації нелінійних систем на основі кластеризації даних.

Етап 1. Вимірювання і збір даних.

Вибір сигналу обурення при ідентифікації системи є важливим завданням, так як для отримання репрезентативних даних треба впливати на систему по амплітудній і частотній осях, тобто необхідно змінювати ці дві величини в істотному діапазоні. Очевидно, що цей сигнал повинен мати значну кількість амплітудних рівнів, а його частотні властивості повинні бути представлені безліччю гармонік.

Етап 2. Вибір структури моделі.

Основою цього етапу є вибір інформативної сукупності вхідних і вихідних змінних. Крім того, необхідно вибрати порядок динамічної моделі. Цей етап дозволяє перейти від проблеми динамічної ідентифікації до проблеми створення статичних регресійних залежностей.

Етап 3. Кластеризація даних.

Після вибору структури і отримання загальної регресійної моделі переходять до її подання за допомогою набору локальних лінійних підмоделей. Розташування в просторі даних та параметри кожної з формованих підмоделей визначаються поділом даних на кластери.

Кожен з цих кластерів визначає нечітку область, в якій система може бути локально апроксимована необов'язково лінійною підмоделлю.

Етап 4. Вибір кількості кластерів.

На цьому етапі визначається число формованих кластерів за методами, запропонованими в [5].

Етап 5. Формування вихідної нечіткої моделі.

Нечітка кластеризація розділяє вихідну сукупність реєстрованих даних на групи, в яких прийнятним є застосування лінійних локальних залежностей між виходами і входами. Відповідно задаються правила вибору, функції належності та інші компоненти, властиві нечіткої моделі.

Етап 6. Редукція вихідної моделі.

Отримані на попередньому етапі вихідні нечіткі моделі можуть бути спрощені (наприклад, шляхом об'єднання подібних функцій належності).

Етап 7. Оцінка достовірності моделі.

Отримана в результаті ідентифікації модель може бути визнана працездатною або незадовільною. В останньому випадку етапи ідентифікації повинні бути реалізовані знову з внесенням певних змін.

Розглянемо докладніше завдання побудови локальних статичних залежностей, реалізовану на етапах 2 і 3. До таких залежностей відносяться, наприклад, моделі NARX (Nonlinear Autoregressive with exogenous input- нелінійна авторегресія з розширеним входом) або моделі NARMAX (нелінійна авторегресія зі змінним середнім і розширеним входом). Перехід від динамічної моделі до статичної може розглядатися, як формування регресорів – операторів переходу з тимчасової області сигналів в простір станів сигналів. Це дозволяє описати поведінку системи за допомогою формалізації статичного перетворення регресорів в відповідні значення виходів моделі. У даній роботі для здійснення такого перетворення пропонується застосування нечіткої логіки.

Відповідно до [6, 13] системи нечіткого типу є апроксиматорами функцій, отже, вони можуть бути використані для формування нелінійної регресії.

Нелінійна регресія відповідає моделюванню залежності між вихідною змінною $y \in Y \subset R$ і регресійний вектором $x = [x_1, x_2, \dots, x_p]^T$ в просторі $X \subset R^p$. Елементи

регресійного вектора будемо називати регресорами, а область X – регресійним простором. При цьому в загальному випадку генеруєма система описується наступною моделлю:

$$y = f(\mathbf{x}). \quad (1.3)$$

Сутність застосування такого типу регресії полягає в побудові функції $F(\mathbf{x})$, яка може апроксимувати функцію $f(\mathbf{x})$, використовуючи при цьому не тільки доступні дані, але і всі елементи простору X .

Помилку такої апроксимації можна оцінювати за допомогою наступної функції:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|f(\mathbf{x}_i) - F(\mathbf{x}_i)\|, \quad (1.4)$$

де N – число дискретних значень даних.

Модель з мінімальним значенням J є найкращою моделлю обраної структури.

Як і в разі лінійних систем, для ідентифікації нелінійних систем можуть використовуватися різні моделі. Зокрема згадана вище NARX - модель задає залежність між прогнозом значення виходу і попередніми значеннями спостережень «вхід-вихід»:

$$\hat{y}(k+1) = F(y(k), \dots, y(k-n_y+1), u(k), \dots, u(k-n_u+1)), \quad (1.5)$$

де k – дискретний час; n_u, n_y – параметри, що задають порядок системи.

У NARX - моделях вектор регресії містить набір поточних і попередніх даних для входів і виходів системи:

$$\mathbf{x}(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y+1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u+1)]^T. \quad (1.6)$$

Завдання апроксимації функції F в (1.5) може бути вирішено із застосуванням нелінійної регресії. Це дозволить отримати статичну модель на основі вимірів входів і виходів вихідної динамічної системи:

$$S = \{(u(j), y(j)), j = 1, \dots, N\}. \quad (1.7)$$

Вирішальне правило, що формується за допомогою NARX-моделі, можна представити таким чином:

R_i : якщо $y(k)$ відповідає A_{i1} і ... і $y(k - n_y + 1)$ відповідає A_{in_y} ; і $u(k)$ відповідає B_{i1} і ... і $U(K - n_u + 1)$ відповідає B_{in_u} , то $y(k + 1)$ відповідає C_i .

Квадратична помилка прогнозу в цьому випадку становить:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y(i) - \hat{y}(i))^2. \quad (1.8)$$

Рішення задач нечіткої ідентифікації нелінійних об'єктів може бути модифіковано з урахуванням реальних особливостей модельованих процесів.

Разом з нечіткими моделями для опису нелінійних технологічних процесів травління смугової сталі можуть бути успішно використані нейромережеві моделі.

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 нелійними динамічними об'єктами в реальному часі [6, 42, 43]. 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.

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^N w_i \Phi_i(u(k)), \quad (1.9)$$

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 винна бути обмеженою, монотонною і безперервно дифференціюємою. Сигмоїдальні функції – логістична (уніполярна) і гіперболічний тангенс (біполярна) – володіють перерахованими властивостями.

Загальну структуру ШНМ на основі БП наведено на рис. 1.14.

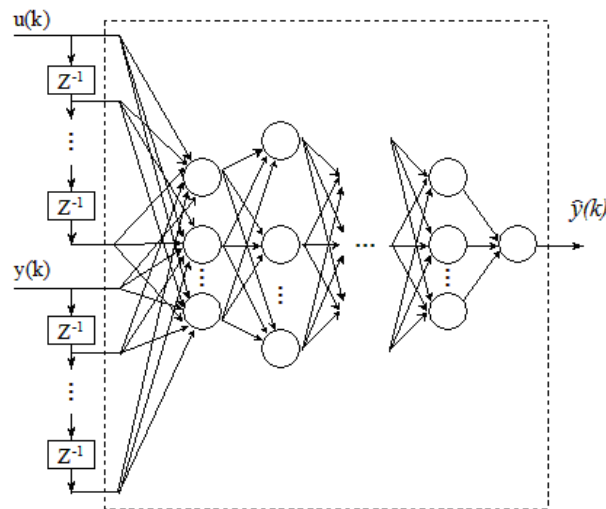


Рис. 1.14 – Нейромережева модель об'єкта

ШНМ є універсальними аппроксиматорами і дозволяють апроксимувати з будь-якою заданою точністю будь-яку безперервну функції [44], за умови, що існує достатня кількість прихованих шарів в мережі. Це ствердження справедливо 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 [45]. Параметрична ідентифікація (навчання мережі) складається в налаштуванні її параметрів і зазвичай зводиться до мінімізації квадратичного функціонала помилки ідентифікації.

Розглянемо особливості застосування нейромережевих моделей для вирішення завдань ідентифікації та керування нелінійними динамічними об'єктами в умовах часткової апріорної невизначеності щодо структури та властивостей об'єкта, а також щодо параметрів зовнішніх збурень, що діють на об'єкт. Завдання ідентифікації полягає в навчанні штучної нейронної мережі (налаштуванні параметрів) для забезпечення досягнення мінімуму деякого функціоналу від помилки ідентифікації.

Багатовимірний нелінійний динамічний об'єкт можна представити NARMAX моделлю:

$$\tilde{y}(k) = f[y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n), k] + \xi(k), \quad (1.10)$$

де $\tilde{y}(k), u(k)$ – вихідний і вхідний сигнали об'єкта в момент часу відповідно;

m, n – порядки запізнювання по вихідній і вхідного каналах відповідно;

$f(\cdot)$ – невідома нелінійна функція;

$\xi(k)$ – перешкода вимірювання вихідного сигналу.

Ввівши вектор узагальненого вхідного сигналу розмірністю $(n+m) \times 1$

$$x(k) = [y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)], \quad (1.11)$$

перепишемо рівняння (1.10) у вигляді

$$\tilde{y}(k) = f[x(k), k] + \xi(k). \quad (1.12)$$

Завдання ідентифікації полягає в оцінюванні функції $f(\cdot)$ за вимірюваннями вхідних $u(k)$ і вихідних $y(k)$ змінних

Нейромережева модель об'єкта (1.10), узагальнена структура якої представлена на рис.1.14, має вигляд:

$$\hat{y}(k) = f^L[(W^L)^T f^{L-1}[(W^{L-1})^T f^{L-2}[\dots f^1[(W^1)^T, x(k)]]], \quad (1.13)$$

де L – кількість шарів в мережі; W^i – вектор вагових параметрів нейронів i -го шару мережі; $f^i(\cdot)$ – функція активації i -го шару.

Навчання мережі, до якого зводиться задача ідентифікації, полягає в налаштуванні її параметрів на основі порівняння вихідних сигналів об'єкта і моделі і полягає в мінімізації квадратичного функціонала помилки:

$$J_I = r^2(k) = M\{[\tilde{y}(k) - \hat{y}(k)]^2\}. \quad (1.14)$$

За аналогією з традиційним підходом до вирішення задач ідентифікації, при якому процес побудови моделі розбивається на два етапи – структурну і параметричну ідентифікацію, застосування ШНМ також вимагає вирішення двох завдань: визначення структури мережі і налаштування її параметрів (навчання).

Зазвичай початкова конфігурація мережі вибирається двошаровою з довільним числом нейронів в шарах. Після проведення експериментів з різними конфігураціями мережі вибирається та, яка дає мінімальне значення функціоналу помилки або, при досягненні заданої точності рішення, вимагає менших обчислювальних затрат.

Якщо якість навчання недостатня, збільшують число нейронів шару або кількість шарів. Якщо ж спостерігається явище перенавчання, то слід зменшити число нейронів в шарі або видалити один або кілька шарів. Можна виділити два типи нейромережних моделей об'єктів: моделі, отримані методами прямої та інверсної ідентифікації. При побудові моделей, заснованих на прямих методах ідентифікації, використовують два різних підходи: "проорокування" (прогнозування) поведінки об'єкта та "імітація" (моделювання) поведінки об'єкта [46].

При моделюванні поведінки об'єкта доступною є лише інформація про значеннях вхідних сигналів $u(k), u(k-1), \dots$ і вихідних $\hat{y}(k), \hat{y}(k-1), \dots$ сигналів моделі, при цьому сигнали на виході об'єкта не вимірюються. Отримана таким чином модель називається паралельною і описується рівнянням:

$$\hat{y}(k+1) = f(\hat{y}(k), \hat{y}(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots). \quad (1.15)$$

Дана модель може використовуватися для імітації поведінки об'єкта без підключення до реальної системи або, коли датчики входять до складу самої моделі. Для діагностики стану системи необхідно порівняти значення сигналів на виході об'єкта і моделі і оцінити величину помилки.

При прогнозуванні поведінки об'єкта використовується послідовно-паралельна модель. Значення сигналу на виході моделі $\hat{y}(k+1)$ розраховується на підставі значень

вхідних $u(k), u(k-1), \dots$ і вихідних сигналів об'єкта $y(k), y(k-1), \dots$ відповідно до рівняння:

$$\hat{y}(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, u(k), u(k-1), \dots). \quad (1.16)$$

Для побудови системи керування можна використовувати інверсний підхід, що реалізує зворотню функцію об'єкта керування [47], якщо об'єкт керування описується рівнянням виду:

$$y(k+1) = f(y(k), y(k-1), \dots, u(k)), \quad (1.17)$$

Однак дана модель може бути застосована лише до обмеженого класу об'єктів керування, для яких запізнення по сигналу керування дорівнює одному такту [48].

1.5 Особливості використання нечітких і нейромережевих моделей в системах цифрового керування

Більшість реальних систем характеризуються нелінійними залежностями, складними для моделювання динамічними властивостями, наявністю неконтрольованих шумів і перешкод, що заважають реалізації традиційних стратегій керування. Тому, як класична так і сучасна теорії керування (зокрема теорія адаптивного і оптимального керування), в значній мірою базуються на ідеї лінеаризації систем.

При побудові систем інтелектуального керування нелінійними об'єктами виникає ряд труднощів. Однією з них є вибір методу налаштування параметрів керуючих пристроїв (цифрових регуляторів). Закони налаштування параметрів керуючих пристроїв можуть бути отримані існуючими методами тільки в окремих випадках. Наявність блоку ідентифікації динаміки об'єкта керування ускладнює структуру системи керування. Крім того, похибка ідентифікації погіршує якість керування, а в деяких випадках призводить до нестійкого режиму роботи системи. Нейромережеве керування засноване на застосуванні повністю визначених штучних

нейронних мереж для формування необхідних сигналів керування. Перспективність застосування систем нейромережевого керування обумовлена наступними факторами:

- ШНМ є адаптивними системами, здатними навчатися для вирішення складних завдань керування;

- нейромережеві технології керування дозволяють подолати багато труднощів, що виникають при роботі з нелінійними об'єктами. Здатність ШНМ реалізувати складні нелінійні відображення обумовлена застосуванням сигмоїдальних функцій активації (або деяких нелінійних функцій загального вигляду) для нейронів в прихованих шарах;

- здатність ШНМ до самонавчання дозволяє використовувати нейрорегулятори навіть в умовах суттєвих невизначеностей;

- висока швидкодія і надійність нейрорегулятора обумовлені високим ступенем паралельності ШНМ. Простота реалізації нейронних мереж і їх здатність до навчання роблять їх особливо привабливими при керуванні складними нелінійними об'єктами в реальному часі.

Слід зазначити, що найбільш доцільним є використання нейромережевих моделей для керування багатовимірними об'єктами, зокрема, MISO – об'єктами (multi-input-single-output), до яких відноситься більшість блоків БТА.

Ефективність створюваних систем керування реальними об'єктами в значній мірі залежить від якості використовуваних при цьому математичних моделей, які з одного боку, повинні найбільш повно відображати властивості досліджуваного об'єкта, а з іншого – бути зручними для реалізації алгоритмів.

Тому ефективним представляється розробка систем керування на основі методів теорії ШНМ в поєднанні з адаптивним підходом регулювання [49]. Застосування апарату нечіткої логіки для побудови адаптивних систем цифрового керування пов'язано з формалізацією неточних, розмитих в смисловому плані суджень і узагальнених категорій, які задають класифікацію вихідних понять на рівні нечітких множин, що вельми важливо при керуванні об'єктами, опис яких відомо неточно. Крім того, нечіткі системи при певних умовах мають властивість апроксимувати будь-яку нелінійну функцію із задаваною точністю, що дає можливість створювати адаптивні системи з оптимальним керуванням. Так синтез адаптивних нечітких регуляторів

(АНР) зводиться до вирішення деякої кінцевої множини оптимізаційних задач, при цьому вид оптимізаційної функції залежить від даних навчальної вибірки. Знаходження глобального екстремуму такої функції традиційними методами оптимізації є складним, а часто нерозв'язним завданням. Структуру такої системи керування наведено на рис.1.15

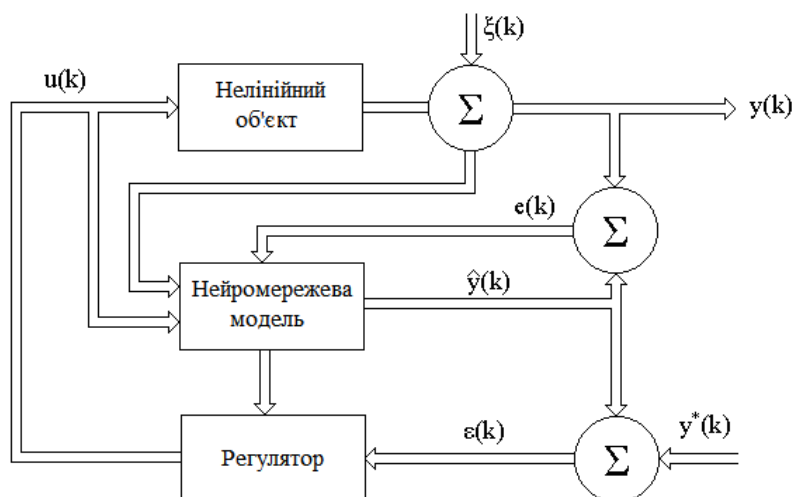


Рисунок 1.15 – Структура системи нейро-адаптивного керування

Гradientні методи, які можна використовувати для налаштування АНР, як відомо, працюють швидко тільки при малій кількості параметрів, що настроюються та не гарантують визначення глобального екстремуму. Вони ідеальні для застосування в унімодальних задачах. В [34] розглянуто синтез нечіткого регулятора на основі генетичного алгоритму. Для його успішної роботи не має значення форма поверхні відгуку і число визначених параметрів. Крім того, генетичний алгоритм при вирішенні задачі відшукування екстремуму не вимагає обчислення похідних від нелінійних функцій. Разом з тим, етап налаштування параметрів АНР, як правило, є багатоекстремальною задачею оптимізації, а генетичні алгоритми не завжди забезпечують знаходження глобального екстремуму.

До *недоліків* застосування нечітких та нейромережевих методів можна віднести наступне: 1. Відсутня універсальна процедура аналізу стійкості нелінійних нейроконтролерів. Реалізовані лише окремі рішення для конкретних видів нейроконтролерів навіть при відомій математичній моделі об'єкта керування.

2. Конструкція майже всіх схем нейрокерування і їх навчання досить ускладнена через наявність кількох нейромереж і нетривіальну послідовність процедур навчання єдиної керуючої нейромережі. 3. Базовими блоками побудови багатьох методів нейрокерування є моделі, отримані емпірично.

Одним із шляхів вирішення проблем синтезу інтелектуальних регуляторів є розробка нових і розвиток існуючих методів. Перспективним є підхід, заснований на сумісному використанні штучних нейронних мереж і нечітких моделей [50]. Використання нечітких моделей є найбільш ефективним для керування однопараметричними SISO - об'єктами (single-input-single-output) – таких, як блок попереднього зрощення дефектів. Узагальнено синтез контурів інтелектуального нейромережевого і нечіткого керування, які доцільно використовувати при модернізації розглянутої вище системи керування блоками БТА, можна представити у вигляді наступних етапів:

- синтез/ визначення закону керування, що забезпечує оптимізацію обраного функціоналу якості для керування заданим об'єктом;
- синтез інтелектуального класифікатора – ідентифікатора, що визначає оптимальні параметри об'єкта керування (завдання);
- синтез структури регулятора(ів) цифрового керування об'єктом;
- параметризація регулятора(ів) цифрового керування об'єктом.

Класичні регулятори складних динамічних об'єктів, які можна описати лінійними динамічними ланками до третього порядку на практиці часто не забезпечують необхідну якість керування. Цей факт обумовлений перш за все невизначеністю і браком інформації про характеристики як об'єкта керування так і процесів, що протікають в системі. Нейро-нечіткі моделі, здатні ефективно функціонувати в умовах обмеженої інформації про об'єкт керування або інформації лише якісного характеру та можуть бути реалізовані кількома способами.

Перший підхід в реалізації нейро-нечітких моделей [51] розглядає механізм навчання штучної нейронної мережі (ANN), як препроцесор, який визначає правила нечіткого виведення (FIS). Як тільки параметри FIS визначаються, ANN починає роботу в звичайному режимі. Функції належності зазвичай апроксимуються нейронною мережею з навчальних даних.

Інший підхід у реалізації нейро-нечітких моделей – це паралельна модель

[49, 51], в якій нейронна мережа допомагає нечіткій системі визначити потрібні параметри, особливо якщо вхідні змінні системи не можуть бути виміряні безпосередньо. Навчання відбувається тільки в нейронній мережі, а нечітка система залишається незмінною. В паралельній нейро-нечіткій моделі вхідні дані подаються на нейронну мережу, а вихід з нейронної мережі додатково обробляється за допомогою нечіткої системи логічного виведення.

Найбільш поширеними є інтегровані моделі, в яких навчальний алгоритм нейронної мережі використовується для визначення параметрів системи нечіткого виведення. Нечітка система виведення і відповідні функції належності базуються на апріорних знаннях системи. З іншого боку, механізм навчання нейронної мережі не залежить від апріорної інформації, а є стандартним для обраної архітектури ШНМ.

Принцип функціонування нейро-нечіткої моделі в задачах автоматичного керування може бути ілюстрований (рис. 1.16) на прикладі найбільш поширеної моделі ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System).

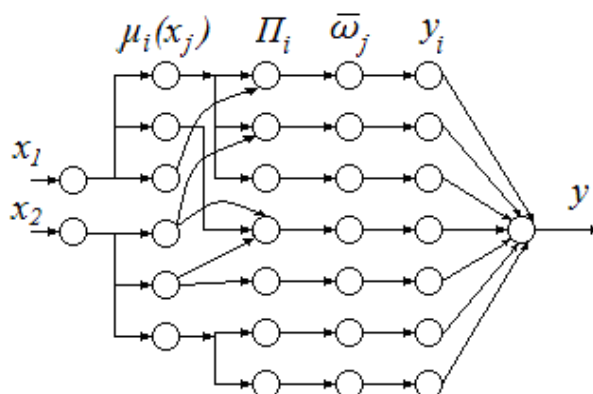


Рисунок 1.16 – Приклад структури ANFIS- мережі

ANFIS - адаптивна мережа нечіткого виведення реалізує нечітку систему Такагі–Сугено і являє собою п'ятишарову нейронну мережу прямого поширення сигналу. Вхідні керовані змінні моделі – x_1 і x_2 змінні (зазвичай це задане і поточне значення керованої змінної або їх неузгодженість), вихідна змінна y – керуючий вплив.

Перший шар визначає нечіткі терми вхідних параметрів. Виходи вузлів цього шару є значеннями функції належності $\mu_i(x_j)$ при конкретних значеннях входів.

Другий неадаптивний шар визначає посилення нечітких правил. Кожен вузол цього шару відповідає одному нечіткому правилу. Вузол другого шару з'єднаний з тими вузлами першого шару, які формують передумови відповідного правила. Виходами вузла ω_i є ступінь виконання правила, яка розраховується як *перемноження* вхідних сигналів. Третій неадаптивний шар здійснює нормалізацію ступенів виконання правил: $\bar{\omega}_i = \omega_i (\sum \omega_k)^{-1}$. Неадаптивні вузли цього шару розраховують відносну вагу виконання нечіткого правила. Четвертий шар визначає внесок кожного нечіткого правила в вихід мережі: кожний вузол шару розраховує внесок нечіткого правила y_i в вихід мережі. П'ятий шар формує керуючий сигнал $y = \sum y_i$.

Вибір нейро-нечітких моделей здійснюється в залежності від класу вирішуваних задач і для інтелектуального керування найбільше застосування отримали моделі ANFIS. Структура ANFIS гарантує, що кожен лінгвістичний термін представлений тільки однією нечіткою множиною. Процедура навчання з ANFIS не має обмежень на модифікацію функцій належності. Через високу гнучкість адаптивних мереж ANFIS може мати безліч варіантів виконання і реалізації алгоритмів в системах керування.

В якості критеріїв оцінки «інтелектуальності» АСК приймаються: час навчання, онлайн адаптивність, досяжність заданого рівня помилок і вартість обчислень. Як правило в якості нечітких моделей вибираються моделі Мамдані або Сугено. Нечіткі системи типу Сугено є високопродуктивними, але часто вимагають тривалих, складних процедур навчання. Нечіткі системи типу Мамдані використовують більш швидкі евристичні методи, але з втратою в продуктивності [34, 49]. Нейронечіткі моделі при вирішенні завдань синтезу систем автоматичного керування залишають не в повному обсязі вирішеними ряд проблем, пов'язаних з методологією аналізу і синтезу розглянутих систем, однак вони досить наочні і зручні в практичній реалізації.

1.6 Висновки до першого розділу та постановка завдань дисертаційного дослідження

У розділі 1 розглянуто проблему цифрового керування блоками БТА і перспективні напрями модернізації існуючої системи керування.

Аналіз існуючих методів опису нелінійних процесів травління та методів керування БТА, підтверджує доцільність застосування інтелектуальних нечітких і нейромережових моделей в системі цифрового керування агрегатом. При цьому необхідно вирішити ряд теоретичних і практичних завдань, пов'язаних з розробкою інтелектуальних нейромережових та нечітких моделей ідентифікації та цифрових регуляторів для модернізації системи керування, що забезпечує поліпшення експлуатаційних характеристик системи /ТП.

Метою дисертаційної роботи є розробка інтелектуальних нечітких і нейромережових моделей для вирішення задач ідентифікації технологічного процесу; синтез цифрових регуляторів стабілізації параметрів ТП в області оптимальних значень цільового функціоналу ТП.

Досягнення поставленої мети включає вирішення наступних завдань:

- розробка інтелектуальних методів діагностування стану компонентів ТР з використанням нейромережових моделей;
- розробка інтелектуальної нейромережової моделі вхідної / вихідної ідентифікації дефектів поверхні смугового прокату;
- 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 для попереднього зрошення дефектів;
- вдосконалення структури автоматизованої системи керування процесом травління смугової сталі на основі запропонованих методів і моделей;
- імітаційне моделювання та експериментальні дослідження режимів роботи інтелектуальної системи керування процесом безперервного травління;
- розробка методу оцінювання якості функціонування технологічної лінії травління смугової сталі.

Список використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [31-51].

2 МОДЕЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТРАВЛІННЯ СМУГОВОЇ СТАЛІ

Для кожного виду сталевий смуги визначено регламент швидкості змотування рулону V , що вимагає стабілізації параметрів ТР взагалі, а особливо – підтримання певної швидкості травління в рамках автоматизації процесу.

Поточне визначення концентрації сірчаної кислоти здійснюється за показниками датчиків кислотності, а розрахунок компонентів складу ТР – за номограмами, на підставі результатів прямого хімічного титрування. В АСКТП використовуються кондуктометричні датчики, що вимірюють загальний pH травильного розчину зі зростаючою похибкою в міру зростання температури T °C, але вимірювання не дають уявлення о концентрації окремих компонентів розчину [52], які негативно впливають на ТП, перевищуючи граничні значення. Тому відповідно до завдань дисертаційної роботи, в цій частині запропоновані такі інтелектуальні моделі оперативної ідентифікації ТП, які можливо реалізувати за допомогою АСКТП:

- інтелектуальна модель ідентифікації параметрів ТР;
- інтелектуальні моделі ідентифікації вмісту моногідратів у ТР;
- нечітка модель ідентифікації товщини дефектів поверхні прокату;
- нейромережева модель ідентифікації кута повороту клапану регулювання подачі теплоносія.

2.1 Модель інтелектуальної ідентифікації стану параметрів травильного розчину

Завданням процесу є очищення поверхні сталевий смуги при підтримці заданої регламентом швидкості змотування V . Істотна нелінійність залежності вихідної змінної швидкості травління t_p від параметрів стану травильного розчину ускладнює побудову аналітичної моделі.

При побудові нейромережевої радіально-базисної моделі ідентифікації стану травильного розчину в якості основних вхідних параметрів були обрані [53]: $C1$ – масова концентрація (%) сірчаної кислоти H_2SO_4 в травильном розчині; $C2n$ – масова концентрація (%) групи гідратів сульфатів заліза $n \circ H_2O \circ FeSO_4$ в травильном

розчині, T – температура розчину ($^{\circ}\text{C}$). Всі параметри пов'язані нелінійно, монотонно, в локальній екстремальній області. Присутність сульфатів заліза $n \circ \text{H}_2\text{O} \circ \text{FeSO}_4$ ($n = 1, 4, 7$) в травильному розчині суттєво впливає на t_p . Інтервал робочих параметрів в ваннах БТА: $C1 = 8\text{-}22\%$ (оптимальний $20\text{-}22\%$), $T = 75\text{-}95^{\circ}\text{C}$, концентрація групи сульфатів обмежена $\text{sup}(C2n) \leq 15\%$, і при перевищенні розчин розбавляють. Присутність компоненти $1 \circ \text{H}_2\text{O} \circ \text{FeSO}_4$ моногідрату обмежена в розчині не більше $\text{sup}(C21) \leq 3.5\%$, а перевищення аварійно порушує ТП. Побудова гіперповерхні $t_p = f(C1, C2n, T)$ дає можливість керувати ТП в оперативному режимі в оптимальних областях параметрів. В якості вхідних сигналів для навчання мережі використовувалися некорельовані випадкові послідовності аргументів $t_p = f(C1, C2n, T)$ з рівномірним законом розподілу в інтервалі $[0,1]$ За серіями вимірювань і аналітичними даними попередньо була проведена стандартизація значень змінних, що полягає в центруванні і нормуванні вхідних \hat{x} і вихідної y змінних:

$$\bar{x}_{jk} = \frac{x_{jk} - m_{x_j}}{\sigma_{x_j}}, \quad \bar{y}_k = \frac{y_k - m_y}{\sigma_y}, \quad j = \overline{1,3}, \quad k = \overline{1,600}, \quad (2.1)$$

де m_{x_j} – середнє вибірки x_{jk} , $k = \overline{1,600}$;

m_y – середнє вибірки y_k , $k = \overline{1,600}$;

σ_{x_j} , σ_y – дисперсії вибірок x_{jk} і y_k відповідно.

Вектор узагальненого сигналу, що надходить на вхід моделі, враховує перешкоди вимірювань функцією $\xi(k)$:

$$y(k) = f(x(k)) + \xi(k). \quad (2.2)$$

Апроксимація нелінійності $f(\bullet)$ радіально-базисними функціями:

$$\Phi_i(x) = \exp\left\{-\frac{\|x - \mu_i\|^2}{\delta_i^2}\right\}, \quad (2.3)$$

де μ_i, δ_i – центри та радіуси базисних функцій; $\|\cdot\|$ – евклидова норма відповідно, призводить до нейромережевої моделі (рис. 2.1):

$$\hat{y}(k) = c_0 + \sum_{i=1}^N c_i \Phi_i(x), \quad (2.4)$$

де c_i – вектори вагових коефіцієнтів, $i = \overline{1, N}$.

При вирішенні задач ідентифікації при застосуванні ШНМ, процес побудови моделі розбивається на два етапи – визначення структури мережі і налаштування (навчання) її параметрів.

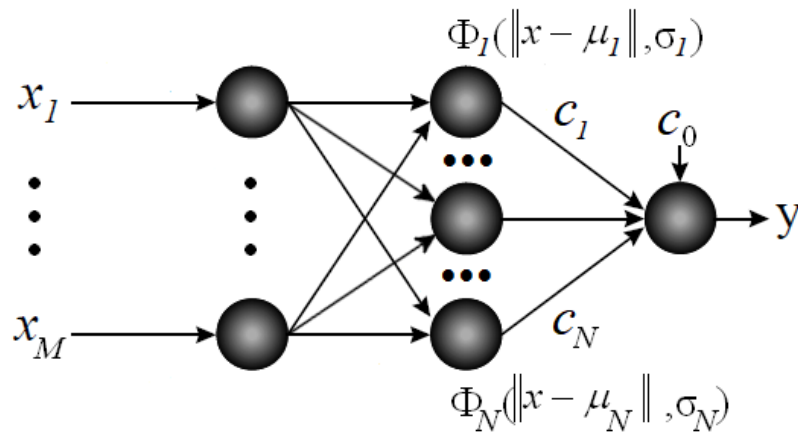


Рисунок 2.1 – Структура радіально-базисної мережі

Зміна структури мережі здійснюється її поступовим ускладненням шляхом додавання нових нейронів, що проводиться кожного разу, коли при появі чергового вхідного сигналу виникає помилка ідентифікації $e = y - \hat{y}$, яка перевищує допустиму (для визначених вище параметрів процесу травління).

Навчання (параметрична ідентифікація) полягає у визначенні параметрів мережі μ_i, δ_i, c_i і зводиться до мінімізації квадратичного функціоналу помилки:

$$J(k) = \|\varepsilon(k)\|^2 = \|y^*(k) - \hat{y}(k)\|^2, \quad e(k) = (y(k) - \hat{y}(k))^2. \quad (2.5)$$

Для налаштування параметрів мережі використовувався рекурентний алгоритм методу найменших квадратів (РМНК) з експоненціальним зважуванням інформації. Після навчання мережа використовується для ідентифікації параметрів процесу травління.

Ввівши вектор оцінок параметрів мережі, що настроюються

$$w(k) = (c_0^T(k), c_1^T(k), \mu_1^T(k), \delta_1^T(k), \dots, c_N^T(k), \mu_N^T(k), \delta_N^T(k))^T,$$

даний алгоритм можна записати наступним чином:

$$w(k) = w(k-1) + K(k)e(k),$$

$$K(k) = P(k-1) \nabla_w \hat{y}(k) \left[\lambda I + \nabla_w^T \hat{y}(k) P(k-1) \nabla_w \hat{y}(k) \right]^{-1},$$

$$P(k) = \lambda^{-1} (P(k-1) + K(k) \nabla_w^T \hat{y}(k) P(k-1)), \quad (2.6)$$

$$\nabla_w \hat{y}(k) = \left[\mathbf{I}, \Phi_1(\mathbf{x}(k)) \mathbf{I}, \Phi_1(\mathbf{x}(k)) (2c_1 / \delta_1^2) (\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_1)^T, \Phi_1(\mathbf{x}(k)) (2c_1 / \delta_1^2) \|\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_1\|^2, \dots, \Phi_N(\mathbf{x}(k)), \Phi_N(\mathbf{x}(k)) (2c_N / \delta_N^2) (\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_N)^T, 2\Phi_N(\mathbf{x}(k)) (2c_N / \delta_N^2) \|\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_N\|^2 \right]^T;$$

де \mathbf{I} – одинична матриця; $\lambda \in (0, 1]$; $\delta_i = \text{const}$, $i = \overline{1, N}$ – стандартне в нашому випадку відхилення для гауссівської функції.

На основі експериментальних даних і відомих аналітичних залежностей були побудовані 3D-поверхні для фіксованих значень окремих вхідних змінних (рис. 2.2 – 2.7). Дані про ці поверхні дозволили побудувати об'єднану гіперповерхність, яка з урахуванням обмежень реальних параметрів представляє собою ідентифікатор оптимальної швидкості травління t_p , яку визначає регламент кожного виду сортаменту сталюї смуги. Це дає можливість в режимі реального часу визначати області оптимальних параметрів ТР. Зріз доповнюючої транспонованої моделі $T^* = f^*(C_1, C_{2n}, t_p)$, скороченої за параметром заданої швидкості травління $t_p = \text{const}$ [54], ідентифікує поточне температурне завдання $T^*(k) = f^*(C_1, C_{2n}, t_p)$, необхідне для підтримки швидкості змотування $V(t)$ при поточних змінах значень параметрів C, C_1, C_{2n} , і передає завдання та відхилення регулятора в k -й момент часу [55].

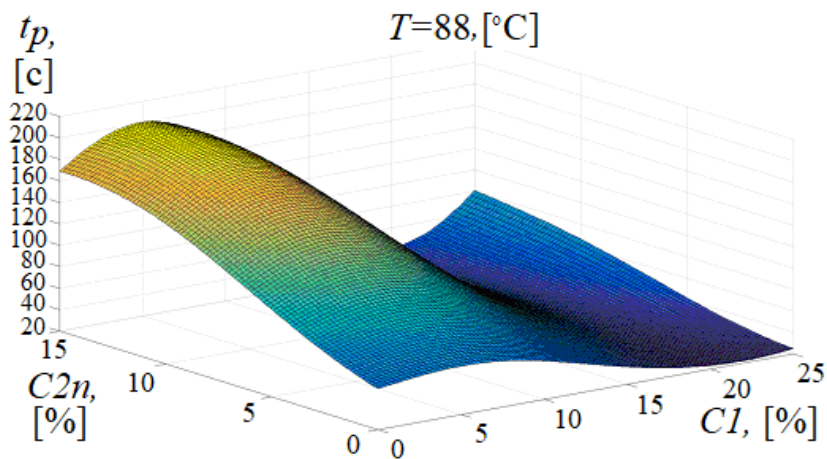


Рисунок 2.2 – Екземпляр 3D – поверхні $t_p = f^*(C_1, C_{2n}, T = 88^{\circ}C)$

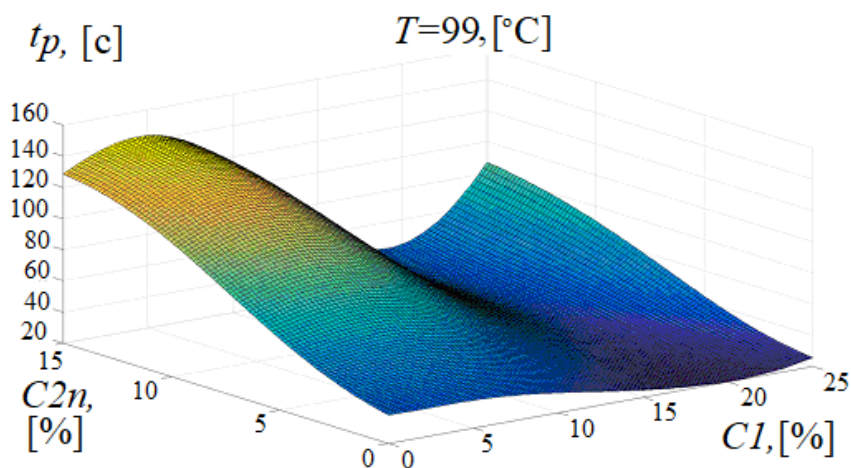


Рисунок 2.3 – Екземпляр 3D – поверхні $t_p = f^*(C_1, C_{2n}, T = 99^{\circ}C)$

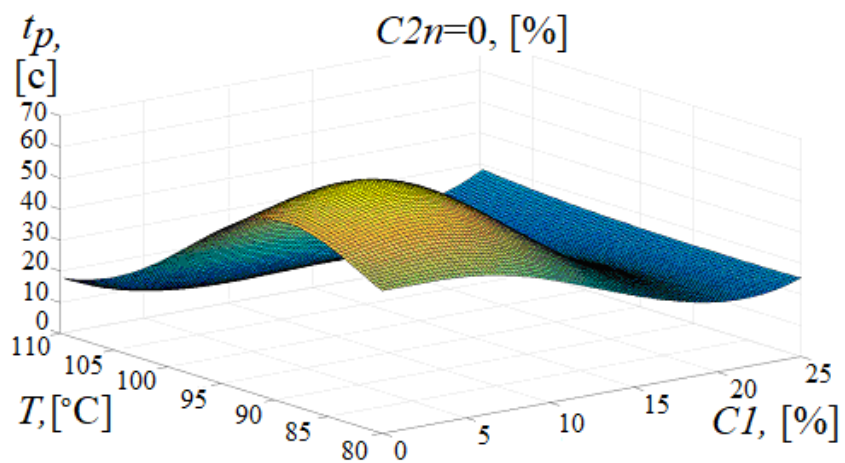


Рисунок 2.4 – Екземпляр 3D – поверхні $t_p = f^*(C_1, C_{2n} = 0, T)$

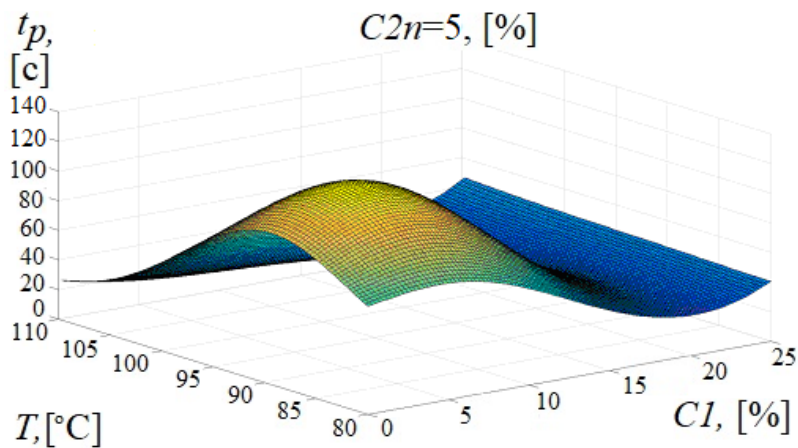


Рисунок 2.5 – Екземпляр 3D – поверхні $t_p = f^*(C_1, C_{2n} = 5, T)$

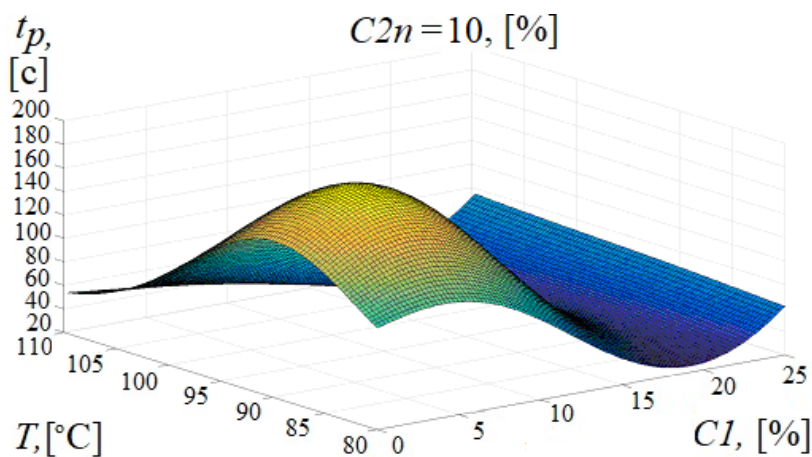


Рисунок 2.6 – Екземпляр 3D – поверхні $t_p = f^*(C_1, C_{2n} = 10, T)$

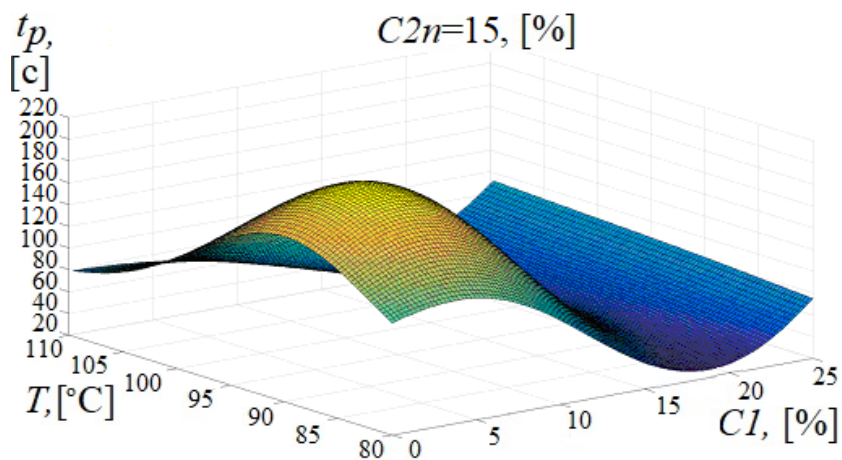


Рисунок 2.7 – Екземпляр 3D – поверхні $t_p = f^*(C_1, C_{2n} = 15, T)$

Для вирішення цієї задачі застосовано апарат RB – функцій і навчання моделі «з учителем» на вибірці вимірювань.

2.2 Ідентифікація вмісту муьльтігідратів у травильному розчині

2.2.1 Особливості ідентифікації вмісту муьльтігідратів

Стабільність роботи БТА обмежується гранично допустимими концентраціями (ГДК) компонент-реагентів ТП суміші муьльтігідратів і моногідрату сульфату заліза $FeSO_4 \cdot 1 \cdot H_2O$, який в разі перевищення ГДК C_{21} за певних співвідношень концентрації травильного розчину C , концентрації інших муьльтігідратів сульфату заліза C_{2n} і температури T осаджується на стінках травильних ванн і поверхнях теплообміну. Це різко знижує ефективність ТП та призводить до наднормативних витрат теплової енергії, електроенергії на транспортування теплоагенту до пластинчастих теплообмінних апаратів (ПТА).

Одним з завдань дисертаційної роботи є розробка моделі нейронечіткого оцінювання стану ТР в реальному режимі часу з метою підвищення ступеня автоматизації вимірювань ТП і загальної ефективності БТА. Визначаючим фактором є вміст суміші муьльтігідратів в ТР, а особливо – концентрація моногідрату $FeSO_4 \cdot 1 \cdot H_2O$ в травильному розчині. Далі буде розглянуто альтернативний класичним аналітичним методам підхід, заснований на математичному апараті теорії множин, нечіткої логіки та ШНМ.

Автоматизація комплексних вимірювань параметрів ТР стикається з низкою проблем. Жоден із окремих методів і пристроїв, застосовуваних у ТП травління, не дають повної інформації про стан pH ТР [56].

Наприклад, використання іонселективних електродів типу «Еком-SO4» [57], кондуктометрів типу КП-202 (РБ, «Антех»), «Метран» дають можливість виміряти загальний pH в температурному діапазоні розчину $T = 5 \div 80^\circ C$, але не дозволяє визначити концентрацію окремих компонент в агресивному середовищі сірчаної кислоти і температурах вище $80^\circ C$. Крім цього, випадкове потрапляння в розчини несистемних компонентів знижують достовірність і точність вимірювань.

Комбінований метод компанії «SensoTech» [58] для вимірювань в середовищі соляної кислоти HCl засновано на вимірах змін фізичних властивостей розчинів (щільності, провідності, або рефракційного показника заломлення травильного розчину) під впливом ультразвукового опромінення. Але застосування ультразвукових аналізаторів може привести до непрогнозованого утворення зародків кристалів [59] n -гідратів $FeSO_4$, до в 1000 разів у порівнянні з процесом без впливу ультразвукових частот. Зайвий вміст n -гідратів в розчинах травильних ванн БТА прискорює процес старіння розчину. Також використовують поляриметри, що вимірюють кут повороту поляризації еталонного випромінювання після проходження через оптичну кювету з аналізуємим розчином. Але вони мають відносно низьку чутливість, яка істотно залежить від амплітуди світлового сигналу (інтенсивності джерела випромінювання, прозорості досліджуваного розчину, оптичних характеристик кювети) [60].

Утворення побічних продуктів ТП, що впливають на процес ідентифікації ТР має особливості. Речовина, відповідна формулі $FeSO_4$, утворюється як побічний продукт ТП, і присутня в ТР у вигляді компонент – з'єднань [61], різних за кольором залежно від температури утворення – T_f , (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1

Характеристики n - гідратів сульфату заліза

Формула сполуки	Колір кристала	$T_f, ^\circ C$	Y_{LR} , RGB-оцінка яскравості	LR-інтервал RGB-коду кольору сполуки		
				R_{L-R}	G_{L-R}	B_{L-R}
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Блакитно-зелений	-1,82÷56,8	119,742÷163,43	81÷145	147÷183	81÷111
$FeSO_4 \cdot 4H_2O$	Зелений	56,8÷64	80,671÷85,08	0÷2	125÷128	64÷82
$FeSO_4 \cdot H_2O$	Прозоро-білий	≥ 64	245÷255	245÷255	245÷255	245÷255

Кристалогідрати сульфатів заліза (III) виду $Fe_2(SO_4)_3 \cdot n \cdot H_2O$, де $n=12, 10, 9, 7, 6, 3$ утворюють світло-жовтий фон травильного розчину. З таблиці 2.1 видно, що кольори мультігідратів детерміновані, тобто класи чітко визначені в RGB-просторі.

На ефективність роботи БТА, при постійних значеннях температур і швидкості циркуляційного прокачування ГР, впливає зміна його концентрації Δ_C . Зміни концентрації компонентів Δ_C в розчинах є впливовим збурюючим фактором для ТП. Проблему невизначеності стохастичних потреб ТП в $\Delta_C(t)$ та логічне правило керування (ЛПК) концентрацією в ГР в залежності від потреб розглянуто в [32, 62].

Для обліку речовини $FeSO_4 \cdot n \cdot H_2O$, який є прозоро-білим за кольором у файлі фотозображення дози розчину, запропоновано здійснювати підрахунок пікселів на тлі, відмінному від білого. Формулу перерахунку колірних атрибутів пікселів за компонентом яскравості наведено в [63]:

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B, \quad (2.7)$$

де Y - яскравість в відтінках сірого кольору; R, G, B - колірні діапазони $[0 \div 255]$.

Динамічний процес травління сталі можна охарактеризувати монотонною функцією часу концентрації мультігідратів, не регресною на відрізок $(0; t_0)$, яка залежить від випадкової кількості протравленої окалини і обмеженої зверху величиною $\sup(c(t)) = c_s$ (рис.2.8).

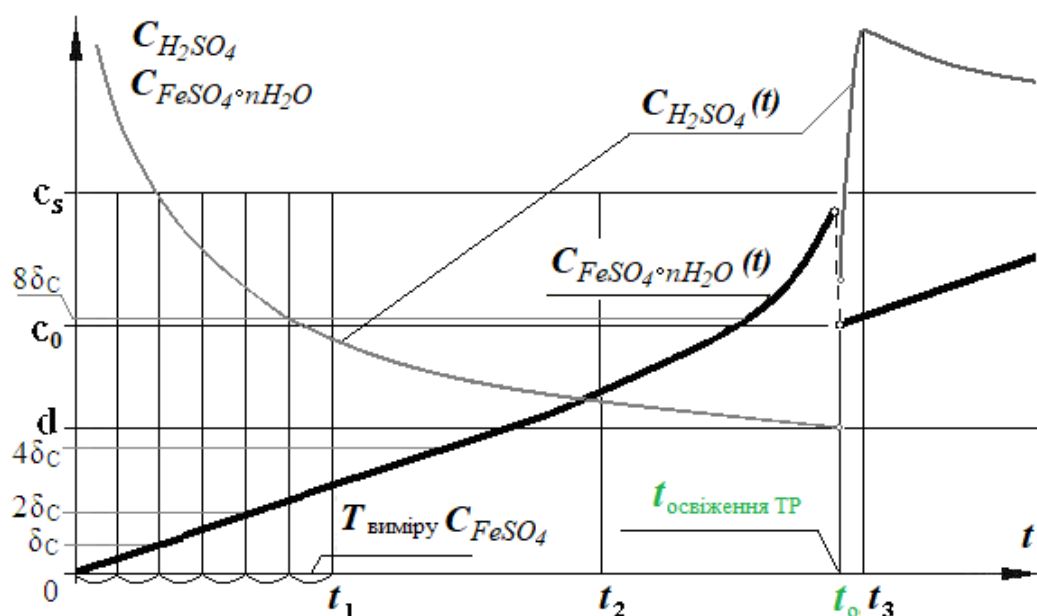


Рисунок 2.8 – Освіження травильного розчину

При досягненні з'єднанням в розчині ГДК $C_{FeSO_4}(t_0) = c_s$ система перестає функціонувати або стає неефективною [64]. На ММК ім. Ілліча, концентрація $FeSO_4 \cdot 1 \cdot H_2O$ обмежена за регламентом $\sup(C_{21}(t)) = 3 \pm 0.5\%$, а сумарна концентрація n -гідратів сульфату заліза в ТР не повинна перевищувати 15%, в залежності від режимного регламенту C, T , відповідних оброблюваному сортаменту сталевому прокату. Причому *присутність n -гідратів сульфату заліза в ТР при високих температурах (особливо – близьких до $99^\circ C$) зменшує час травління окалини.* Керуючий вплив при таких вхідних параметрах – освіження ТР – частина його подається з травильних ванн на регенерацію з заміщенням свіжим розчином до досягнення регламентованої величини $C_{FeSO_4}(t_0) = c_0$.

2.2.2 Нечітка модель ідентифікації мультігідратів в травильному розчині

Моделі ідентифікації концентрації компонент ТР, запропоновані в даній роботі, засновані на наступних припущеннях:

- аналізуємий обсяг ТР постійний і заливається на дно кювети аналізатора дозатором з постійними гідродинамічними характеристиками;

- функція $C_{FeSO_4}(t)$ має адитивну природу і монотонно зростає з плином часу.

Фазові переходи компонент ТР виключені, так як температура їх утворення T_f , $^\circ C$ нижче температури ТП;

- часова динаміка підвищення концентрації компонент в ТР не впливає на процес класифікації (вимірювання) в будь-який з моментів вимірювань з істотною періодичністю ($T_{виміру} = 45$ хвилин, згідно регламенту ТП).

Редукція розмірності MISO-моделі і перехід до стаціонарної статичної SISO-моделі були здійснені шляхом виключення незначущих змінних [65].

Пропонований КТЗ імплементується у ділянку контролю параметрів ТР в наступному составі:

- джерело випромінювання постійного каліброваного спектру, що залежить від оптичних властивостей компонентів розчину, що розміщується під кюветою;

- оптична кювета для розчину, що автоматично промивається перед кожним вимірюванням із заданим періодом $T_{виміру}$;

– дозатори;

– цифровий фоторегістратор-аналізатор на 6 млн.пикселей FESTO SBOC-Q (з матрицею 1280 x 1024 пікселів, швидкість зйомки 150 кадрів / с) з каналом передачі даних (USB, RS-485, HDMI), що формує графічні файли зображень травильного розчину в кюветі в форматі .JPG (примір наведено на рис.2.9).



Рисунок 2.9 – Інтерфейс системи комп'ютерного аналізу травильного розчину

Система комп'ютерного розпізнавання зображень за RGB-кодом обробляє переданий файл підсумковуючи пікселя одного класу за ознакою кольору [64, 66, 67]. Вона призначена для автоматичного аналізу зображень, класифікації кожного пікселя зображення на 4 об'єкти ($FeSO_4 \cdot 7 \cdot H_2O$, $FeSO_4 \cdot 4 \cdot H_2O$, $FeSO_4 \cdot 1 \cdot H_2O$, розчин-фон) і розрахунку за займаною площею: об'ємної частки об'єктів аналізу в %, масової частки об'єктів аналізу в %, поверхні на одиницю об'єму, cm^2 / cm^3 .

Кожному зображенню, що характеризує стан ТР з наявністю певних кількостей n -гідратів сульфату заліза, відповідає певна кількісна оцінка ΔV_k наявності k -того гідрату. Ця оцінка визначається площею відповідного фрагменту зображення, що підраховується за кількістю пікселів (для інтервалу RGB-коду кольору):

$$\Delta V_k = S_k \times V_k (RGB), \quad (2.8)$$

де V_k – індикативна булева змінна зі значеннями 0 або 1, що описує належність пікселя k -го кластеру кольору відповідно LR-інтервалу RGB-коду кольору (табл.2.1), S_k – число пікселів, що потрапляють в k -й кластер кольору, яке визначається результатами аналізу файлу зображення системою-класифікатором.

Система може послідовно аналізувати до 256 зображень, запам'ятовувати їх в окремій таблиці і представляти накопичені дані (якщо їх більше 5) у формі графіків дисперсії. Система має можливість налаштування еталонів кольорів, навчається у реальному часі та є відкритою: в процесі навчання доповнюється множинами синглетонів та розширює базу правил логічного висновку, що визначає побудову нечіткої нелінгвістичної моделі Мамдані [68]:

$$V_k \rightarrow C_k, \quad (2.9)$$

на базі початково зформованої множини логічних правил [69] виду $R_i : \text{ЯКЩО } (V = v_i) \text{ ТО } (C = c_i)$, де $i = 1, 2, \dots, n$.

Налаштування цієї моделі здійснюється з використанням методу нечіткої кластеризації (Fuzzy Clustering Method) [70]. Витяг даних може відбуватися як безпосередньо в ході ТП, так і в окремих лабораторних експериментах. В обох випадках є обов'язковими одночасні тестові серії вимірювань концентрації компонентів розчину еталонними приладами і методами [60, 61]: титрування, зважування сухого залишку та інші, – з подальшою обробкою набраних статистик.

З урахуванням адитивного зростання значень C і V , кожену серію довільних в загальному випадку вимірювань можна представити як кластер із своїм центром. Формування та налаштування (конфігурація моделі) класифікатора проводиться при наступних припущеннях: k -а сіль явно відноситься до класу на основі кольору; відомі її площа з відносною точністю 1 піксель до 1080 (точність камери) і множина тестованих зразків. Точність вимірювання вхідного параметра дорівнює 0,005%, що дає можливість розрізняти зразки вимірів між кластерами. Функція $C_{FeSO_4 \cdot n \cdot H_2O}(t) = f(V_k(t))$ прийнята одновимірною, монотонною та не убуючою. Вимірювання проводяться через рівні проміжки часу. Налаштування класифікатора засновано на методі k -середніх для одновимірного випадку [66].

Число кластерів в кожній із серії L , що складається з N вимірів, визначають емпірично в залежності від частоти прояву і модальних значень вхідних і вихідних параметрів в серії вимірювань. Кожен елемент вибірки вимірювань входить до найближчого кластеру. Включення елементів до кластерів здійснюється на основі мінімуму декартової відстані.

Медіана (центр) i -го кластера по вхідній координаті v визначається кумулятивно, з урахуванням всіх включених до кластерів елементів відповідно до формули:

$$m_{v_i}(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} v_j(t), \quad i = 1, \dots, L. \quad (2.10)$$

Серія з n вимірювань утворює один кластер. Максимально близький до v_i кластер з центром m_{v_i} визначається відповідно до формули (2.11):

$$MIN(d_{ij}) = \|m_{v_j} - v_i\|, \quad j = 1, \dots, L. \quad (2.11)$$

Подання c_i^* в околиці точки $v_i = v_i \pm \delta$ може бути обчислено з використанням гаусової функції належності відповідно до формули:

$$c_i^*(v_i) = \frac{\sum_{j=1}^n c_j \cdot \exp\left[\frac{-(v_i - v_j)^2}{2\delta_j^2}\right]}{\sum_{j=1}^n \exp\left[\frac{-(v_i - v_j)^2}{2\delta_j^2}\right]} \quad (2.12)$$

де (v_j, c_j) – точки n реальних вимірів, δ_j – налаштовувана величина функції належності j -го кластера, якої зазвичай привласнюють значення:

$$\delta_j = \frac{1}{3} \cdot MIN \|m_{v_j} - v_j\|, \quad \forall v_j \in (m_{v_j} - \varepsilon_j; m_{v_j} + \varepsilon_j), \quad (2.13)$$

де ε – порог інтервалу довіри, в межах якого лежить центр кластера.

Дані вимірювань ущільнюються за методом зважених середніх, заміною їх парами (v_j^*, c_j^*) в 9 точках з інтервалами ε_i , для медіан вхідних і вихідних величин і формуванням $k=3$ кластерів (рис. 2.10).

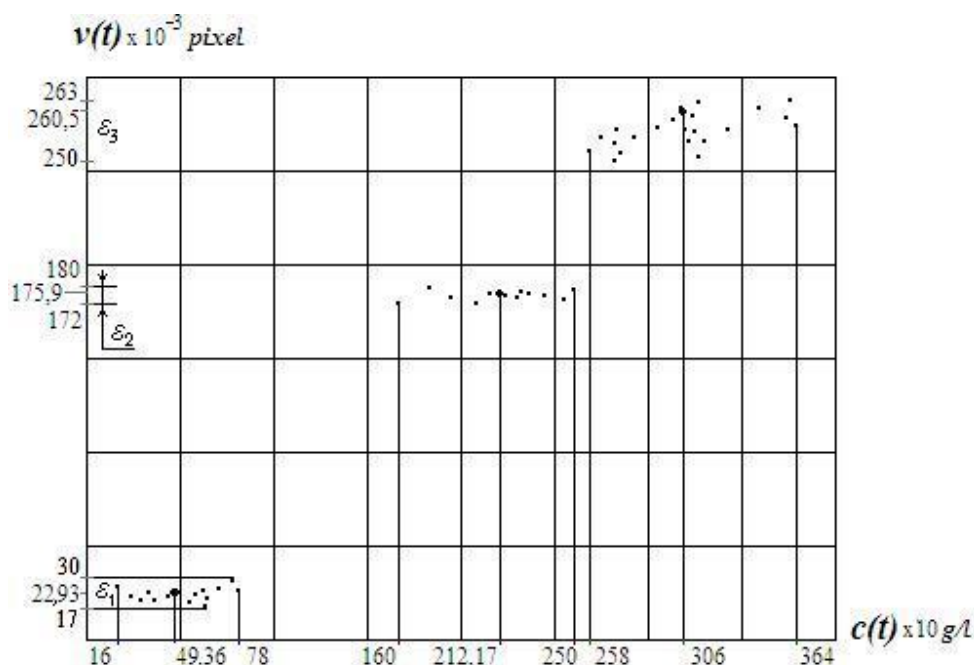


Рисунок 2.10 – Дані вимірювань з вхідними та вихідними медіанами

Три серії вимірювань концентрації $FeSO_4 \cdot 1H_2O$ загальним числом 48 елементів (v_j, c_j) були проведені протягом 24 годин після виходу БТА в температурний режим $T = 88 \div 90^\circ C$. Ущільнені дані представлено в таблиці 2.2. Три початкових центри кластерів встановлюються з усередненими координатами $m_1(0) = (26, 47)$, $m_2(0) = (178, 210)$, $m_3(0) = (255, 313)$. Для кожного елементу P_j розраховується відстань до центрів кластерів і найближчий центр кластера визначається як мінімум d_{ij} (виділено курсивом). Перерозподіл елементів між кластерами не потрібен, відповідно до (2.11) остаточні центри кластерів $m_i(1)$ обчислюються як: $m_1(1) = (25.33, 46.67)$, $m_2(1) = (178, 210.67)$, $m_3(1) = (255.33, 313)$. Розрахунок відстані переміщення кластерів центрів в порівнянні з їх становищем в попередньому циклі кластеризації $(t-1)$ здійснюється за виразом:

$$\Delta m_i(t) = \|m_i(t) - m_i(t-1)\|. \quad (2.14)$$

Таблиця 2.2

Ущільнені дані вимірювань зразків, відстані між P_j та $m_i(1)$

<i>Cluster_i</i>	1			2			3		
P_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V=x_1$	28	22	26	176	178	180	254	250	262
$C=x_2$	16	50	74	175	212	245	273	306	360
d_{1j}	31.06	5.00	27.00	197.19	224.34	250.84	321.03	342.43	392.00
d_{2j}	245.23	223.46	203.96	35.06	2.00	35.06	98.72	120.00	171.92
d_{3j}	373.82	351.37	331.00	159.01	127.00	101.24	40.01	8.60	47.52
$m_i(1) (v,c)$	(25.33,46.67)			(178, 210.67)			(255.33, 313)		

Результати $\Delta m_1 = 0.75$, $\Delta m_2 = 0.67$, $\Delta m_3 = 0.33$, кожне зі значень перевищує порогове значення зміщення центру кластера ($\delta_m = 0.05$).

Якщо мінімальне зміщення Δm_i не задовольняє заданій умові:

$$\min \Delta m_i(t) \leq \delta_m, \quad i = 1, \dots, k, \quad (2.15)$$

тоді здійснюється повернення до розподілу елементів по кластерам. В іншому випадку настроювання центрів кластерів m_i закінчується і здійснюється перехід до наступного кроку. Згідно з таблицею 2.3 отримано наступні значення центрів кластерів: $m_1(2) = (25.33, 46.67)$, $m_2(2) = (178, 210.67)$, $m_3(2) = (255.33, 313)$.

Таблиця 2.3

Відстані між елементами P_j та центрами кластерів $m_i(2)$

<i>Cluster_i</i>	1			2			3		
P_j	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d_{1j}	30.79	4.71	27.34	197.91	225.04	251.51	321.74	343.12	392.67
d_{2j}	245.76	223.94	204.41	35.73	1.33	34.39	98.29	119.46	171.33
d_{3j}	374.02	351.58	331.23	159.18	127.20	101.48	40.02	8.80	47.47
$m_i(2) (v,c)$	(25.33,46.67)			(178, 210.67)			(255.33, 313)		

У нашому випадку умова (2.15) не виконується, тому здійснюється чергова ітерація обрахунку, після чого зсув значень центрів кластерів задовольняє вимогам до точності: $\Delta m_1(2) = 0.0047$, $\Delta m_2(2) = 0.0033$, $\Delta m_3(2) = 0.0033$. З огляду на нерівномірний розподіл центрів кластерів у вхідному просторі доцільно використовувати експоненціальні функції належності, що визначаються як:

$$\mu_{v_i}(x) = \exp\left\{-\frac{(m_i - x)^2}{2\delta_i^2}\right\}, \quad i=1, \dots, k. \quad (2.16)$$

З причини відсутності вимірювань поблизу початку системи координат декларується фіктивний кластер ($m_{v_0} = 0.00$). Значення величини δ_i вибирається рівними третині відстані $|m_i - m_{i+1}|$ у вхідному просторі (згідно з формулою 2.12):

$$\delta_1' = \frac{|0 - 25.33|}{3} = 8.44, \quad \delta_1'' = \frac{|25.33 - 178|}{3} = 50.89, \quad \delta_{2,3} = \frac{|255.33 - 178|}{3} = 25.78, \quad (2.17)$$

Функція (2.16) для 1-го кластера представляється асиметричним Гауссіаном:

$$\mu_{v_1}(v) = \exp\left\{-\frac{(m_1 - v)^2}{2(\omega \cdot \delta_1' + (1 - \omega)\delta_1'')^2}\right\}, \quad (2.18)$$

де $m_1 = m_{v_1} = 25.33$, ω – індикативна булева змінна виду:

$$\omega = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 \leq v \leq m_1 \\ 0 & \text{in other cases} \end{cases}. \quad (2.19)$$

В результаті були отримані проєкції центрів кластерів на вхідний простір V : $m_{v_1} = 25.33$, $m_{v_2} = 178$, $m_{v_3} = 255.33$. Вихідні точкові функції належності визначені в точках $m_{c_1} = 46.67$, $m_{c_2} = 210.67$, $m_{c_3} = 313$. Функції належності вхідних і вихідних параметрів представлені на рис.2.11.

Значення C_G на виході нечіткої моделі, побудованої за допомогою процедури кластеризації, розраховується за формулою (2.20), що об'єднує всі вихідні функції належності та дає можливість інтерполяції $C(V(t))$ [10]:

$$C_G(v) = \frac{46.67 \cdot \mu_{v_1}(v) + 210.67 \cdot \exp\left\{-\frac{(v-178)^2}{664.44}\right\} + 313 \cdot \exp\left\{-\frac{(v-255.33)^2}{664.44}\right\}}{\mu_{v_1}(v) + \exp\left\{-\frac{(v-178)^2}{664.44}\right\} + \exp\left\{-\frac{(v-255.33)^2}{664.44}\right\}}. \quad (2.20)$$

На рисунку 2.11 графічно представлено функції належності вхідного і вихідного параметрів моделі, вихідні функції належності одноточкового типу визначені в точках C_1, C_2, C_3 проєкцій центрів кластерів на вісь $c(t)$.

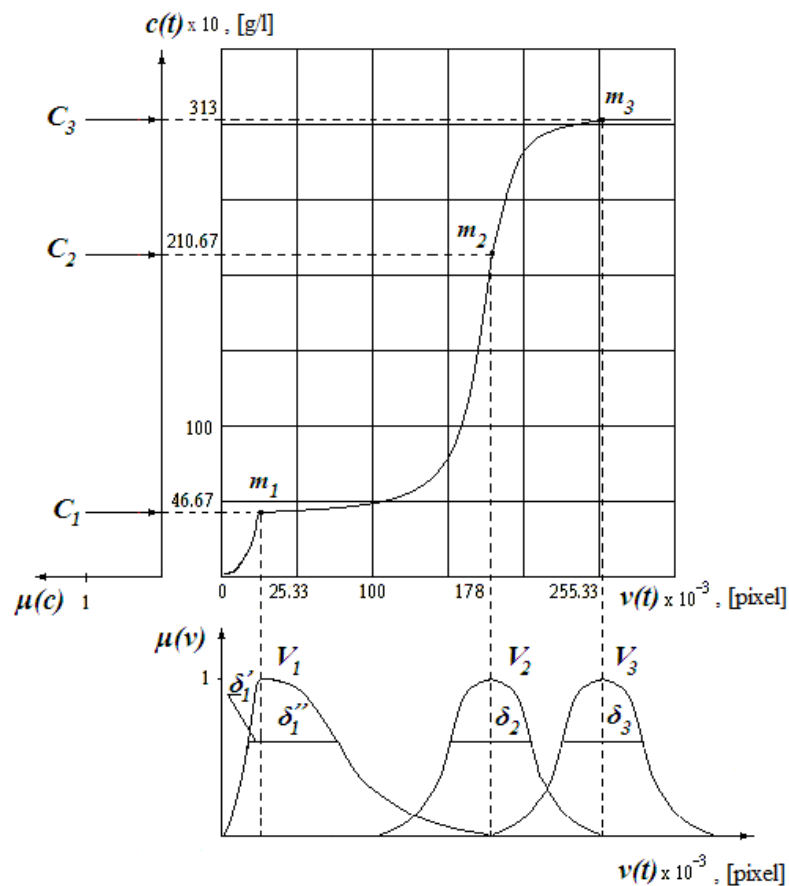


Рисунок 2.11 – Нечітка залежність $c(v)$ підсумкової кластеризації і функції належності

Всередині кластера інтегрована функція (2.20) реалізується за допомогою Гаусових функцій належності FCM-методом (Fuzzy Classifier Means), при цьому V_i і

V_{i-1} приймаються як центри сусідніх класів [70]. Поточне значення $V(t)=x$, що отримується в ході виконання ТП, відносять до i -го класу за критерієм мінімуму Евклідової відстані від оцінюваного об'єкта до центру i -го кластера – V_i .

2.2.3 Нейронечітка модель ідентифікації моногідрату в травильному розчині

Для побудови ідентифікаційних моделей досить поширено використання методу послідовної компенсації максимуму абсолютної помилки (МАЕР - Maximum Absolute Error Points). Слабка зашумленість вимірювань концентрації компонент травильного розчину (а саме – мультігідратів сульфату заліза) досягається шляхом лабораторно приготованого технологічного розчину (суміші) з концентрацією C і задається точністю виміру $\delta_{lab} \ll \delta_C$ багато більшою, ніж необхідно в ТП. Гарантована точність досягається розбиттям вихідного діапазону C на однакові інтервали, що дорівнюють необхідній точності вимірювань δ_C .

Формування моделі здійснюється в ході накопичення експериментальних даних шляхом серійних вимірювань в опорних точках моделі (V_i, C_i) (центрах кластерів) загальною кількістю M з рівномірним кроком дискретизації і областями значень $C_n = ((n-1)\delta_C; n\delta_C)$ [74], де $n=1,2,\dots,M$, де M оцінюється як

$$M = \lceil C_0 / \delta_C \rceil. \quad (2.21)$$

Нечіткі множини C_i , одержувані на виході моделі в ході накопичення даних, замінюються синглетонами (медіанами кластерів), що збігаються з модальними значеннями $C_1 = \delta_C, C_2 = 2\delta_C, C_3 = 3\delta_C, \dots, C_n = \sup(c(t)) = c_0$, формуючи при цьому відношення, інверсне до відношення (2.9):

$$C_k \rightarrow V_k. \quad (2.22)$$

Інтервал $V_{i-1} \leq v_i \leq V_i$ визначає межі кластера по входу.

Базова модель M_0 , побудована з використанням функції ТЕНДЕНЦІЯ пакету Open Office Calc, є найбільш спрощеним узагальненням модельованої системи. Її аналітичний вираз та графічне представлення (рис. 2.12) мають такий вигляд:

$$C_0(V) = 1.18V + 0,09. \quad (2.23)$$

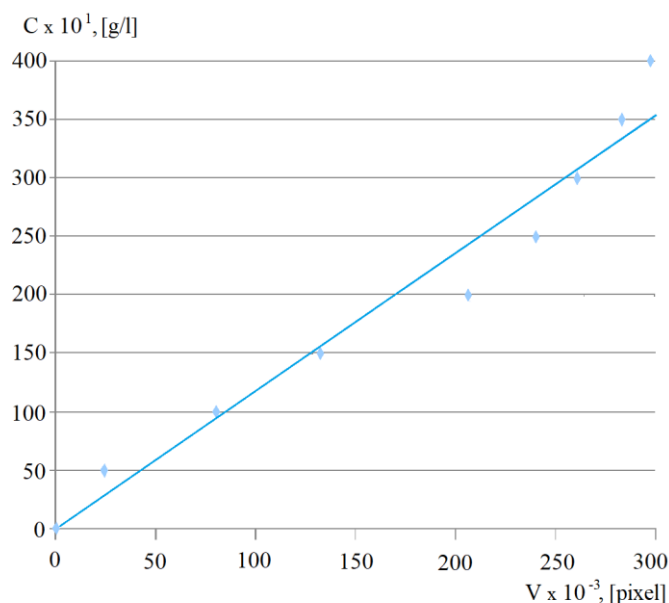


Рисунок 2.12 – Базова модель M_0 нечіткого класифікатора

Поверхню C , що реалізовано моделлю відображення $V_k \rightarrow C_k$, можна представити наступним чином:

$$C = C_0 + E_{0M}, \quad (2.24)$$

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

Використання МАЕР - методу є аналогічним підходу до навчання РБМ із вчителем. В серії вимірювань виділяються точки, в яких величина помилки є максимальною або мінімальною. У цих точках задаються правила виду:

$$R_i : \text{ЯКЩО } (v = V_i) \text{ ТО } (e = E_i). \quad (2.25)$$

Задані правила забезпечують моделювання поверхні помилки E_0 .

На наступному кроці формується поверхня залишкової помилки, що відповідає різниці поверхні помилки базової моделі та поверхні моделі помилки (рис.2.13).

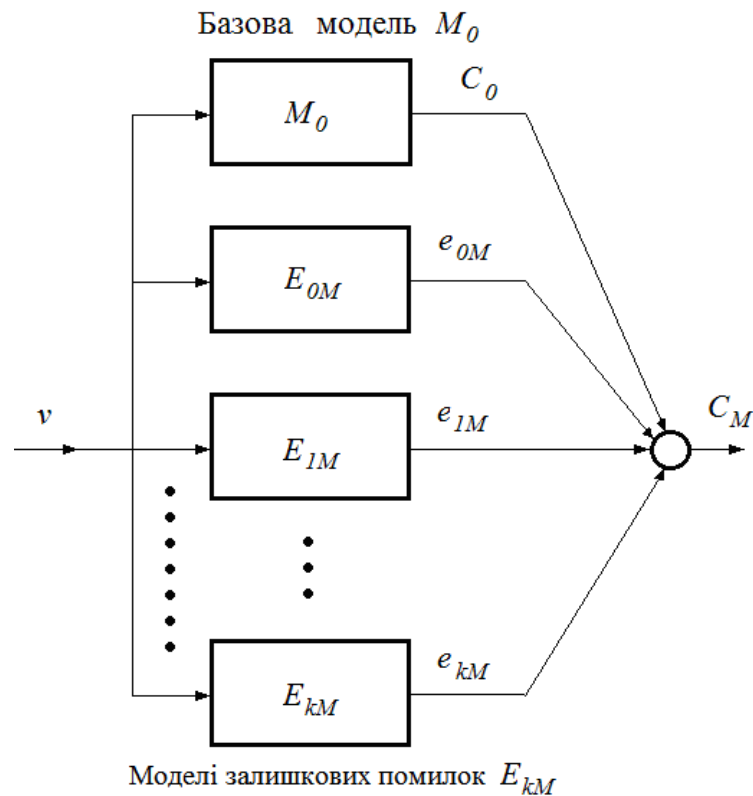


Рисунок 2.13 – Схема поділу глобальної моделі на базову модель і моделі залишкових помилок

Далі оцінюється абсолютне середнє або квадратичне відхилення залишкової помилки та порівнюється з необхідною точністю моделювання. Процес навчання моделі ітераційно триває до досягнення задовільної точності. Поділ глобальної моделі на базову, яка охоплює всю область визначення, і паралельні моделі залишкових помилок, що індивідуально описують екстремуми в локальних областях, істотно знижує число правил.

Удосконалення методу МАЕР полягає в наступному:

- роздільне послідовне усунення помилок мінімуму і максимуму (тобто усунення екстремумів помилок);
- модель помилки на кожному кроку охоплює найбільш широку область вхідного простору, що містить більше потенційних елементів вибірки вимірювань, тобто:

$$E_{0Mi} : \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2} = \max, \{ \forall i | i = 2, \dots, n-1 \} \vee |V_{i+1} - V_i| = \max, i = \{1, \dots, n\} \quad (2.26)$$

– використання для налаштування моделі великих значень δ в гаусових функціях належності, що призводить до перекриття функціями належності примикаючих кластерів та підвищення точності моделі [73].

При моделюванні помилки використовувалася гаусоподібна функція належності виду:

$$\mu(v) = \exp \left[- \left| \frac{v - m}{\delta} \right|^l \right]. \quad (2.27)$$

В моделі помилки E_0 , представленої у вигляді нейронечіткої структури, налаштовуються параметри δ, l, m і форма функції підлаштовується під «піки» і «западини» поверхні M_0 .

У нашому випадку це наочно демонструється в таблиці 2.4 (стовпець $n=5$). В результаті моделювання помилки визначено параметри $\delta=270.9, m=207.0, l=8.0$, а функція E_{0M} набуває вигляду:

$$E_{0Mi}(v) = E_{0i} \exp \left[- \left| \frac{v - 207}{270.9} \right|^8 \right] \quad (2.28)$$

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

Таким чином, нейронечітка модель набуває вигляду:

$$C(v) = 100 \cdot (1,18v + 0,09 + E_{0i} \exp \left[- \left| \frac{v - 207}{270.9} \right|^8 \right]), \quad (2.29)$$

де $i = \{ i \mid \|v - C_i\| \rightarrow \min, i = 1, \dots, n \}$.

Нейронечітку структуру, що здійснює моделювання $C(V)$, наведено на рис 2.14.

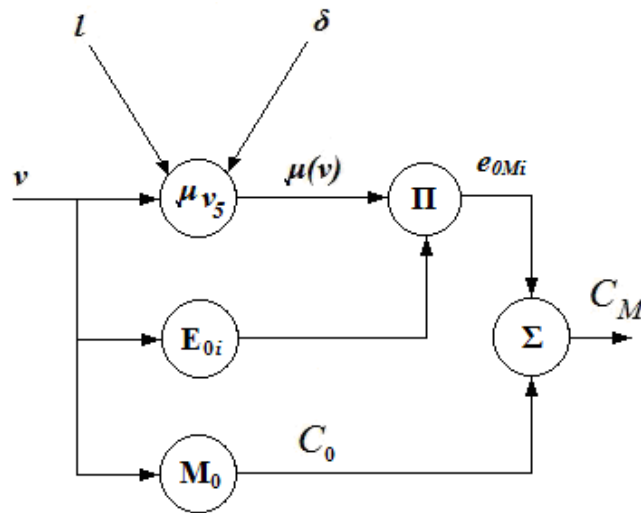


Рисунок 2.14 – Нейронечітка структура, що здійснює моделювання $C(V)$

У двох нижніх рядках таблиці 2.4 наведені результати застосування $C_G(V)$ (формула 2.29) в якості моделі для обробки наведених даних.

Таблиця 2.4

Дані вимірювань значень входу-виходу і помилок моделей

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_n \cdot 10^{-3}$ pixel	0,200	24,200	80,100	132,40	207,00	240,00	260,60	283,00	297,30
$C_n \cdot 10$ g/l	0,400	50,000	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00
$C_{0n}(V)$	0,326	28,646	94,608	156,322	244,350	283,290	307,598	334,030	350,904
$E_{0n}=C_n - C_{0n}$	0,074	21,354	5,392	-6,322	-44,350	-33,290	-7,598	15,970	49,096
E_{0Mn}	0,06594	20,455	5,37951	-6,3218	-44,35	-33,29	-7,5979	15,9694	49,0885
$E_{1Mn}=E_{0n} - E_{0Mn}$	0,00806	0,89849	0,01249	-0,00021	0,00000	0,00000	-0,00002	0,00061	0,00748
$C_G(V_n)$	46,670	46,670	144,225	103,424	271,000	312,594	312,992	312,999	313,000
$E_G = C_n - C_G(V_n)$	-46,270	3,330	-44,225	46,576	-71,000	-62,594	-12,992	37,001	87,000

Середня абсолютна помилка становить $\bar{E}_{0G} = 45,665$, що підтверджує утворення провалів і западин на виході моделі $C_G(V)$. Максимальні абсолютні величини помилки наведені в табл.2.4 (стовпчики $n = 5$, $n = 9$).

Середня ж абсолютна помилка представленої МАЕР-моделі ідентифікації моногідрату сульфату заліза становить $\bar{E}_{1Mn} = 0,103041$ при матриці в 6×10^6 пікселів, що

задовольняє вимогам до її точності (0,2 г / л), що обумовлює застосування моделі в системі інтелектуального керування ТП.

Представлена процедура базується на підході, описаному в [70]. Застосування даного підходу також є можливим до одночасного урахування всіх видів мультігідратів з таблиці 2.1. Можливість об'єднання декількох видів в один клас за оцінками RGB-коду спростить загальну процедуру оцінювання.

При побудові аналогічних залежностей для всіх компонент ТР можливе здійснення оперативного контролю ГДК солей і непрямого оперативного контролю концентрації ТР (C_s) при стехіометричному перерахунку маси SO_4 групи в складі n -гідратів $FeSO_4$. За відсутності прийнятної кількості експериментальних вибірок вимірювань ця задача не вирішувалася. Відзначимо, що модель (2.29) відноситься до однопараметричних однозначних моделей Мамдані.

Можливий розвиток методу було запропоновано в [52]. Для визначення кластера, в який потрапляє оперативне значення $V(t)$, може бути використано метод прямого дихотомічного пошуку (ДП). ДП на впорядкованому масиві даних є найпростішим однопараметричним методом безумовної оптимізації. Він широко застосовується для вирішення вимірювальних завдань в ТП.

У загальному випадку, оперативність ідентифікації поточного значення $V(t)$ при початковій рівномірній організації класів загальною кількістю M (з областями значень $C_n = ((n-1)\delta_c; n\delta_c)$, де $n=1,2,\dots,M$, оцінюється максимальним числом операцій прямого порівняння $M = \lceil C_0 / \delta_c \rceil$, тоді як для ДП цей показник буде $\lceil \log_2 M \rceil$.

В основі лежить підхід формування бінарних еталонів зображень виготовленого в лабораторії технологічного розчину в точках моделі (V_i, C_i) зі значеннями концентрацій потрібної компоненти $C_1 = \delta_c, C_2 = 2\delta_c, C_3 = 4\delta_c, C_4 = 8\delta_c, \dots, C_n = \sup(c(t)) = c_0$, де межі класів (рис. 2.8) визначаються наступним чином:

$$C_{n-1} < C_n \leq 2^{n-1} \cdot \delta_c. \quad (2.30)$$

Бінарна організація бази еталонів забезпечує мінімізацію кількості еталонів-класів, за допомогою яких можна оперативно оцінювати концентрацію компонент розчинів з необхідною точністю δ_c , використовуючи відображення $\Delta V \rightarrow \Delta C$.

Аддитивно-різностна комбінація еталонів дозволяє сформувати будь-яке значення на відрізку $(0; C_0)$ з точністю δ_C . Бінарне подання поточного значення C з необхідною точністю δ_C на монотонній функції $C(t)$ дозволяє відносити поточне значення $V(t)$ до i -го відкритого класу, що формується підбором комбінації з наявних двоїчних еталонів:

$$V_{i-1} \leq V(t) \leq V_i, \quad (2.31)$$

$$C_i - C_{i-1} = \delta_C. \quad (2.32)$$

Представлений МАЕР - підхід є універсальним, досить простим в реалізації для окремих ТП, і дозволяє нечітко визначати концентрацію компонент технологічних розчинів з задаваною точністю при недостатній кількості елементів експериментальної матриці лабораторних вимірювань і номінальній кластеризації вхідного простору за допомогою нейронечіткої структури. Отримані залежності можуть бути використані для розробки програмного забезпечення конвертера вимірюваних фізичних властивостей компонент розчину (колір, площа) в дані про концентрацію цих компонент. При комплексному експерименті по перерахунку масового залишку активного незв'язаного ТР і моделюванні інших його вільних компонент можливе створення інтелектуального автоматичного титрометра, у вигляді мікроконтроллерной вимірювальної системи з метою підвищення ступеня автоматизації вимірювань в ТП.

2.3 Інтелектуальна модель ідентифікації дефектів поверхні прокату

Утворені дефекти смуги за фізико-механічними властивостями залежать головним чином від термічних режимів при охолодженні рулонів. Незначна товщина, крихкість і висока твердість складових частин окалини і міцне зчеплення шарів сильно ускладнюють виміри окалини. Кількість і склад окалини змінюються в залежності від локалізації по поверхні всієї довжини рулону, умов і часу його рулонування та охолодження і є фактором невизначеності ТП.

Товщину шару оксидної плівки та якісний склад окалини в силу складності їх прямих вимірів слід враховувати як фактори невизначеності ТП що впливають на швидкість травління та створюють побічні ефекти. Поверхня рулону прокату перед процесом травління багат шарова (рис. 1.3). Класифікація дефектів сталеві смуги, які утворюють оксидні плівки різних кольорів на рулоні металевого прокату (табл.1), вирішена шляхом побудови нечітких LR-інтервалів оцінок товщини дефекту [32, 72].

Причому оцінка, що належить нечіткому LR-інтервалу $\delta_n = [D_n - c_n; D_n + c_n]$, залежить від величини вимірюваного параметру – його кольору $\delta_n(RGB)$. В [72] були формалізовані логічні правила керування температурою та концентрацією ТР при травлінні систематичних дефектів у вигляді смуг окалини різної товщини і відтінків сірого кольору по краях рулону, і смуги оксидних плівок по його центру.

Ідентифікацію відтінку несистемних дефектів (НД) з метою скорочення часу обробки також запропоновано здійснювати за обчислюваною за формулою (2.7) компонентою яскравості Y – таблиця 2.5.

Таблиця 2.5

Колірний класифікатор товщин несистемних дефектів

	$X_m =$ Колір дефекту	δ_n , мк	Y	Y_n^m
1	Матовий алюміній	0,1÷0,4	227÷231	229
2	Блідо-голубий	5÷10	218÷226	223
3	Світло-сірий	13÷15	200÷217	209
4	Сірий	14÷25	189÷206	198
5	Темно-сірий	24÷36	137÷148	142
6	Темно-сірий матовий	38÷32	45÷ 2	67
7	Майже чорний	34÷40	3 ÷ 39	21

Локалізований за початковими координатами (x,y) несистемний дефект можна нечітко описати за допомогою функції належності $\pi_n(X_m)$ – з областю значень на інтервалі $[0,1]$. Функція $\pi_n(X_m)$ визначає ступінь можливості віднесення m – го дефекту до n – го класу за значенням ознаки, що характеризує закономірності прояву значень параметра – товщини дефекту δ_n , що лежить в нечіткому LR-інтервалі $\delta_n = [D_n - c_n; D_n + c_n]$ в залежності від оцінки кольору X_m дефекту [73].

В [74] представлено ТП з оптичною ідентифікацією дефектів. Вхідна ідентифікація дефектів (координати (x,y) та колірні RGB-оцінки) дає можливість нечітко визначити величини завдання тиску подачі ТР $P_t^* = f(\delta_n)$ до форсунок попереднього зрошення дефектів на дефектні області сталевोї смуги. Тому точність та оперативність ідентифікації δ_n становить важливу задачу в ТП.

На цей час для оперативних вимірювань δ_n користуються або класичними громіздкими математичними моделями [75], що суттєво збільшує час оцінки, або високочастотними індукційними пристроями [76]. Проблема оперативних вимірювань δ_n високочастотними індукційними методами полягає в тому, що застосування ультразвукових сенсорів може призвести до непрогнозованої появи центрів кристаллоутворення n -гідратів $FeSO_4$. Зайва ж присутність муьтгідратів сульфату заліза в розчинах травильних ванн БТА прискорює процес старіння ТР, знижує його якість, тим самим зменшуючи ефективність ТП і порушуючи його регламент і режим. Закономірності кристаллоутворення n -гідратів $FeSO_4$ під впливом звукових волн в літературі не висвітлені, систематизовані експериментальні дані про побічний вплив на ТП відсутні.

На основі нелінгвістичної нечіткої моделі Мамдані $\delta(x, y, Y)$ (рис.2.15) була побудована РБМ із структурою 3-28-1.

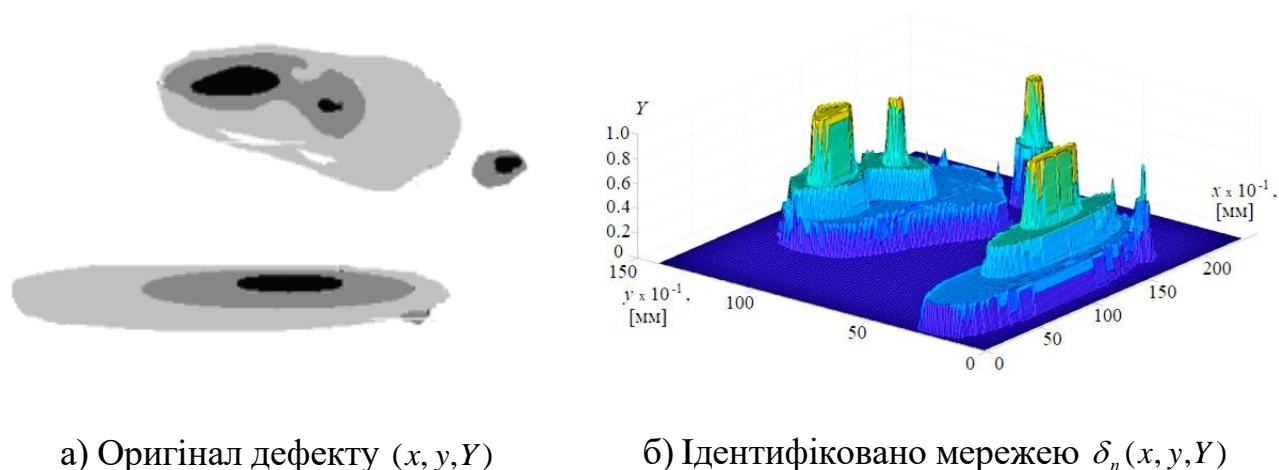


Рисунок 2.15 – Подання ідентифікованої поверхні дефекту

У якості функцій активації нейронів в прихованому шарі використовувалися Гауссіани, а в вихідному шарі – функція гіперболічного тангенсу. Налаштування мережі здійснювалася на підставі 1200 суттєвих точок (x, y, Y) , необхідна точність задавалася на рівні $1.5 \cdot 10^{-3}$. Для навчання мережі використовувався алгоритм зворотного поширення помилки (ЗП).

З огляду на концентрично-еліптичну форму НД на поверхні смуги, обумовлену фізичною природою їх утворення, для визначення $\delta_n(x, y, Y)$ було запропоновано метод оптичної ідентифікації координат [77] та кольору дефектів сталевих смуги на вході / виході в БТА, який в подальшому ліг в основу критерію оцінювання якості вихідної продукції. Також для підвищення якості ТП було запропоновано попереднє зрошення дефектів травильним розчином крізь систему сопел-форсунок. Сопло є співвісним конічним дифузором з ламінарним законом перепаду тиску TP на початку гідродинамічної ділянки всередині каналу, але нелінійним турбулентним законом на виході з сопла [78] і параметризація моделі $P_t^* = f(\delta_n)$ аналітичними методами становить досить складну задачу. Тому ідентифікація δ_n дозволить сформулювати адекватну ШНМ-модель $P_t^* = f(\delta_n)$ з точнішими оцінками параметра P_t .

2.4 Нейромережева модель ідентифікації кута повороту клапану регулювання подачі теплоносія

Завдання точної стабілізації температури TP вирішується шляхом керування дебетом подачі теплоносія з нелінійно змінюючимися параметрами. Цей процес відпрацьовує електропривід (ЕП) регулюючого клапану подачі, що також має нелінійну пропускну характеристику дебету K_v (м³/год), що залежить від ступеня «відкритості» регулюючого клапану – кута повороту φ° дискового поворотного затвору (ДПЗ). Величина K_v забезпечує потреби витрат теплоносія $G_H(t)$. Нерівномірність споживання теплової енергії ТП в кожний дискретний момент часу вносить ще більшу нестабільність в процес підтримки температури TP . Тому визначення необхідної величини $\varphi(K_v)$ є ключовим завданням для керування температурою розчину.

Однак, ДПЗ має істотний недолік, обумовлений конструкцією, що впливає на якість роботи. При його використанні в автоматичному керуванні витратою потоку теплоносія, на окремих ділянках відрізка $\varphi = (0^\circ; 90^\circ)$ нелінійна залежність кута повороту ДПЗ φ від Kv ($\text{м}^3/\text{ч}$) – динамічної характеристики потоку $\varphi(Kv)$, проявляється нерівномірно [79]. Уточнення оцінки параметра $\varphi(Kv)$ засноване на FCM-методі кластеризації динамічної характеристики Kv ($\text{м}^3/\text{ч}$) від кута повороту ДПЗ - φ . Для подолання нелінійної залежності $\varphi(Kv)$ область визначення $\varphi = (0^\circ; 90^\circ)$ розділяється на n нерівних підобластей-кластерів з центрами-медіанами, що призначаються в точках з відомими характеристиками (φ_n, Kv_n) . Графіки, побудовані за матеріалами виробника (Danfoss), представлено на рис.2.16.

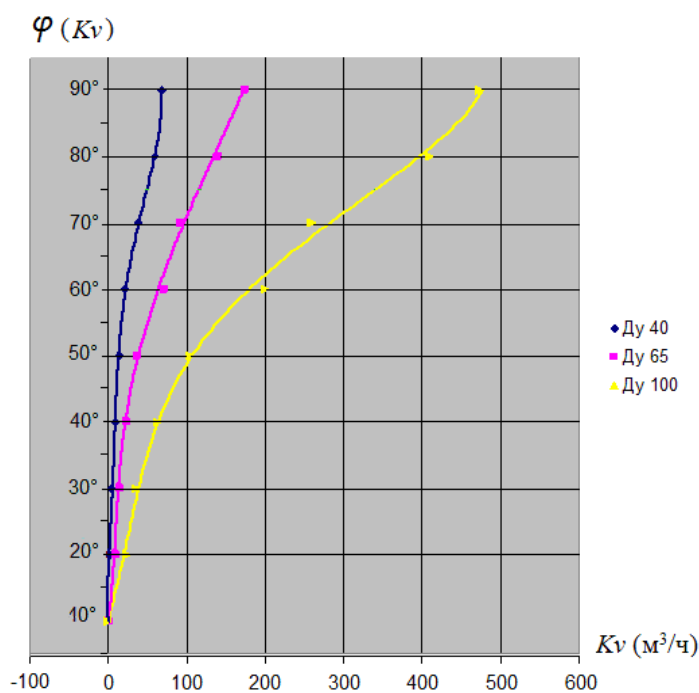


Рисунок 2.16 – Поточкові характеристики ДПЗ різних діаметрів

Інтерполяція всередині класу, для підвищення точності оцінки параметра $\varphi(Kv)$, здійснюється за допомогою функцій приналежності (Гаусіанами) FCM-методом (Fuzzy Classifier Means). При цьому Kv_i і Kv_{i-1} приймаються як центри сусідніх кластерів. Поточні потреби витрат теплоносія $G_H(t) = x$ відносять до i -го класу за критерієм мінімуму Евклідової відстані від оцінюваного об'єкта до центру i -го кластера Kv_i :

$$\min d_{ij} = \|x_j - Kv_i\| = \sqrt{\sum_{l=1}^n (Kv_{l,i} - x_{l,j})^2}, \quad (2.33)$$

де Kv_i – координата центру кластера щодо осі OX_l в просторі X_n ;

x_j – координата класифікуємого об'єкта щодо осі OX_l в просторі X_n .

Подання φ_i^* в околиці точки $Kv_i = Kv_i \pm \delta$ з використанням функції належності Гауса має вигляд:

$$\varphi_i^*(Kv_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j \cdot \mu_j}{\sum_{j=1}^n \mu_j}, \quad \text{де } \mu_j = \exp\left[\frac{-(Kv_i - Kv_j)^2}{2\delta_j^2}\right] \quad (2.34)$$

де (Kv_j, φ_j) – точки реально відомих n значень, центри кластерів;

δ_j – відхилення функції належності від центру j -го кластеру, що настроюється.

Величині δ зазвичай привласнюють значення в інтервалі $\frac{1}{5} \div \frac{1}{3}$ мінімальної відстані до центру найближчого кластера [80].

Для обчислення поточних завдань кута повороту ДПЗ $\varphi_i^*(G_H(t))$ для кожного кластера будуються несиметричні функції належності типу:

$$\mu_{\varphi_i}(G_H(t)) = \exp\left\{-\frac{(Kv_i - G_H(t))^l}{2(\omega \cdot \delta_i + (1-\omega) \cdot \delta_{i-1})^l}\right\}, \quad (2.35)$$

де $i=1,2,3,\dots,15$; формально $\delta_0 = 1$.

l – настроюваний статичний показник, що впливає на згладжування функції,

ω – формальна логічна змінна належності до i -го кластеру типу:

$$\omega = \begin{cases} 1, & \text{якщо } Kv_i \leq G_H(t) < Kv_{i-1} \\ 0 & \text{в іншому випадку} \end{cases}. \quad (2.36)$$

Для $i = 1$ область визначення $G_H(t) < 80$, а для $i = 15$ – $G_H(t) > 1.57$, і функція належності має вигляд (параметри в табл. 2.6 виділено сірим):

$$\mu_{\varphi 15}(G_H(t)) = \exp\left\{-\frac{(1.57 - G_H(t))^5}{2 \cdot 0.523^5}\right\}. \quad (2.37)$$

Таблиця 2.6

Параметри моделі ДПЗ DN40

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
l	2	2	2	2	2	2	3	3	3	5	5	5	5	5	5
φ_i	90	87	80	77	70	67	60	56	50	47	40	37	30	20	10
Kv_i	80	67,1	63,3	50,2	37,5	26,9	20,8	19,2	15,4	11,5	9,61	7,69	6,54	3,91	1,570
δ_i	4,3	1,27	4,37	4,23	3,53	2,03	0,53	1,27	1,3	0,63	0,64	0,38	0,88	0,78	0,523

При відомих значеннях $\varphi(t_i)$ і $\varphi(t_{i-1})$, напрямок відпрацювання кута повороту ЕП $A(\Delta\varphi_i)$ визначається знаком відхилення температури ТР T_{11} , вимірної в момент t_i від завдання T_{11}^* :

$$A(\Delta\varphi_i) = \text{sign}(T_{11}^* - T_{11}(t_i)) = \text{sign}(\Delta T_{11}(t_i)). \quad (2.38)$$

Далі формується керуючий вплив, цикл припиняється після досягнення заданої точності регулювання температури ТР $\Delta T_{11} \leq \delta_T$.

У якості функцій активації нейронів в прихованому шарі використовувалися гауссіани, що підсумковують у вихідному шарі. Налаштування мережі здійснювалося на підставі 800 навчальних пар, необхідна точність задавалася на рівні $\delta_T = 0.0015$. При відомих значеннях лінійної швидкості ЕП і кута повороту ДПЗ в попередній момент часу та поточного завдання вирахувати тривалість керуючого впливу для досягнення необхідного кута повороту ДПЗ можна вирахувати.

На основі даних сформованого нечіткого класифікатора кута повороту клапану регулювання подачі теплоносія була синтезована і налаштована нейромережа $\varphi(G)$. Для навчання мережі використовувався алгоритм ЗП. В додатку Б наведено структуру мережі (рис.Б.1) та динаміку її навчання (рис.Б.2).

2.5 Висновки до другого розділу

Найбільш важливими при керуванні ТП є контури підсистем керування температурою травильного розчину та рівнем його кислотності. Вплив температури розчину та вмісту солей $FeSO_4$ в ТР на кінцевий результат роботи БТА є суттєвим: в разі недостатнього рівня кислотності на поверхні прокату залишається окалина, а при надмірному нагріві видаляється шар металу, що призводить до відхилення товщини прокату від заданої. Тому для здійснення етапу ідентифікації в процесі керування БТА в розділі 2 були запропоновані наступні інтелектуальні методи та моделі:

1. Радіально-базисна модель ідентифікації поточного стану параметрів травильного розчину – температури та концентрації складових дозволила адекватно описати технологічний процес безперервного травління смугової сталі в нестационарних умовах функціонування за наявності збурень та невизначеностей.

2. Радіально-базисні мережі ідентифікації стану компонентів травильного розчину, які застосовуючи нечітку кластеризацію та вдосконалений метод максимуму абсолютної помилки, нечітко визначають концентрацію муьтгидратів сульфату заліза у травильному розчині з задаваною точністю, що дозволило автоматизувати процес ідентифікації та оперативного контролю їх вмісту у розчині.

3. Модель, що за кольором визначає товщину шару та якісний склад окалини поверхні прокату удосконалила процес ідентифікації дефектів з використанням нечіткої кластеризації, що дозволило автоматизувати контроль якості.

4. Радіально-базисна модель ідентифікації кута повороту клапану подачі теплоносія для підвищення точності регулювання температури ТР.

Розглянуті вище методи та моделі мають задовільну швидкість збіжності, обчислювальну простоту та є придатними для роботи в реальному часі в складі системи керування динамічними об'єктами, такими як безперервний травильний агрегат смугової сталі. У зв'язку з цим є доцільним використати їх для синтезу деяких контурів системи інтелектуального керування процесом травління сталі.

Список використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [52-80]. Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [52-56, 62, 64, 69, 72,73].

3 ЦИФРОВЕ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ БТА

У третьому розділі запропоновано та досліджено методи застосування нейромережових моделей в контурах регулювання основних параметрів процесу: температури та концентрації сірчаної кислоти в ТР для підтримки рівня його активності. Також представлено підхід до нейронечіткого регулювання тиску ТР в соплах попереднього зрошування для підвищення якості кінцевого продукту та зменшення витрат на виробництво.

3.1 Особливості керування споживанням теплової енергії в БТА

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.

Для досягнення якісного травління, температури розчину T в кожній травильній ванні повинні постійно підтримуватися на такому рівні, щоб заданий регламентом показник швидкості (часу) травління t_p був постійним. Визначення оптимальних температур ТР залежить від сортаменту і якості смуги прокату, умов ведення процесу, і швидкості втрати активності ТР за рахунок падіння концентрації ТР при травлінні дефектів, кількість яких є випадковою величиною.

Швидкість травління сталевих смуги – t_p в ТР нелінійно пов'язана з керованими параметрами ТП (T – температурою розчину, C – концентрацією травильного розчину сірчаної кислоти), та некерованим параметром концентрації мультигідратів сульфату заліза C_n . Згідно з відомим рівнянням Арреніуса, модифікованим до даної задачі, динамічний зв'язок керованих параметрів можна представити наступним чином:

$$\ln \frac{C(t_{n+1})_{H_2SO_4}}{C(t_n)_{H_2SO_4}} = A \cdot e^{-((E_a + \Delta E_T)/RT) \cdot \Delta t} \quad , \quad (3.1)$$

де $C(t_{n+1})_{H_2SO_4}$ – концентрація сірчаної кислоти в ванні по завершенню травління на момент часу t_{n+1} через час проходження смугою ванни;

$C(t_n)_{H_2SO_4}$ – початкова концентрація кислоти на момент часу t_n ;

A – множник в рівнянні Арреніуса;

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

ΔE_T – частина теплової енергії Q , що передається ТР та стабілізує швидкість травління – t_P ;

R – універсальна газова константа;

T – температура ТР (°К);

$\Delta t = t_{n+1} - t_n$ – час/тривалість/ травління.

Окрім ΔE_T у рівнянні може бути присутньою енергія імпульсу гідравлічного потоку ТР з сопла попереднього зрошення ΔE_I (підрозділ 3.2). Найбільш значущою керованою змінною при травлінні є температура ТР – T , на яку прямо впливає керована величина $\Delta E_T \rightarrow T$. Наступним параметром за рівнем впливу на ТП є концентрація компонентів ТР. Концентрація мультигідратів сульфату заліза C_n в першу чергу є обмежуючим фактором часу життя ТР до повної або часткової заміни (освіження), але також як і прискорювач ТП за умови $C_n \leq 15\%$.

Також критеріями ефективності роботи БТА є швидкість реакції системи на коливання попиту теплоносія, питома енергоємність і якість регулювання ТП. БТА з точки зору енергоспоживання є складним циклічним графом транспортування теплоносія до споживачів [41].

Спрощено нагрів ТР може бути представлений типовою MRP-II (Manufacturing Resource Planning) задачею поповнення запасів теплової енергії Q [81]. Поповнення теплової енергії здійснюється за рахунок подачі певної кількості стабілізованої пари на теплообмінник, що компенсує витрати ТП $Q_V \leq 0.9$ Мкал за 1с – 3.765МВт. Споживання теплової енергії в сталому режимі є умовно постійною величиною (наприклад для 1-ї ванни $Q_C \approx 0.691$ Мкал за 1с – 2.893МВт), що належить нечіткому інтервалу [32], межі якого обумовлені температурою сталевих смуги на вході в БТА, винесенням нагрітого ТР із сталевих смуг та випаровуванням нагрітого ТР з БТА. Додаткові витрати враховують необхідність температурної підтримки активності ТР, також для реального процесу обов'язкова умова $\frac{dQ}{dt} \geq Q_V(t) - Q_C(t) - Q_{RV}(t)$, де $Q_{RV}(t)$ є монотонно зростаючою функцією часу і обмежена нечітким інтервалом

$0 \leq Q_{RV} \leq 0.02 \cdot Q_C$ з одного боку. З іншого боку випадкова величина потреб теплової енергії Q_{RV} залежить від кількості окалини, що вступила в реакцію і зменшила концентрацію (активність) ТР.

$$\frac{dQ}{dt} = Q_V(t) - Q_C(t) - Q_{RV}(t). \quad (3.2)$$

За даними обстежень (дані для 1-ї ванни) реакція травління спричиняє зниження концентрації ТР, встановленої для 1-ї ванни в інтервалі з 12% до 8% протягом 4-годинного циклу (14400с) до освіження розчину за регламентом; догрів розчину на 0.0138 Мкал за 1с – 57.73 кВт компенсує зниження концентрації $C = 2.788 \cdot 10^{-4} \%$ за 1с внаслідок травління окалини та забезпечує стабілізацію швидкості ТП. Основою системи теплоспоживання для кожної ванни БТА є високоефективний керований енергоблок (ВКЕБ). Структуру ВКЕБ наведено на рис.3.1.

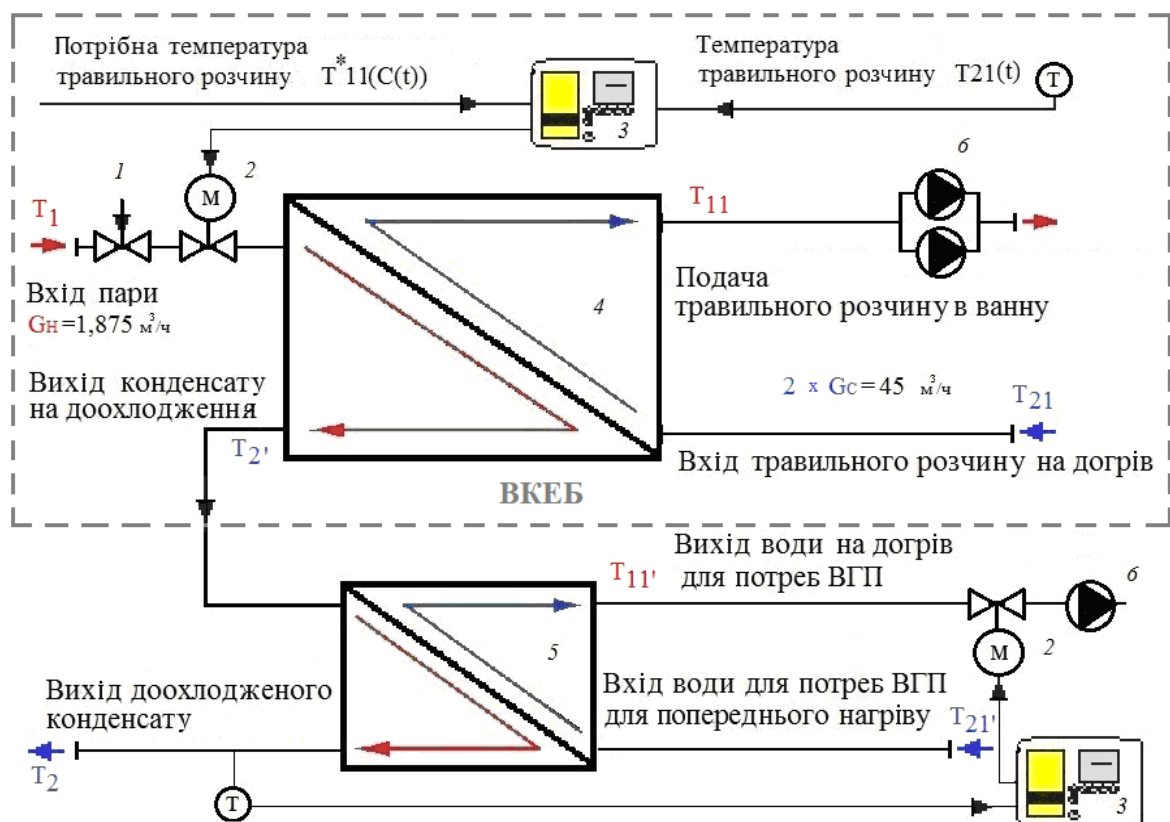


Рисунок 3.1 – Структура високоефективного керованого енергоблоку

На рис. 3.1 позначено: 1 – стабілізатор параметрів вхідної пари-теплоносія; 2 – дисковий поворотний затвор (ДПЗ) подачі теплоносія з електромеханічним сервоприводом; 3 – мікроконтролер регулятора витрати теплової енергії з вимірювачами температури; 4 – пластинчастий теплообмінний апарат (ПТА) нагріву ТР в одній ванні БТА; 5 – теплообмінник-утилізатор залишкової теплової енергії парового конденсату для нагріву води промивки прокату після травління; 6 – насосне обладнання для прокачування ТР з ванни для нагріву в ПТА.

Основою системи керування ВКЕБ є регулятор температури нагріваємого потоку ТР та витрат теплоносія. Всі істотні фактори, що впливають на регулювання ТП БТА, можна поділити на наступні групи [82]:

1. Контрольовані обурення – обурення, які можна виміряти, але неприпустимо змінювати або неможливо стабілізувати. Для досліджуваного процесу такими збуреннями є температура потоку теплоносія (T_1), а також температура (T_{21}).

2. Неконтрольовані обурення – обурення, які неможливо або недоцільно вимірювати безпосередньо (падіння активності розчину, зміна коефіцієнтів тепло- і масопередачі, накип на поверхні пластин теплообмінника, а також характеристики стабілізованої пари, що бере участь в теплообміні).

3. Вихідні змінні, з числа яких вибираються регульовані координати. При побудові замкнених систем регулювання в якості регульованих координат вибирають технологічні параметри, зміна яких свідчить про порушення матеріального або теплового балансу в апараті. До них в БТА відносяться температури теплоносіїв T_{11} і T_2 , величини витрат теплоносія G_H і мережевої води, що нагрівається на потреби водопостачання гарячої промивки (ВГП).

4. Керуючі змінні – вхідні сигнали об'єкта керування, за допомогою яких можна впливати на режим роботи об'єкта – витрати (G_C) потоку на вході в теплообмінний апарат в випадку регулювання температури ТР.

Введення динамічної компенсації збурень на входах G_H або T_1 є недоцільним, так як передавальні функції теоретичних компенсаторів або фізично неможливо реалізувати, або вони неефективні [83]. Тому на практиці обмежуються статичною компенсацією цих збурень.

Кожна ванна БТА характеризується: максимально допустимим навантаженням на ПТА – Q_{max} і розрахунковим тепловим навантаженням Q_C (Гкал/год), що враховує

постійні втрати тепла на нагрів смуги, вентиляцію ванни і часткове винесення нагрітого ТР; графіком подачі теплоносія (температури T_1 і T_2 , °С); прийнятими як постійні: обсягами теплоносія в контурах подачі - G_H і циркуляції ТР - G_C , та вимогами до $T_{11} = T_{11}^* \pm \delta$ (зазвичай 1°С). На даний час в промисловості експлуатуються точні, але дотатньо складні регулятори витрат теплоносія ВКЕБ, використання яких потребує витрат часу обрахунку [84].

Однією з проблем керування, з якими найчастіше стикаються в теплоенергетиці, є підтримка температури потоку з обмеженнями відхилень від завдання. Для цього використовуються регулятори витрат, які керують потоком [85], що нагріває або охолоджує теплоносій зі швидкістю, яка забезпечує задане значення температури нагріваємого T_{11} або охолоджуваного потоку T_2 , на виході теплообмінників. Такий регулятор (рис.3.1) складається з ДПЗ зі встановленим на ньому електроприводом (ЕП) (поз.2) та контролером керування ДПЗ (поз.3), який позиціонує ДПЗ відповідно до цільового графіку температури ТР і даних датчика. У разі викривлення у якості теплоносія перегрітої води ДПЗ із ЕП – (поз.2) встановлюють на лінії T_2 [86].

Для керування потоком теплоносія використовуються різноманітні регулюючі клапани [87]. Сідельні регулюючі клапани мають точну аналітичну характеристику, що може дати кращі результати керування витратами, але в процесі їх роботи існує момент фазового переходу «пар - вода» [79], що заборонено при застосуванні в ТП графітових теплообмінників нагріву ТР. Найбільш поширеним та надійним є клапан типу «дисковий поворотний затвор» (ДПЗ).

3.2 Безперервний ПІ – регулятор температури травильного розчину

Регулювання температури ТР здійснюють чином регулювання витрат пари, що надходить крізь ДПЗ до ПТА для догріву травильного розчину в ваннах. Систему «регулятор температури ТР ($W_R(s)$) – ДПЗ ($W_a(s)$) – ПТА ($W_p(s)$)» (рис. 3.2) можна описати в термінах класичної теорії керування за допомогою відповідних передавальних функцій [88].

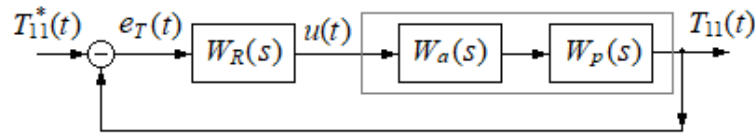


Рисунок 3.2 – Структурна схема автоматичного керування температурою травильного розчину

Система «ПТА–абонент» є ланкою з запізненням, де форма сигналу на вході та виході залишається однією і тією ж та може бути описана трансцендентною передавальною функцією, що відображує структуру і специфіку моделі [88]:

$$\hat{W}_p(s) = k \frac{e^{-\tau \cdot s}}{Ts + 1}, \quad (3.3)$$

де $k=0.99$ – коефіцієнт посилення (втрат) теплопередачі ПТА;

$\tau = V_{ПТА} / G_C = 30 \text{ л} / 12,5 \text{ л/с} = 2,4 \text{ с}$ – час запізнювання, тобто час проходження одиниці ТР, що нагрівається, крізь порожнину ПТА з об'ємом $V_{ПТА} = 30 \text{ л}$ при продуктивності циркуляційного насоса $G_C = 45 \text{ м}^3/\text{ч} = 12,5 \text{ л/с}$,

$T = V_{bath} / G_C = 48000 \text{ л} / 12,5 \text{ л/с} / 2 = 1920 \text{ с}$ – час виходу в температурний режим ванни об'ємом $V_{bath} = 48000 \text{ л}$ при одночасній роботі 2-х насосів.

ДПЗ виступає в якості виконавчого механізму (ВМ), передавальна функція якого є аперіодичною ланкою першого порядку:

$$W_a(s) = \frac{k_n}{T_n s + 1}, \quad (3.4)$$

де T_n – максимальний час встановлення ДПЗ на необхідний кут повороту, k_n – коефіцієнт посилення відпрацювання кута на n -ому відрізку зміни кута.

Відповідно до рівняння матеріально-теплового балансу (МТБ) [89]:

$$Q = G_H \cdot c_{pH} \cdot (T_1 - T_2) = G_C \cdot c_{pC} \cdot (T_{11} - T_{21}), \quad (3.5)$$

де G_H – величина масового потоку, c_{pH} – теплоємність, T_1 і T_2 вхідна та вихідна температури потоку теплоносія, що гріє; величини $G_C, c_{pC}, T_{11}, T_{21}$ характеризують охолоджуючий потік з боку споживача (ванни БТА), Q – величина переданого тепла.

Відгук значення температури ТР до нагріваючого потоку є лінійним:

$$\frac{dT_{11}}{dG_H} = \frac{(T_1 - T_2) \cdot c_{pH}}{G_C \cdot c_{pC}}. \quad (3.6)$$

Збурення вихідної температури ΔT_{11} за умовами (3.5) компенсується величиною ΔG_H , яка залежить від зміни кута повороту $\Delta \varphi$ ° ДПЗ [79]:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta G_H}{\frac{dG_H}{d\varphi}} = \frac{\Delta T_{11}}{\frac{dT_{11}}{d\varphi}} \cdot \frac{G_C \cdot c_{pC}}{c_{pH} \cdot (T_1 - T_2)}. \quad (3.7)$$

Пара є найпоширенішим теплоносієм в промисловості. В процесі конденсації вона віддає приховане тепло потоку, що нагрівається, забезпечуючи теплове навантаження пропорційно потоку пари. Для підвищення температури рідини від T_1 до T_2 шляхом конденсації пари в теплообміннику можна записати:

$$Q = G_S \cdot r = G_C \cdot c_{pC} (T_{11} - T_{21}), \quad (3.8)$$

де G_S – масова витрата пари, r – прихована теплота пари, G_C і c_{pC} – масова витрата і теплоємність ТР, а Q – величина теплопередачі. Відношення керованої температури до потоку пари є лінійним:

$$\frac{dT_{11}}{dG_S} = \frac{r}{G_C \cdot c_{pC}}. \quad (3.9)$$

Похідна витрат пари G_S від кута повороту ДПЗ вимагає запам'ятовування значень кута повороту вала ДПЗ в попередній момент дискретного часу. В даному випадку модель процесу прийнята лінійною і операцію з використанням цієї похідної можна також розглядати як лінеаризацію характеристики ДПЗ. Значення K_V в момент часу t_i має бути рівним $G_S(t_i)$ і обчислюється наступним чином:

$$K_V(t_i) = G_S(t_i) = G_S(t_{i-1}) + \frac{G_C \cdot c_{pC}}{r} \Delta T_{11}(t_i), \quad (3.10)$$

що можна розглядати як найпростішу математичну модель для регулювання та використовувати спільно з більш складними моделями пластинчастих теплообмінників. Як відзначено в розділі 2, ДПЗ мають істотний недолік, обумовлений конструкцією, що впливає на якість керування, а саме – на окремих ділянках відрізка $\varphi = (0^\circ; 90^\circ)$ нелінійна залежність $Kv(\varphi)$ (м³/ч) (динамічна характеристика потоку) проявляється нерівномірно. з рис.2.16 видно, що нелінійність характеристик ДПЗ прогресує зі збільшенням умовного прохідного діаметру (Ду).

При регулюванні потоку теплоносія в теплових мережах було використано адаптивний підхід апроксимації величин робочих характеристик потоку ДПЗ для різних діаметрів [79, 82]. В моделі $Kv(\varphi(t), a, b, c, d)$ коефіцієнти a, b, c, d враховували геометричні особливості ДПЗ і зміну характеристик потоків на різних відрізках $n=2$ діапазонів при поточному $\varphi(t) = x$. Цей підхід адаптивної параметризації дозволив домогтися точності регулювання $T_{11} \pm 2^\circ\text{C}$, що не задовільняло вимогам ТП.

Для збільшення точності було запропоновано наступну модифікацію алгоритму керування кутом повороту ДПЗ. Безперервна функція $\varphi(Kv)$ кусочно лінеаризується на всій області визначення та приблизно описується умовно постійним законом для кожної з $n=7$ підобластей $(Kv_n^{\min}, Kv_n^{\max})$. Прийнято, що з метою зміни витрати теплоносія на величину ΔG_{Hn} , зміна кута «відкритості» ДПЗ $\Delta\varphi_i$ здійснюється за пропорційним законом з коефіцієнтом P_n всередині n -го класу:

$$P_n = \frac{Kv_n - Kv_{n-1}}{\varphi_n - \varphi_{n-1}}. \quad (3.11)$$

Належність $G_H(t_i)$ до n -го класу в момент часу t_i визначається:

$$Kv_{n-1} \leq G_H(t_i) \leq Kv_n, \quad (3.13)$$

і при відомому законі $Kv_n(\varphi)$ всередині підобластей φ_i визначається як:

$$\varphi_i = \frac{G_H(t_i) - Kv_{n-1}}{P_n}, \quad \forall G_H(t_i): Kv_{n-1} \leq G_H(t_i) \leq Kv_n. \quad (3.12)$$

Керуючою змінною регулятора є тривалість і полярність напруги, що подається на ЕП. Це необхідно для поверту осі ДПЗ до заданого кута, щоб забезпечити необхідну кількість теплоносія для виконання температурного завдання. ДПЗ оснащений електроприводом (ЕП) SIEMENS RSM 63/8 F. Згідно з даними виробника [90], ЕП на частоті 50 Гц виконує $N = 375$ обертів за хвилину, тобто 6,25 оберту або 2250 градусів за секунду.

Після понижуючого редуктора ЕП з передавальним числом $K = 1500$ швидкість обертання валу ДПЗ становить $2250/1500 = 1,5$ градуса за секунду. Таким чином поворот ДПЗ на 90 градусів вимагає $90/1,5 = 60$ секунд часу (одна секунда – 50 періодів синусоїди). Точність регулювання кута повороту $\delta_a = 90$ градусів/ $1500 = 0,06$ градуса, що становить $\Delta K_v = 3.2416 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ для однієї лінії циркуляції ТР у ванні крізь ДПЗ DN65 (як усереднений еквівалент зміни величини потоку теплоносія). Поворот ДПЗ [85] на кут $\varphi = 0,06^\circ$ досягається за $0,06 / 1,5 = 40$ мс подачі керуючої напруги (два періоди синусоїди – $2T^U$).

При відомому з попереднього циклу керування значенні φ_{i-1} , відрізок часу відпрацювання регулятором керуючого впливу t_{nr} складатиме:

$$t_{nr} = \frac{K \cdot (\varphi_i - \varphi_{i+1})}{60N}. \quad (3.14)$$

Негативний знак t_{nr} вказує на необхідність зміни полюсів керуючої напруги для повороту ДПЗ в обратному напрямі. В результаті формується вплив, що керує тривалістю включення ЕП з урахуванням рівномірності його кутової швидкості та полюсності напруги для виконання завдання по підтримці температури.

Час затримки відгуку ВКЕБ спрощено оцінюється як:

$$t_{RS} = t_{nr} + \tau, \quad (3.15)$$

де $\tau = 2.4\text{с}$ (згідно технічних характеристик ВКЕБ).

За цей час, з урахуванням лінійності відносини керованої температури до потоку пари (формула 3.6) кількість пари, що не догріє ТР у ванній на величину ΔT_{11} ,

оцінюється виразом:

$$\Delta G_{RS}(t_i) = \frac{t_{RS}}{2T_n} \cdot \frac{G_C \cdot c_{pC}}{r} \Delta T_{11}(t_i), \quad (3.16)$$

де T_n – постійна часу переходу ДПЗ в стан «відкрито» на кут φ_n на n -ому відрізку осі φ . Величина ΔG_{RS} вводиться в якості попереджуючої компенсаційної уставки і, таким чином, завдання для регулятора встановлюється як:

$$\Delta G_{RS}(t_i) = \frac{t_{RS}}{2T_n} \cdot \frac{G_C \cdot c_{pC}}{r} \Delta T_{11}(t_i). \quad (3.17)$$

Коригування відпрацювання кута повороту ДПЗ і перерахунок t_{nr} здійснюються в циклі, починаючи з класифікації належності (3.12), де $G_H(t_i)$ присвоюється значення $G_S(t_i)$ з (3.17). При малому кроці квантування сигналів ($h \ll T$) запропонований підхід, незначно збільшивши перерегулювання, скорочує час входу системи в питомий температурний режим. З огляду на інертність процесу теплообміну, прийняту енергозберігаючу стратегію «недогріву», і нехтуючи часом обробки даних мікроконтролером, визначимо полярність і число періодів синусоїди T^U керуючої напруги, що подається на ЕП регулятора – NS_U :

$$\text{sign}(U) = \text{sign}(t_{nr}), \quad NS_U = \left\lceil \frac{t_{RS}}{T^U} \right\rceil - 1 \cdot \text{sign}(U), \quad (3.18)$$

де $T^U = 20\text{мс}$ – відомий період синусоїди подачі живлення на керований ЕП [83], звідки тривалість подачі керуючої напруги:

$$t_i(U) = NS_U \cdot T^U. \quad (3.19)$$

Після досягнення задаваної точності $\Delta T_{11} \leq \delta_T$ цикл припиняється. Цей підхід дозволив домогтися точності регулювання $T_{11} = \pm 1.5^\circ\text{C}$, що теж не узадовільнило вимоги до ТП.

Коефіцієнти перерегулювання ζ_n для n -ї ванни розраховуються з урахуванням технологічних обмежень і мають такі значення $\zeta_1 = 1.315$, $\zeta_2 = 2.025$, $\zeta_3 = 2.02$, $\zeta_4 = 1.561$. Технічна можливість реалізації подачі теплоносія, з урахуванням обмежень подачі $Q_{\max}^H = 2.95$ Мкал за 1с, і його споживання: випаровування, винесення ТР з ванни – ($Q_n^C = 0,691$ Мкал за $\Delta t = 1$ с для 1-ї ванни) зумовлюють коефіцієнт перерегулювання:

$$\frac{Q_{\max}^H}{Q_n^C} = 4.25. \quad (3.20)$$

Було проведено моделювання безперервної моделі «ПІ-регулятор - ВМ - ОК» в пакеті SIMULINK [91] за схемою, наведеною на рис.3.3.

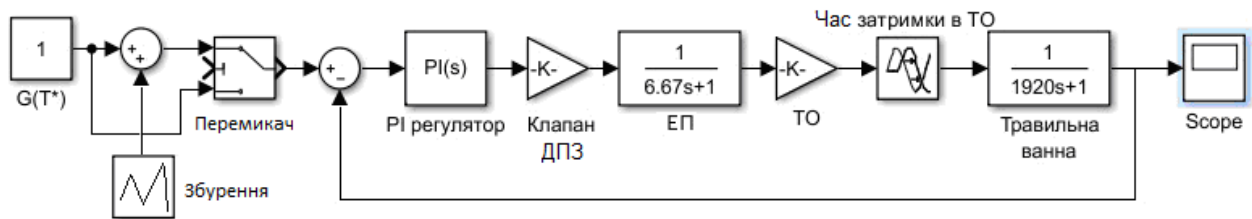


Рисунок 3.3 – Безперервна модель «ПІ-регулятор - ВМ - ОК»

Коливання витрат теплоносія, обумовлено стохастичною кількістю протравленої окалини; постійне підвищення рівня його витрат, пов'язане з зниженням активності ТР і формалізовано як випадкову величину з нульовим математичним очікуванням і дисперсією $\Delta Q_s^C = 0.0134$ Мкал за період моделювання $T = 1$ с. Це відповідає підвищенню температури ТР ($+\Delta 2^\circ\text{C}$) протягом однієї години.

В процесі моделювання отримано та оптимізовано засобом Simulink "PID Tuner" сімейство ПІ-регуляторів: для кожного з $n=7$ інтервалів φ визначено передавальну функцію $W_R(s)$ з оптимальними налаштованими параметрами P , I :

$$W_R(s) = P + \frac{I}{s}, \quad (3.21)$$

які мінімізують час відгуку системи на коливання попиту теплоносія (час виходу в режим) при заданих обмеженнях на перерегулювання. В реальному часі тривалість перехідного процесу відпрацювання керуючого впливу менша модельної, тобто $t_i(U) \leq T_n$, де T_n відповідає установці ДПЗ в необхідний кут φ_n , що належить n -му інтервалу при коефіцієнті перерегулювання для 1-ої ванни $\zeta_1 = 1.315$ (табл. 3.1).

Таблиця 3.1

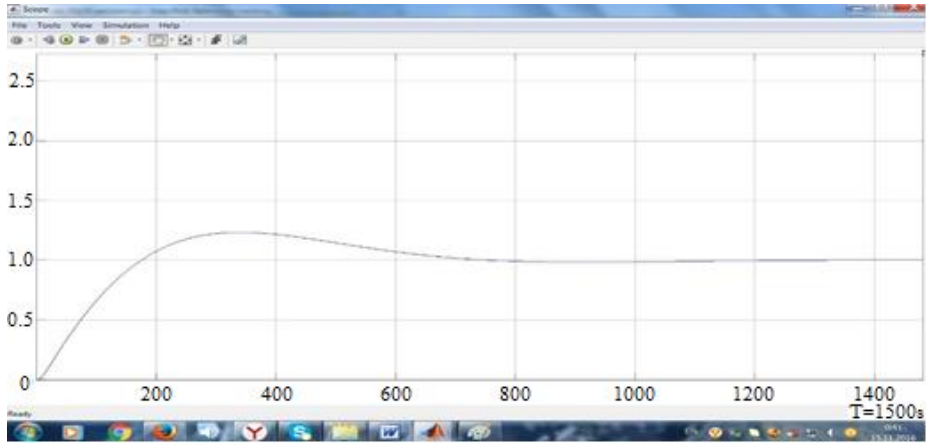
Параметри передавальних функцій ДПЗ DN65 ($\zeta_1 = 1.315$)

n	1	2	3	4	5	6	7
$\varphi_n = a \div b$	0÷30	30÷40	40÷50	50÷60	60÷70	70÷80	80÷90
k_n	0.1	0.142	0.272	0.402	0.49	0.81	1.0
T_n, c	20	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
P	159.3	99.93	54.26	33.58	31.66	19.15	15.52
I	0.8477	0.5128	0.2989	0.1669	0.18	0.1089	0.8822

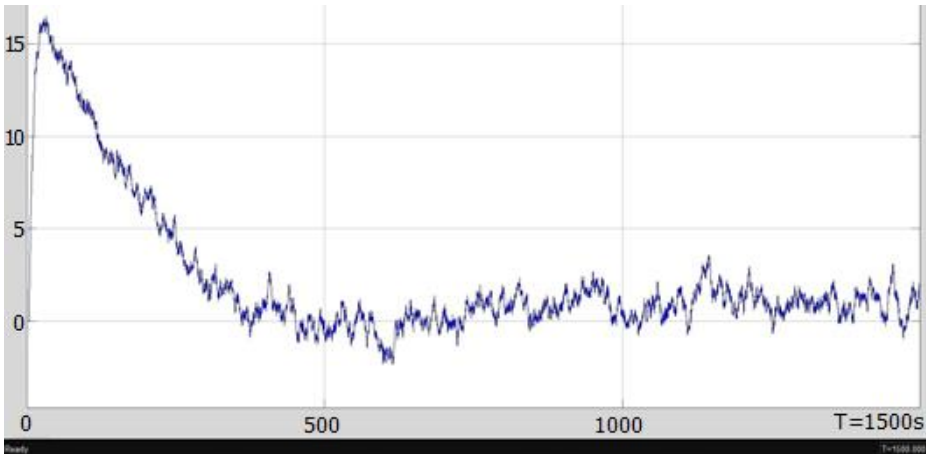
Необхідність синтезу більш чутливого, швидкого та точного цифрового регулятора була зумовлена наступним фактом: безперервний ПІ-регулятор не реагує належним чином на параметричні невизначеності (шуми вимірювань, інерційність, перерегулювання, коливання системи) – рис.3.4.

Адаптивний ПІ-регулятор досяг точності регулювання вихідної температури ($\pm \Delta 1^\circ\text{C}$). При збільшенні числа n класів (табл.3.1) до нескінченності, запропонований алгоритм в сталому режимі ТП реалізує регулятор витрати теплоносія $Kv(t)$ з коефіцієнтами пропорційності P_n , і затримкою $\tau_n = (0; 0.6)$, обумовленою часом обчислень і швидкістю ЕП.

На рис.3.5 представлено регулятор для модального для процесу інтервалу $\varphi \in]70^\circ; 80^\circ]$ з відповідними параметрами $P = 13.2708$ та $I = 0.1081$.



а)



б)

Рисунок 3.4 – Відгук системи з безперервним ПІ-регулятором на одиничний сигнал: (а) – без перешкод та (б) – з перешкодами

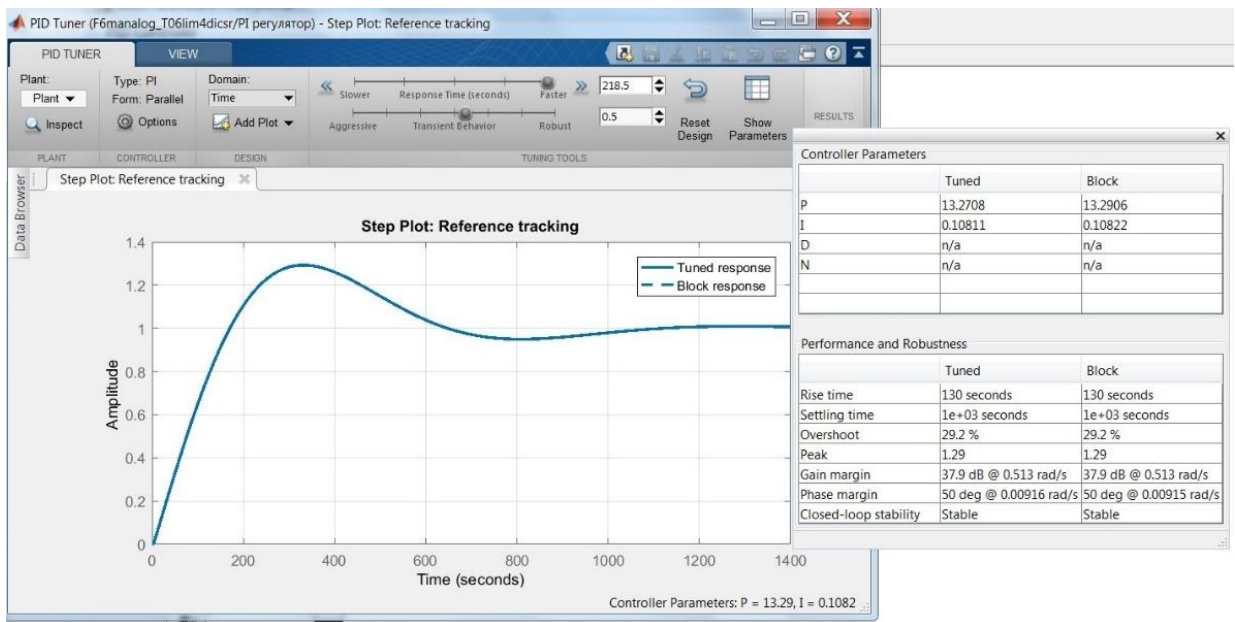


Рисунок 3.5 – Параметри ПІ-регулятора для ДПЗ DN65, $\varphi \in]70^\circ; 80^\circ]$

3.3 Нейромережевий регулятор температури травильного розчину

Для отримання інформації про поведінку системи, навчання і точного налаштування нейронного регулятора застосовано підхід «наслідуючого нейрокерування» [92, 93]. Термін «наслідуюче нейрокерування» (Controller Modeling [94], Supervised Learning Using an Existing Controller [95]) охоплює системи нейрокерування, в яких нейроконтролер навчається на прикладах динаміки звичайного контролера пропорційно - інтегрально-диференціальної (ПІД) схеми керування за зворотним зв'язком [96]. Схему наслідуючого нейрокерування показано на рис. 3.6, де TDL – модуль лінії затримки сигналу, r – вектор стану ТП, u – керуючий сигнал, y – реакція ТП

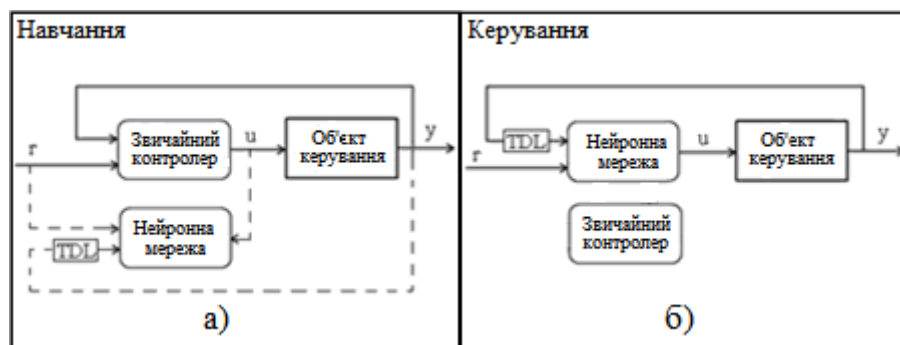


Рисунок 3.6 – Схема наслідуючого нейрокерування: а) режим навчання нейронної мережі; б) режим керування

Після навчання нейронна мережа точно відтворює функції початкового контролера. Навчальна вибірка для нейронної мережі формується наступним чином. Звичайний контролер по зворотному зв'язку керує об'єктом в штатному режимі. Значення величин на вході і виході звичайного контролера фіксуються, і на основі протоколу формується навчальна вибірка для нейронної мережі $U = \{P_i, T_i\}_{i=1}^M$, що містить M пар значень входу P_i і очікуваних реакцій T_i нейромережі: $P_i = [r(i+1), S(i)]^T$. Основним недоліком цього методу є необхідність в попередньо налагодженому звичайному ПІД-контролері, що не завжди можливо. Але копійований нейроконтролер принципово може забезпечити кращу якість керування, ніж

нейроконтролер, отриманий шляхом модельного навчання. Тому наслідуюче нейрокерування успішно застосовується для первинного навчання нейронної мережі з подальшим донавчанням нейроконтролера в ході ТП. При цьому нейроконтролер та еталонний ПІ-контролер отримують однакові значення уставки. Одержаний нейронний контролер завдяки досягнутій точності керування, що задається при налаштуванні, більш ефективний, ніж контролер-еталон. Як компромісне рішення для впровадження в ТП і переходу від застосування ПІ-контролера до нейромережевого [97] було прийнято варіант паралельного тестування і донавчання при їх спільному підключенні (рис.3.7).

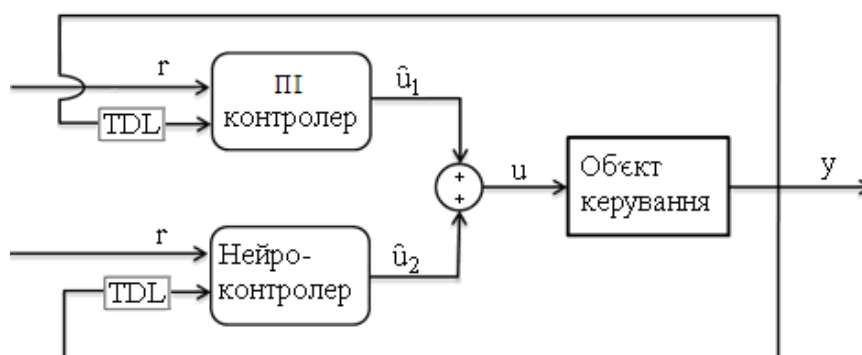
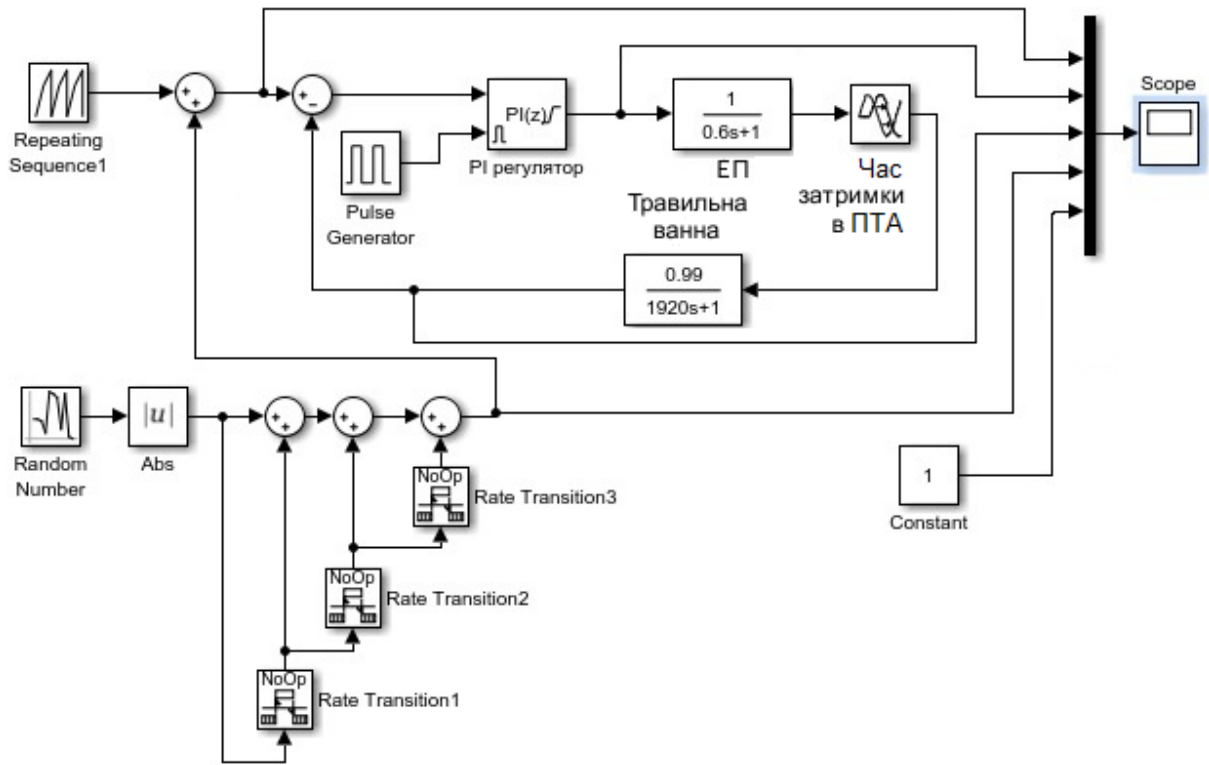
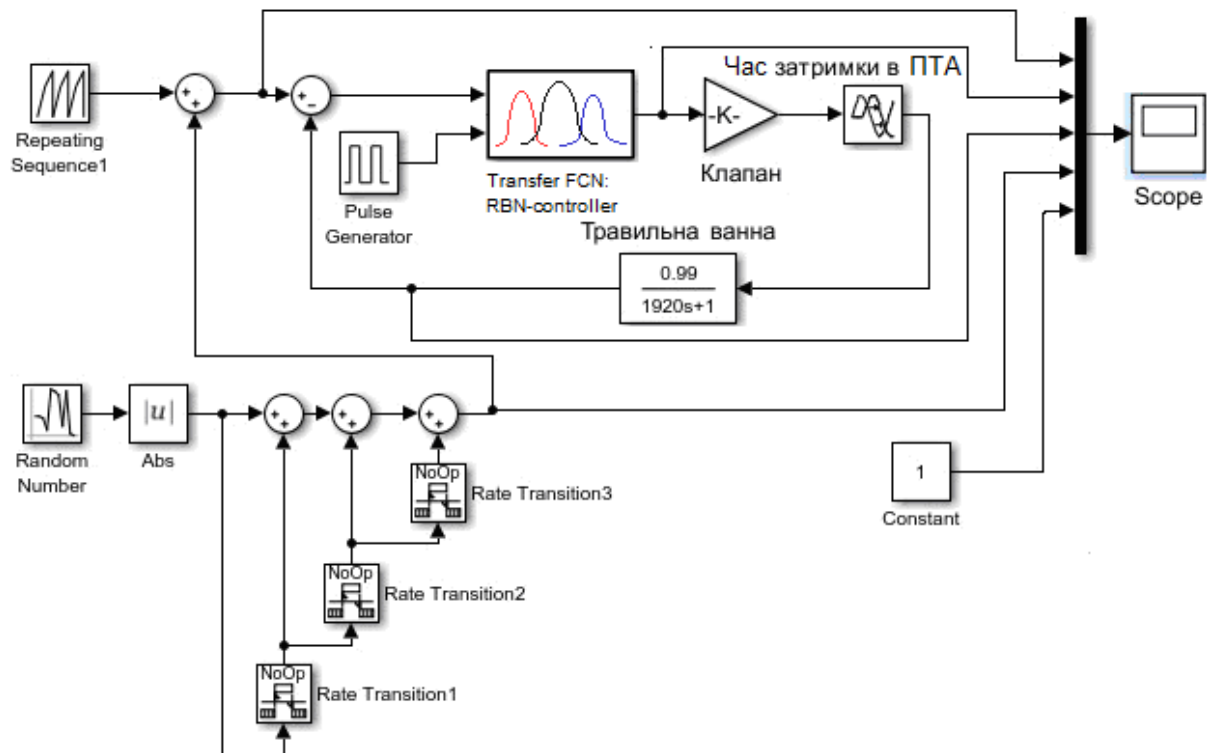


Рисунок 3.7 – Прийнята схема донавчання і тестування нейроконтролера

До ОК підключається ПІ-контролер, після чого нейроконтролер вчиться керувати системою, вже замкнутої звичайним ПІ-контролером [98]. Під час налаштування нейроконтролера, він підключається до системи і керуючі сигнали обох контролерів сумуються. Після донавчання ШНМ підключається замість звичайного ПІ-контролера (рис.3.6 (б)). Прийнята схема тестування, не дивлячись на те, що ОК є трансцедентним і система не відноситься до мінімально-фазових, дає можливість проаналізувати її стійкість класичними методами, що досить складно в разі застосування нейрорегулятора. Для різних інтервалів кута повороту засувки $[\varphi_i, \varphi_{i+1}]$ адаптуються: коефіцієнт P і затримка T , зумовлена швидкістю розгону–зупинки ЕП і часом обчислень на кожному такті керування. В сталому режимі ТП реалізує регулятор витрат теплоносія $Kv(t)$ за алгоритмом, запропонованим в гл.2. Схеми що моделюються, представлено на рисунку 3.8.



(a)



(б)

Рисунок 3.8 – Схема моделювання системи: (а) з ПІ- контролером;
(б) з нейроконтролером

При побудові неймережевої моделі об'єкта керування використовувалися апріорні дані та отримані в результаті модельного експерименту. Загальну схему, за якою проведено моделювання процесу неймережевого регулювання температурним режимом травильного розчину в середовищі ScieLab, представлено на рис. 3.9.

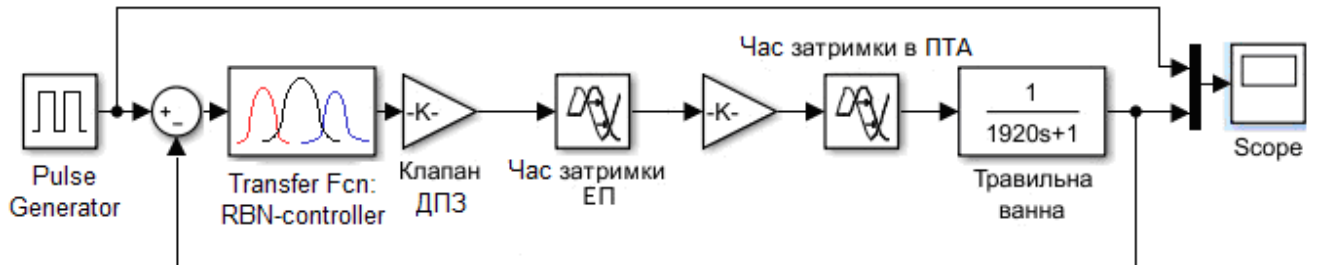


Рис. 3.9 – Схема РБМ моделі регулювання температури розчину

На рис. 3.10 наведено результати роботи модельованої неймережевої системи за умови подачі на вхід послідовності прямокутних одиничних імпульсів.

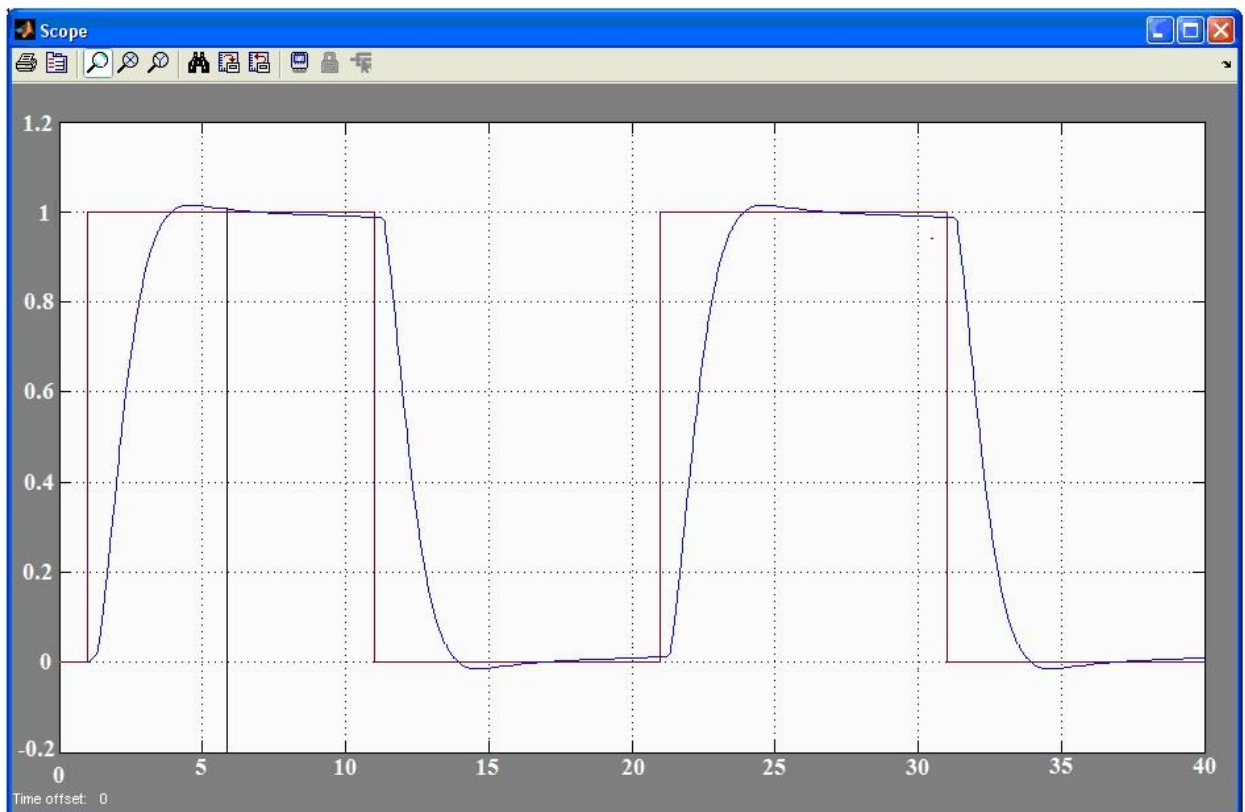


Рис. 3.10 – Результати моделювання процесу (РБМ - регулятор)

Також для порівняння представлено результати моделювання процесу ПІ-керування температурним режимом травильного розчину. Схема і результати моделювання представлено відповідно на рис. 3.12 і 3.12.

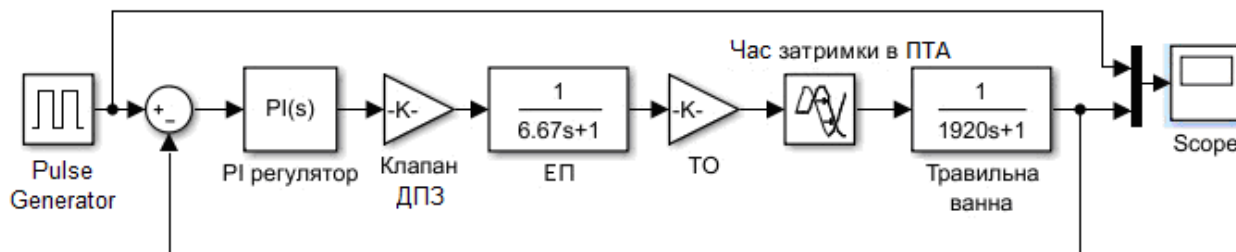


Рисунок 3.11 – Схема моделювання ПІ-регулювання процесу

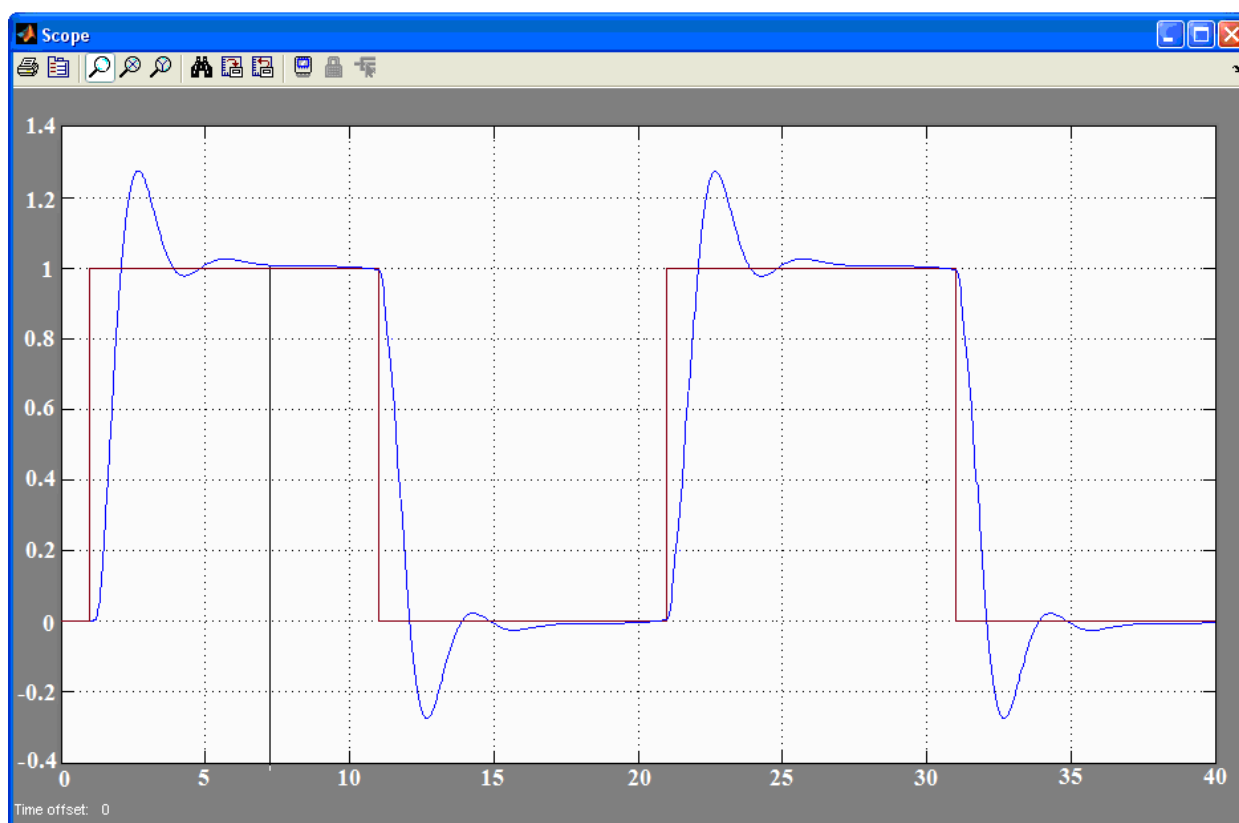


Рисунок 3.12 – Результати моделювання процесу (ПІ-регулятор)

З рисунків (3.10, 3.12) видно, що в нейромережевому регуляторі час входу системи в стійкий стан менше (5.9с) в порівнянні з ПІ-регулюванням (6.27с), і практично відсутнє перерегулювання, зменшено число коливань системи та знижена динамічна помилка.

У реалізованому цифровому регуляторі $\varphi(G)$ використано метод навчання нейронних мереж «із вчителем», заснований на використанні послідовного вводу нелінійних аддитивних складових, які мінімізують поверхню помилки. Поточне завдання $\varphi^*(G)$ кута ДПЗ для забезпечення питомого дебету G формується як:

$$\varphi_i^*(Kv_i) = \frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j \cdot \exp \left[\frac{-(Kv_i - Kv_j)^2}{2\delta_i^2} \right]}{\sum_{j=1}^n \exp \left[\frac{-(Kv_i - Kv_j)^2}{2\delta_i^2} \right]} \quad (3.22)$$

де Kv_j – центри нейронів, величини ординат відомих для ДПЗ точок (φ_j, Kv_j)

Апроксимація нелінійності ДПЗ здійснюється радіально-базисними функціями виду:

$$\varphi_i(G) = \exp \left\{ -\frac{\|G - Kv_i\|^2}{2\delta_i^2} \right\}, \quad (3.23)$$

Де δ_i – радіуси базисних функцій, що настроюються в процесі навчання мережі;

$\|\cdot\|$ – евклидова норма. Після навчання ШНМ $\varphi^*(G)$ можна записати як:

$$\varphi^*(G) = c_0 + \sum_{j=1}^N c_j \varphi_j(G), \quad (3.24)$$

Де c_j , $j = \overline{(0, N)}$ – вектор вагових коефіцієнтів, а параметри Kv_i, δ_i, c_i налаштовуються в процесі навчання мережі.

Структура РБМ була визначена при наступних параметрах: розмірності вектора входу і вектора виходу - 5 і 1 відповідно; кількість шарів - 2; кількість нейронів в першому і вихідному шарах - 16 і 1 відповідно; швидкість навчання була задана з послідовним зменшенням параметра збіжності від $\eta = 0,3$ до $\eta = 0,1$ в кожній епосі. Для обліку динаміки в нейронну мережу введені сигнали із затримкою на такт, MISO – модель РБМ має (5-16-1) структуру:

$$\tau_{on}(n) = F_{NN}(\varphi(n-1), \varphi(n), \Delta\varphi(n), t_{\varphi}(n-1), t_{\varphi}(n)). \quad (3.25)$$

Обчислюваний параметр $\Delta t_{\varphi}(n) = t_{\varphi}(n-1) - t_{\varphi}(n)$ визначає знак полярності керуючої напруги U , що подається на n -му такті керування ЕП з тривалістю $\tau_{on}(n)$. При формуванні навчальних наборів значень, параметр $t_{\varphi}(i)$ визначають за формулами (3.15- 3.16), що враховує характеристики ЕП.

В рамках роботи в процесі нейромережевого моделювання, проводилися експерименти з різними структурами мережі, починаючи від найпростішої мережі 4-1 без зворотних зв'язків, що складається з двох шарів, з 4 нейронами в прихованому шарі і 1 нейроном у вихідному шарі, і закінчуючи рекурентними мережами, що включають затримки як по входах, так і по зворотних зв'язках.

Для вибору найкращої архітектури мережі використовувалася процедура дискримінації нейромережевих моделей [99]. За цією процедурою при визначенні кращої структури мережі виконуються наступні дії:

- обираються N нейромережевих моделей;
- задається максимальна кількість циклів навчання мережі k ;
- задається період дискримінації $m < k$;
- кожні m циклів навчання перевіряються умови, пов'язані з оцінкою доцільності виключення деяких мереж з розгляду і видаляються всі ШНМ, для яких ці умови виконуються;
- алгоритм зупиняється при досягненні задаваної максимальної кількості циклів навчання k .

У якості активаційних функцій РБМ використовувалися: лінійні вхідні функції зваженої суми в 1-м шарі, сигмоїдні активаційні функції в 2-му шарі, і лінійна зваженої суми в 3-м вихідному шарі. Навчання РБМ проходило в пакеті NeurophStudio при заданому порозі помилки $e^2 = 0.005$ за алгоритмом ЗП.

Використання РБМ моделі в пристрої керування потоком теплоносія РТГ-2 (сертифікат відповідності UA1.007.0183354-07, Додаток А), дозволило домогтися точності регулювання $\delta_{T_{11}} = \pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Результати моделювання підтверджують працездатність запропонованого нейромережевого регулятора в складі системи керування безперервним травильним агрегатом і в цілому задовольняють вимогам

стабілізації температури травильного розчину в ваннах БТА.

3.4 Нейромережевий регулятор тиску травильного розчину в соплах попереднього зрошування дефектів

Як було зазначено в п.2.3, крім контуру регулювання температури травильного розчину та підтримки заданого рівня його активності, також до складу АСК БТА введено додатковий контур, що регулює тиск подачі ТР до форсунок попереднього зрошування [77] (далі – тиск ТР) для підвищення якості кінцевого продукту.

Це пов'язано, перш за все, з тим, що високочастотні коливання оптимальних значень параметрів ТР знижують якість занурювального травління точкових дефектів у ваннах, і можуть викликати незапланований перетрав або недотрав сталевий смуги. Тиск ТР вимірюється датчиком SDE1 FESTO з цифровим PNP / NPN сигналом, дані якого використовуються для корекції керуючих дій контура – зміни площини форсунок крізь які подається ТР. Зміна площини форсунок зрошення здійснюється керуючою напругою змінної тривалості та полярності, яка подається регулятором на ВМ відповідно до довжини дефекту L , швидкості змотування $V(n)$, та завдань $P_i^*(n)$, що формуються еталонною моделлю – ідентифікатором за кодом кольору дефекту $Y(RGB)$. В якості ВМ застосовано титановий клапан типу H331g з діаметром повнопрохідного перетину 5мм з кусочно- лінеаризованою характеристикою, оснащений короткоходовим електроциліндром з лінійним приводом FESTO ESBF-LS-40-30-2.5P. Побудову нейромережевої моделі сопла зрошення здійснено за наступних умов та припущень. Час повного ходу голки сопла зрошення $h_f = [0; 2]$ мм від стану «закритий» до «відкритий» становить $t_f = 0,5$ мс. Значення часу ходу голки від закритого стану до деяких відкритих станів за умов досягнення відповідних значень P_i наведено нижче. На прилеглих відрізках залежності $t_{f(i,i+1)} = F(P_{i(i+1)})$ прийнято лінійними для $i=1, \dots, n$. Складено експериментальний класифікатор (табл.3.2) з параметрами, що призводять до повного видалення дефектів при попередньому зрошенні дефектів з такими параметрами ТР: температурою $T = 75^\circ\text{C}$, концентрацією $C = 10\%$, вмістом мультигідратів заліза $C_n \leq 15\%$ тиском подачі в сопла $P_i (0; 6)$ МПа.

Таблиця 3.2

Класифікатор дефектів поверхні прокату та параметрів їх усунення

n	$X_m =$ Колір дефекта	$\delta_n, \text{мк}$	Y	Y_n^m	$P_t, \text{МПа}$	$t_f \cdot 10^{-4}, \text{с}$
1	Матовий алюміній	0,1÷0,4	227÷231	229	0	0
2	Блідо-голубий	5÷10	218÷226	223	1,8	1,1
3	Світло-сірий	13÷15	200÷217	209	3,6	2,2
4	Сірий	14÷25	189÷206	198	3,9	3,0
5	Темно- сірий 1	24÷36	137÷148	142	4,5	4,0
6	Темно- сірий 2 матовий	38÷32	45÷ 2	67	4,8	4,2
7	Майже чорний	34÷40	3 ÷ 39	21	6,0	5,0

На рис.3.13 наведена схема модуля керування тиском подачі травильного розчину в сопла.

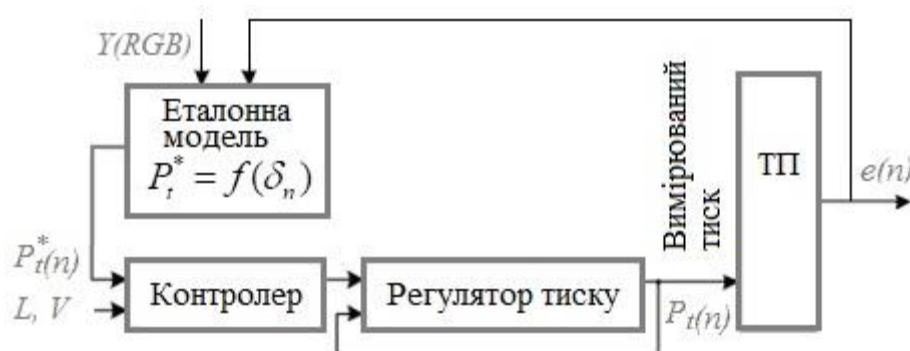


Рисунок 3.13 – Схема модуля керування тиском

Обмежені можливості лінійного ЕП керування тиском в форсунках не завжди дозволяють підтримувати необхідну швидкість зміни вихідних параметрів. Динамічні зміни P_t (зокрема, високочастотні коливання) знижують якість видалення дефектів. Ці проблеми можуть бути вирішені шляхом удосконалення системи керування за допомогою ШНМ, налаштованою на реальних даних ТП. Для цього доцільно здійснити моделювання процесу керування тиском P_t . Особливий інтерес представляє

побудова моделі, що структурно відображує залежність між вимірюваним тиском P_t , керуючими впливами регулятора тиску та якістю обробки дефектів у реальному часі.

В повному вигляді подання ШНМ попереднього зрошування несистематичних дефектів (НД) є досить громіздкою структурою:

$$\tau_{on}^U(n) = F_{NN}(C, T, V(n), D^m, \delta_n(Y_n^m), P_t(n-1), P_t(n), \Delta P(n), t_f(n-1), t_f(n), \Delta t_p), \quad (3.26)$$

де C, T – параметри ТР (неістотні при зрошуванні); $V(n)$ – швидкість змотування смуги (постійна); D^m – геометричні координати m -го дефекту; $\delta_n(Y_n^m)$ – оцінка товщини дефекту, що залежить від коду його кольору $Y_n(RGB)$ та оцінюється за класифікатором (п.2.3); $\Delta t_p = t_f(n-1) - t_f(n)$ – введено в ШНМ для обчислення знака керуючої напруги U при зміні ΔY – оцінки дефектів за яскравістю. Декомпозиція моделі на кілька простіших суттєво спрощує синтез контуру керування.

Для дефектів смуги прокату, що підлягають травлінню, РБМ за компонентою яскравості Y та геометричними координатами довжини дефекту $D^m(y(n)) = (y_2^m - y_1^m)$ ідентифікує необхідний тиск подачі P_n^* ТР через n -у форсунку. Тому вихід виділеної моделі $P_t^*(x, y, \delta)$ буде використано як вхід для моделі (3.26), а додаючи у структуру РБМ вхідні сигнали t_f і P_t з затримкою на такт для обліку динаміки процесу, подання РБМ – моделі тривалості відкриття ЕПФ сопла має структуру (6-12-1):

$$\tau_{on}(n) = f(D^m(y(n)), V(n), P_t(n-1), P_t(n), t_f(n-1), t_f(n)) \quad (3.27)$$

Нейромережевий регулятор тиску подачі ТР попереднього зрошування дефектів формує керуючу напругу певної тривалості і полярності. В моделях для апроксимації рельєфу дефекту та генерації керуючих впливів і подальшої корекції ідентифікаційних еталонів застосовані базисні функції з фіксованими центрами та радіусами. Помилка роботи регулятора при керуванні тиском визначається різницею поточного значення реального тиску ТР $P_t(t)$ і завдання $P_t^*(t)$:

$$\varepsilon(t) = P_t(t) - P_t^*(t). \quad (3.28)$$

При перевищенні рівня накопичених помилок в контурі керування $e(n)$ за критерієм чистоти обробленої поверхні відбувається підстроювання еталонної моделі.

Процес навчання проводився з послідовним зменшенням параметра збіжності від $\eta=0.15$ до $\eta=0.1$ в кожній епосі. Мережа ініціалізована малими випадковими вагами синапсів. Навчальна пара випадкова, і вхідний вектор X_P подається на вхід мережі, після чого обчислюється прогнозоване значення виходу Y_P . Градієнт в просторі вагових коефіцієнтів мережі визначається ітераційно за узагальненим дельта-правилом (Generalized Delta Rule (GDR)), у відповідності з яким спадна послідовність векторів g_p , які задають напрямок зміни ваг синапсів розраховується за даними навчальної вибірки [14]. З урахуванням градієнта g_p зміна ваги на кроці q визначається за формулою:

$$\Delta_q w = \eta g_p + \alpha \Delta_{q-1} w. \quad (3.29)$$

Константи α, η є параметрами навчання, які задають швидкість зміни кроку, і призначені для запобігання стрибкоподібних змін ваг від кроку до кроку [101]. Після оновлення значень вагових коефіцієнтів вибирається нова навчальна пара, і процедура повторюється до досягнення прийнятного рівня критерію якості навчання ШНМ – суми квадратів помилок.

Стартова енергія імпульсу потоку рідини ТР $E_l(\alpha)$ прямо (k -) пропорційна кореню дотичного напруження потоку ТР – $\tau_{cm}(P_t)$, створеного на поверхні дефекту за рахунок подачі ТР з тиском P_t з відстані l від сопла до поверхні [100]:

$$E_l(\alpha) \approx k \cdot l \cdot \sqrt{\tau_{cm}(P_t)}. \quad (3.30)$$

Де $E_l(\alpha)$ – енергія імпульсу потоку ТР, що також нелінійно присутня в рівнянні Арреніуса (ф.3.1), адаптованому до задачі попереднього зрошення, замінюючи приріст теплової енергії E_T за період травління Δt :

$$\ln \frac{C(t_{n+1})_{H_2SO_4}}{C(t_n)_{H_2SO_4}} = A \cdot e^{-((E_a + E_I(\alpha))/RT) \cdot \Delta t}, \quad (3.31)$$

Де $C(t_{n+1})_{H_2SO_4}$ – концентрація сірчаної кислоти в ванні по завершенню травління через час Δt проходження смуги крізь ванни; $C(t_n)_{H_2SO_4}$ – початкова концентрація кислоти; A – множник Арреніуса; $E_a = f(C, T)$ – енергія активації реакції; R – універсальна газова постійна; T – температура ТР (°К); $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ – час зрошення НД.

Сопла розташовані поперек руху смуги сталевого прокату (рис.3.14).

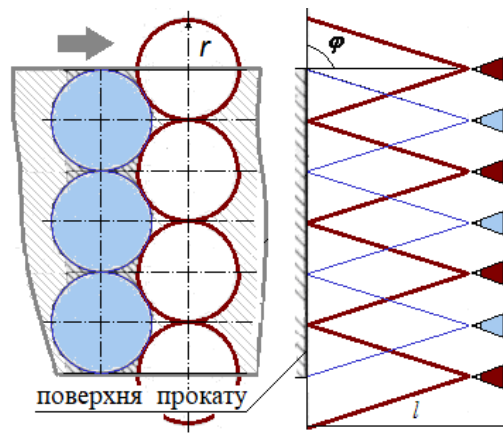


Рисунок 3.14 – Робочі зони форсунок на поверхні прокату

ТР під тиском подається на поверхню смуги крізь сопла, розташовані в шахматному порядку, повністю зрошує смугу прокату по ширині. Таке розташування сопел дозволило застосувати РБМ з фіксованими центрами і радіусами базисних функцій для генерації керуючих сигналів формування необхідного тиску P_j подачі ТР крізь j -ю форсунку відповідно товщині оброблюваного дефекту. У загальному випадку, на якість процесу мають вплив геометричні параметри: l – відстань від поверхні смуги, φ – кут нахилу до неї осі форсунки сопла, r – радіус плями факела сопла, а також фізичні: ρ – щільність ТР, його технологічні параметри.

Оптимальні значення параметрів ТР, визначені за допомогою РБМ гіперповерхні $f(C, C_n, C_{2n}, T)$ [102], підтримуються в кожен такт керування АСК БТА. При використанні колірною класифікатора системних і локальних дефектів можна оцінити значення параметрів, що керують їх усуненням – час на регулювання

перетином сопла, щоб утворити необхідний тиск ТР для зрошення дефекту. Це дає можливість спростити модель (3.26), редукуючи її розмірність (рис 3.15).

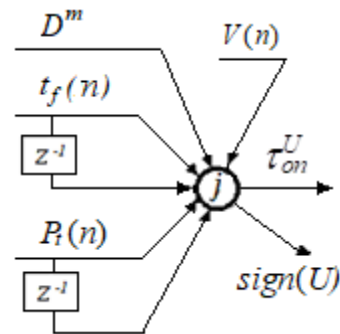


Рисунок 3.15 – Модель керування тиском попереднього зрошення

На рисунку 3.15 позначено: D^m - геометричні координати m -го дефекту; $P_i(n)$ – необхідний тиск подачі ТР крізь j -ю форсунку; $\tau_{on}^U(n)$ – тривалість подачі керуючої напруги U з певною полярністю $sign(U)$ – на електропривод шпинделя форсунки для досягнення заданого тиску $P_j^*(n)$; $V(n)$ – швидкість руху прокату на момент часу n в ТР; z^{-1} – лінія затримки.

Ширина сегменту $S_j = 2r$ (рис.3.16) відповідає за розміром частині поверхні смуги прокату, зрошуваній соплом A_j в момент відпрацювання керуючого впливу.

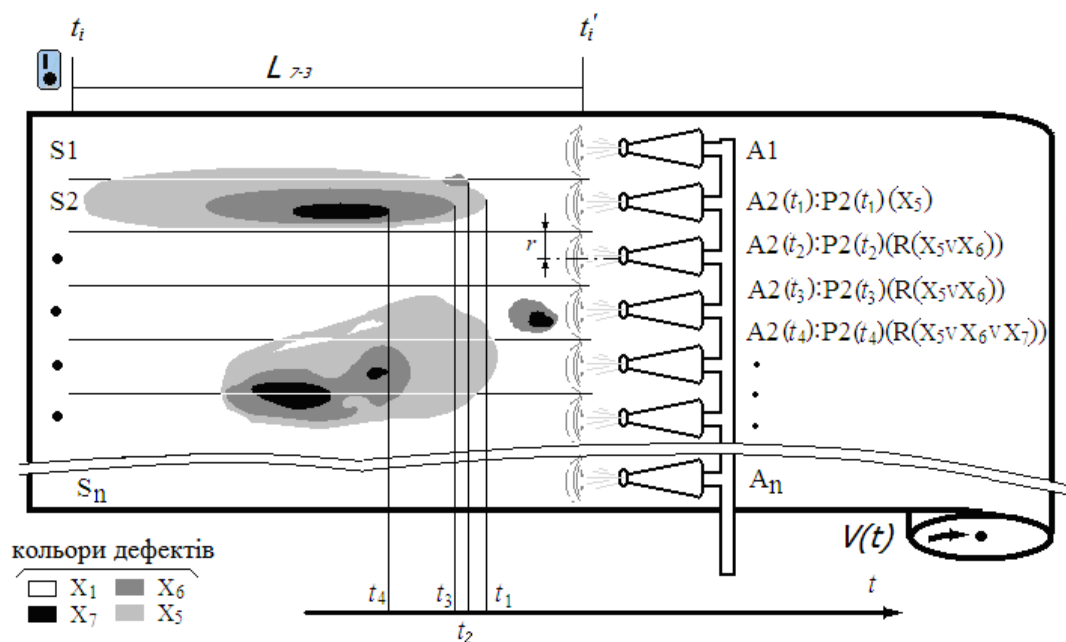


Рисунок 3.16 – Вхідна сегментація несистемних дефектів смуги прокату

За позиційними координатами частини НД часто відносять до різних сегментів S_j смуги прокату [73, 103]. У загальному вигляді логічне правило керування (ЛПК) тиском P_i для сопла A_j можна представити у вигляді:

$$A_j(t'_i) : P_j(t'_i)(R\{X_m(t_i) : D^m \in S_j\}), \quad (3.32)$$

де R – визначальне правило переважної альтернативи, що задається при синтезі або навчанні регулятора і усуває неоднозначність ситуації керування. Технічно обумовлені обмеження на кількість сопел N призводять до неоднозначних керуючих впливів для обробки частин дефектів, що знаходяться в одному секторі S_j поверхні прокату, але різних за значеннями X_m . Фізичний сенс відношення R полягає в наступному: в секторі поверхні S_j обробки соплом A_j можливе одночасне перебування дефектів з різними колірними характеристиками X_m . ЛПК задається в залежності від пріоритетних вимог ТП: мінімальний, усереднений або максимальний вплив на сектор НД (збільшення тиску в соплі або зміна температури та / або концентрації ТР). На рис.3.16 проілюстровано ЛПК [104], взяте за основу при синтезі регулятора: $R : \max(P_i)$ для сопла A_2 на часовому відрізку $(t_1; t_4)$. Для дефектів смуги прокату, що підлягають травлінню, за компонентою яскравості Y і геометричними координатами D^m радіально-базисною мережею $\delta(x, y, Y)$ формується образ дефекту. Завдання тиску $P_i^*(\delta)$ подачі травильного розчину крізь n -у форсунку ідентифікується РБМ $P_i^*(x, y, \delta)$ (рис.3.17).

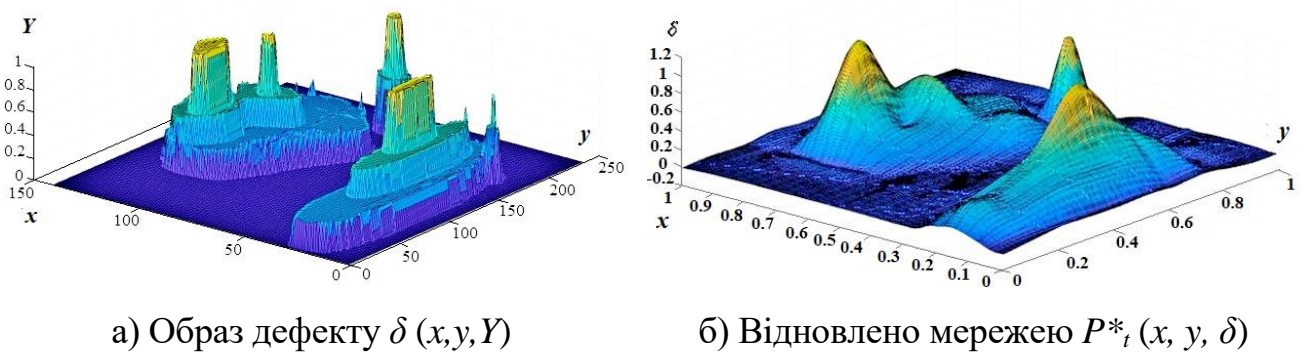
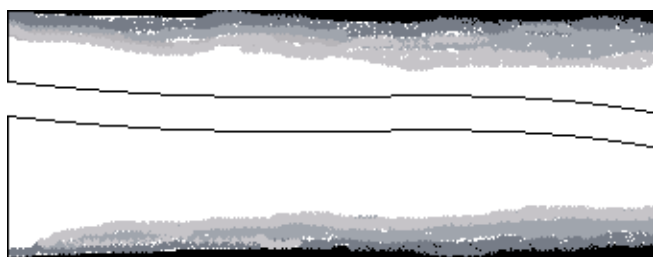
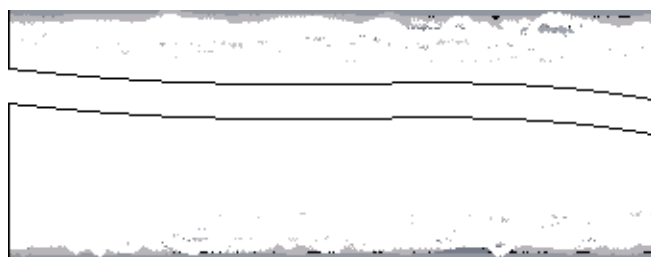


Рисунок 3.17 – Подання поверхні обробки дефекту

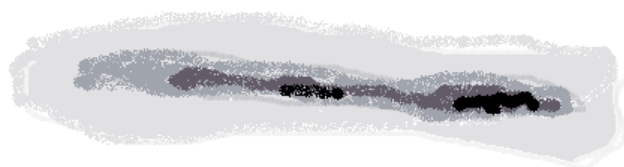
На рис.3.18 представлені зліва – зображення оригіналів поверхні дефекту (а, в, д, ж, к), відповідно справа – зображення дефектів після обробки (б, г, е, з, л).



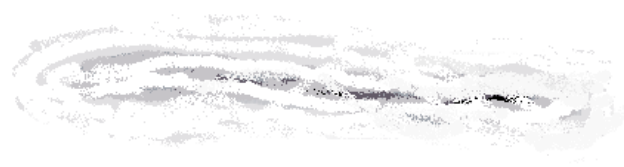
(а)



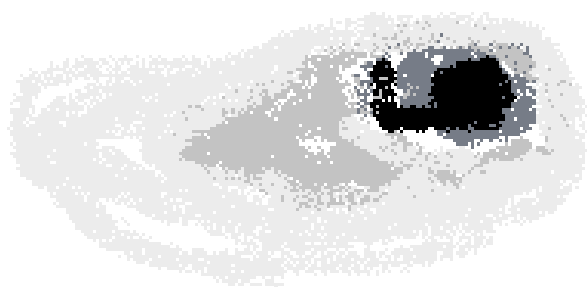
(б)



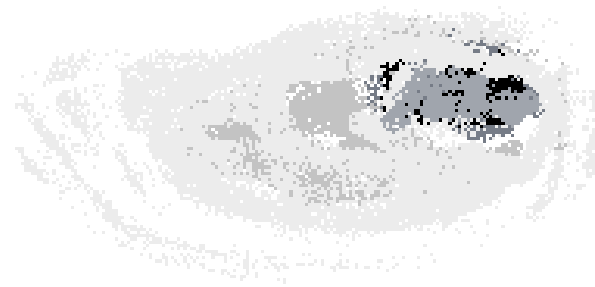
(в)



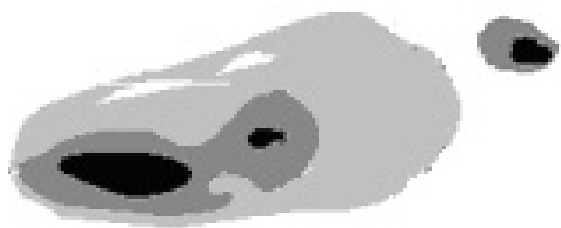
(г)



(д)



(е)



(ж)



(з)



(к)



(л)

Рисунок 3.18 – Приклад «вікна» обробки дефектів в БТА

З огляду на концентрично-еліптичну форму НД на поверхні смуги, що обумовлена фізичною природою їх утворення, можливе застосування попереджувального прогнозування керуючих впливів [105] по горизонтах зміни відтінку на площі дефектів за результатами їх ідентифікації, та аналогічно, – системних дефектів.

Тривалість включення ЕП Δt_f для керування площею прохідного перетину сопла і тиску на виході ТР з сопла на величину ΔP_t , адаптивно змінюється за припустимо пропорційним законом з коефіцієнтами k_n на кожному відрізку (P_n, P_{n+1}) всередині n -го класу (рис.3.19) – відомі тільки окремі синглетони виміряних значень. Прийнято, що безперервна функція $t_f(P_t)$ монотонно зростає та лінеаризується кусочно в n нерівних класах на області визначення $P_t = (0; 6)$ МПа.

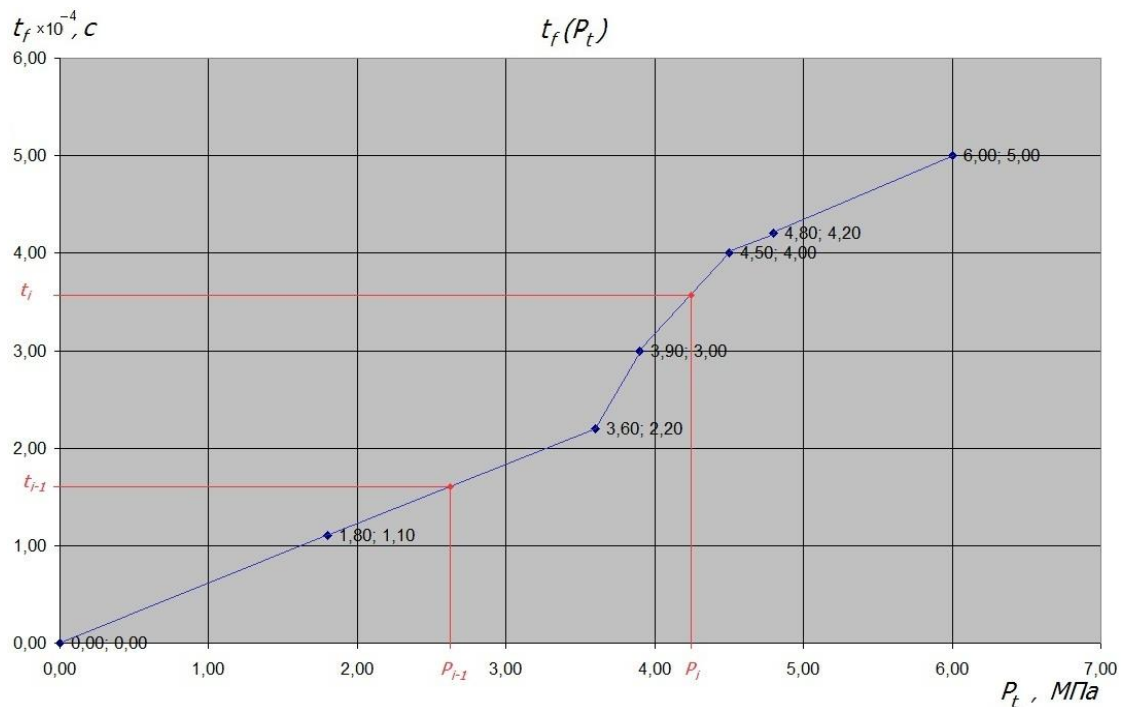


Рисунок 3.19 – Тривалість змін площі прохідного перетину сопла

Належність величини до n -го класу визначається нерівністю:

$$P_{t(n-1)} \leq P_t(t_i) \leq P_{t(n)}, \quad (3.33)$$

що при припущенні про дію лінійних законів $t_f(P_i)$ всередині n класів дає можливість визначити $t_f(i)$:

$$k_n = \frac{t_{f(n)} - t_{f(n-1)}}{P_{t(n)} - P_{t(n-1)}}, \quad (3.34)$$

$$t_f(i) = \frac{P_t(t_i) - P_{t(n-1)}}{k_n}, \quad \forall P_t(t_i): P_{t(n-1)} \leq P_t(t_i) \leq P_{t(n)}. \quad (3.35)$$

Значення попередньої ітерації відомі, тоді тривалість подачі керуючої напруги для зміни площі прохідного перетину сопла τ_{on}^U :

$$\tau_{on}^U = |t_f(i) - t_f(i-1)|. \quad (3.36)$$

Напрямок обертання ЕП голки форсунки (полярність напруги, що керує U) задано знаком відхилення оцінки $Y(D^m(t_{i+1}))$ (або $\Delta P_t(\Delta t_f)$) від отриманої в попередній момент $-Y(D^m(t_i))$.

Тоді маркер реального часу включення форсунки сопла t_i' (рис.3.16):

$$t_i' = t_i - \tau_{on}^U + L_{7-3} / V(t), \quad (3.37)$$

де t_i – маркер реального часу ідентифікації області дефекту, який до зрошення проходить петлеву яму – визначену фіксовану відстань $L_{7-3} \approx (120 \div 240)$ м із умовно постійною регламентованою швидкістю $V(t) \leq 2\text{ м/с}$, що дає час системі на відпрацювання керуючих сигналів.

Тривалість зрошення m -го дефекту ТР з тиском P оцінена як:

$$\Delta t_p(n) = (y_2^m - y_1^m) / V(n). \quad (3.38)$$

При формуванні навчальних пар визначальне правило переважної альтернативи керування [39] тиском R прийнято в наступному вигляді: якщо Δt_p можливо порівняти з τ_{on}^U , то керуючий вплив формується за оцінкою наступної області дефекту $D^m(t_{i+2})$ якщо $Y(D^m(t_{i+2})) \gg Y(D^m(t_{i+1}))$. Якщо ж $Y(D^m(t_{i+2})) - Y(D^m(t_{i+1})) \leq \delta_Y$, де δ_Y – регламентована

величина поточних відхилень оцінок кольору дефектів, то величина тиску не змінюється до наступної області дефекту.

У разі, коли закон $t_f(P_i)$ невідомий напевне, враховуючи монотонність залежності $t_f(P_i)$, побудова керуючого регулятора у вигляді РБМ є найменш витратним рішенням. РБМ апроксимує невідомі значення уніполярними сигмоїдальними функціями, що безперервно диференціюються між відомими точками-сіглетонами:

$$t_f(P_i(t_i)) = \frac{t_n}{1 + e^{-k_n(x - P_i)}}, \quad (3.39)$$

Де k_n – коефіцієнт крутизни функції в n -ому класі; P_i – абсциса опорного синглетону даного класу згідно ф. (3.33 – 3.35); t_n – час повного ходу голки форсунки в межах n -го класу.

РБМ налаштовано з використанням рекурентного однокрокового градієнтного алгоритму Качмажа [102, 106]. Навчання РБМ проходило в пакеті NeurophStudio при заданому порозі помилки 0.005 за ЗП – алгоритмом з послідовним зменшенням параметра збіжності від $\eta = 0.15$ до $\eta = 0.1$ при $\alpha = 0.15$ в кожній епосі навчання. При навчанні відбувалося зменшення помилки навчання РБМ e^2 , що свідчить про збіжність алгоритму навчання.

3.5 Висновки до третього розділу

1. Обгрунтовано керування споживанням теплової енергії в БТА як рішення типової MRP-II (Manufacturing Resource Planning) задачі поповнення запасів теплової енергії для оптимізації тривалості травління дефектів, яка визначає швидкість руху сталевого прокату в БТА. Отримано безперервний ПІ - регулятор витрат теплової енергії та запропоновано в якості еталона для отримання вибірки даних для навчання синтезованого РБМ-регулятора.

2. 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. Для навчання нейронного регулятора використано підхід «наслідуючого нейрокерування». Результати моделювання підтверджують працездатність запропонованого цифрового регулятора в складі системи керування БТА.

3. Отримано радіально-базисну мережу, що завдяки удосконаленому процесу ідентифікації дефектів поверхні смугового прокату з використанням нечіткої кластеризації, оперативно визначає параметри тиску подачі травильного розчину в сопла попереднього зрошування дефектів поверхні прокату, що дозволило підвищити якість кінцевого продукту.

Список використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [81-106]. Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [85, 86, 102-104].

4 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ БТА

У розділі 4 наведені рекомендації з модернізації автоматизованої системи керування процесом травління смугової сталі в складі АСК ТП стану холодної прокатки та опис інформаційної взаємодії контурів керування.

Запропоновані рішення враховують особливості сучасних БТА, і засновані на застосуванні отриманих в дисертації наукових результатів і ефективних засобів автоматизації і мікропроцесорної техніки.

Лінія травління смугової сталі містить ряд резервуарів з кислотою, що використовуються для очищення металевої стрічки перед подачею на стан холодного прокату. Петльові ями, розташовані під резервуарами, дозволяють з попередженням накопичувати запаси стрічки та аналізувати дефекти поверхні прокату, що забезпечує безперервну роботу стана холодного прокату в проміжок часу, коли на вхід БТА подаються нові рулони.

Цех холодного прокату з лінією для травління (PLTSM - pickling line tandem cold mill) працює в безперервному циклі, який вимагає точного керування електричними приводами і послідовності дій допоміжного обладнання [107]. Сталева смуга обробляється травильним агрегатом зі швидкістю, налаштованою у відповідності з оптимумом виробничого процесу, при точному контролі параметрів розчину і позиціонуванні координат дефектів на поверхні стрічки. Процес травління безперервний, зупиняється лише при частковій або повній заміні травильного розчину.

4.1 Модифікація структури автоматизованої системи керування БТА

Ієрархічний принцип організації КТЗ автоматизації керування ТП [108] на даний момент є основним при проектуванні АСК БТА.

Верхній рівень системи керування (SCADA) об'єднує АРМи операторів технологічного устаткування і АРМи персоналу.

Другий рівень забезпечує загальне диспетчерування ТП, а саме:

– спостереження за технологічним процесом в реальному часі;

- розрахунок і коректування налаштувань і уставок, що відповідають заданим показникам якості керування;
- вибір законів керування поточними (і/ або прогнозними) параметрами ОК;
- зберігання та завантаження керуючих програм в PLC (відновлення резервних копій з точки зупинки / збою ТП – дистанційно з сервера);
- оперативне супроводження моделей ОК типу «агрегат», «ТП», коригування моделей за результатами обробки інформації від першого рівня;
- синхронізацію і стійку роботу систем типу «агрегат» для групового керування технологічним обладнанням прокатного стану;
- ведення в реальному часі єдиної бази даних технологічного процесу;
- конфігурування КТЗ для різних режимів роботи (в тому числі при переході на резервні схеми на ділянках ТП);
- зв'язок з верхніми рівнями системи керування підприємством.

На нижньому рівні керування агрегатом система включає програмовані контролери (PLC) і систему шин польового рівня Profibus (рис.4.1) . В прямокутниках нижнього рядку на рис.4.1 виділено сопло ППЗ та камеру ідентифікації дефектів.

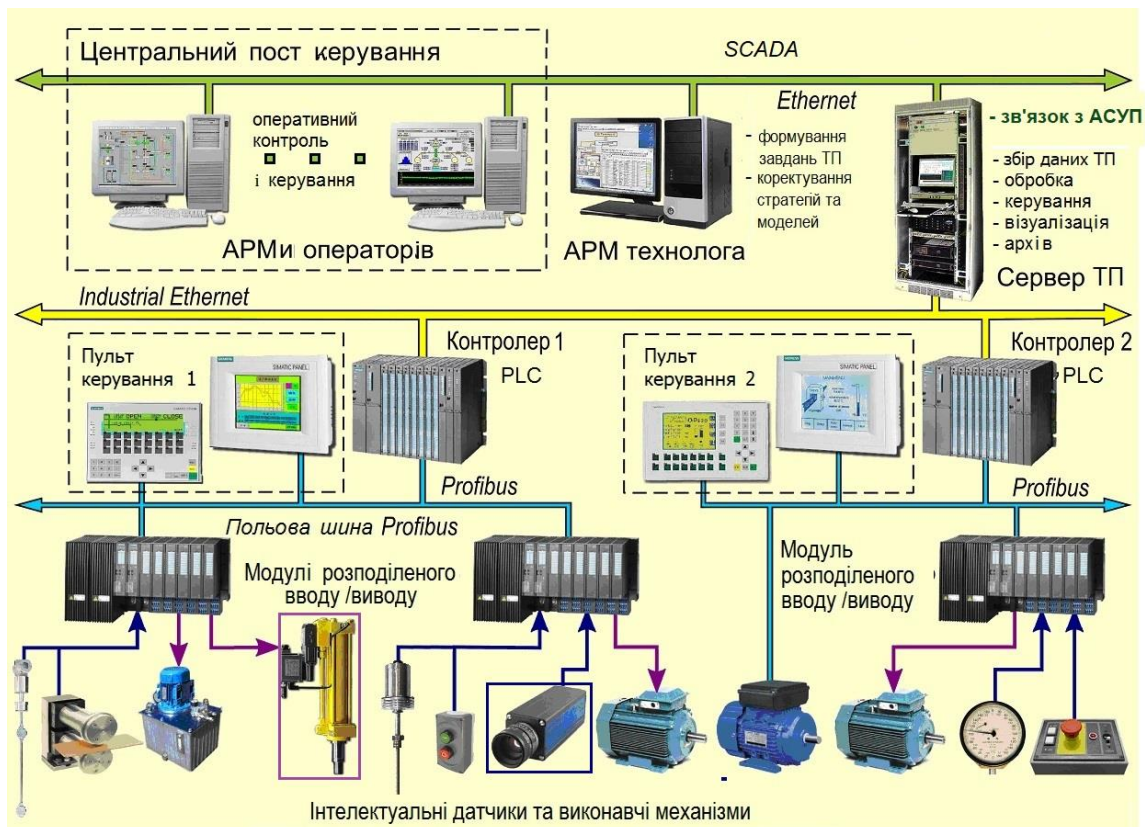


Рисунок 4.1 – Структура КТЗ АСК БТА

Система шин об'єднує контролери, модулі віддаленого розподіленого вводу / виводу, кнопкові пульти керування з вбудованими панелями оператора і дисплеями, інтелектуальні датчики і виконавчі сервоприводи. Основним обладнанням нижнього рівня є PLC сімейства SIMATIC [109]. Модулі розподіленого вводу / виводу забезпечують обмін інформаційних і керуючих сигналів: збір від датчиків, контрольно-вимірювального обладнання, органів локального керування органів, органів локального керування і видачу сигналів [110] виконавчим механізмом.

Програмовані контролери об'єднані в мережу контролерів Industrial Ethernet (варіант мережі Ethernet, адаптований для роботи в промислових умовах) [111]. Зв'язок контролерів з пристроями нижнього рівня також забезпечується через систему польових шин Profibus.

Змінними пристроїв БТА керують локальні системи, що входять до складу АСК ТП. Ці змінні можна поділити на дві групи: керовані та технологічні змінні. До керованих змінних БТА, що характеризують функціонування його пристроїв і систем, відносяться (рис.4.2):

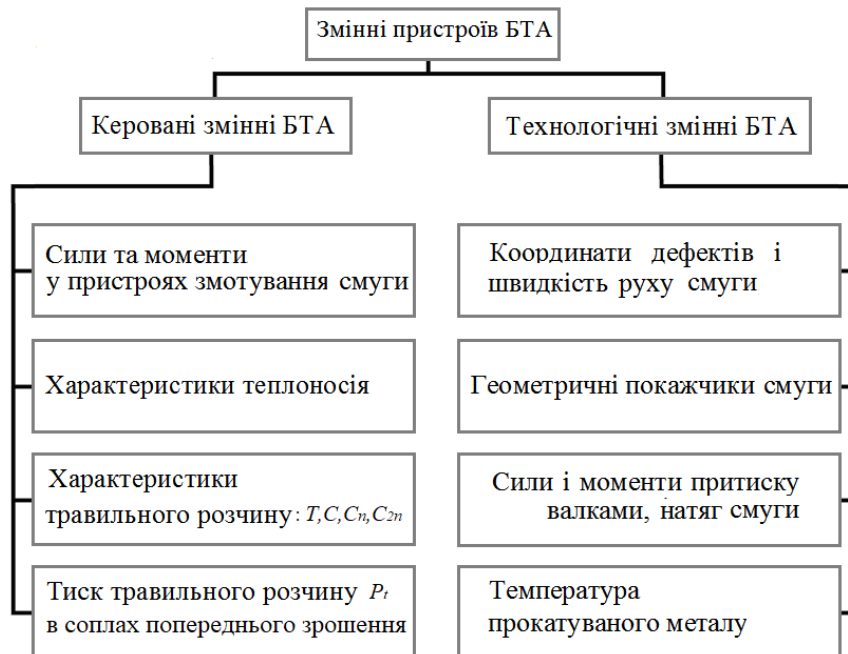


Рисунок 4.2 – Змінні пристроїв БТА

- сили та моменти, що розвиваються пристроями змотування смуги;
- характеристики травильного розчину: температура, концентрація, витрати;

- тиск подачі в соплах зрошення;
- характеристики теплоносія: температура подачі, витрати, тиск подачі.

Технологічні змінні БТА безпосередньо характеризують процес прокатки і включають:

- координати дефектів і швидкість руху смуги;
- показники геометрії смуг (розміри поперечного перерізу, характеристики форми смуги і її довжина);
- сили і моменти притиску валками, натяг смуги між ваннами;
- температуру поверхні прокату.

До недоліків існуючої системи керування можна віднести відсутність методів і моделей:

- оперативної ідентифікації дефектів сталевих смуг;
- оперативної ідентифікації стану травильного розчину;
- оптимального керування температурним режимом травильного розчину і стабілізації швидкості травління сталевих смуг;
- відсутність контуру керування попереднім зрошенням дефектів смуги в 1-й травильній ванні.

Перераховані недоліки були усунені під час модернізації системи керування БТА. Додатково були реалізовані два незалежних контури керування та ідентифікації. Перший контур забезпечує підтримку швидкості травління сталевих смуг за рахунок оперативної ідентифікації стану травильного розчину та оптимізації значень його температури і концентрації. До складу контура входять датчики температури, густини, концентрації кислоти, нечіткий аналізатор складу розчину з оптичним пристроєм оперативної обробки зображень, інтелектуальні регулятори температури і концентрації травильного розчину, керуючі впливи яких формуються з урахуванням результатів нейромережової ідентифікації стану технологічного процесу (параметрів ТР і поверхні сталю прокату).

Другий контур призначений для керування підсистемою попереднього зрошення дефектів сталевих смуг (ППЗ). Його робота заснована на вхідній нейромережовій ідентифікації дефектів поверхні сталевих смуг. На рис.4.3 штрихпунктирною лінією та червоним виділені модернізовані підсистеми та локальні контури керування КТЗ, блоками та елементами БТА.

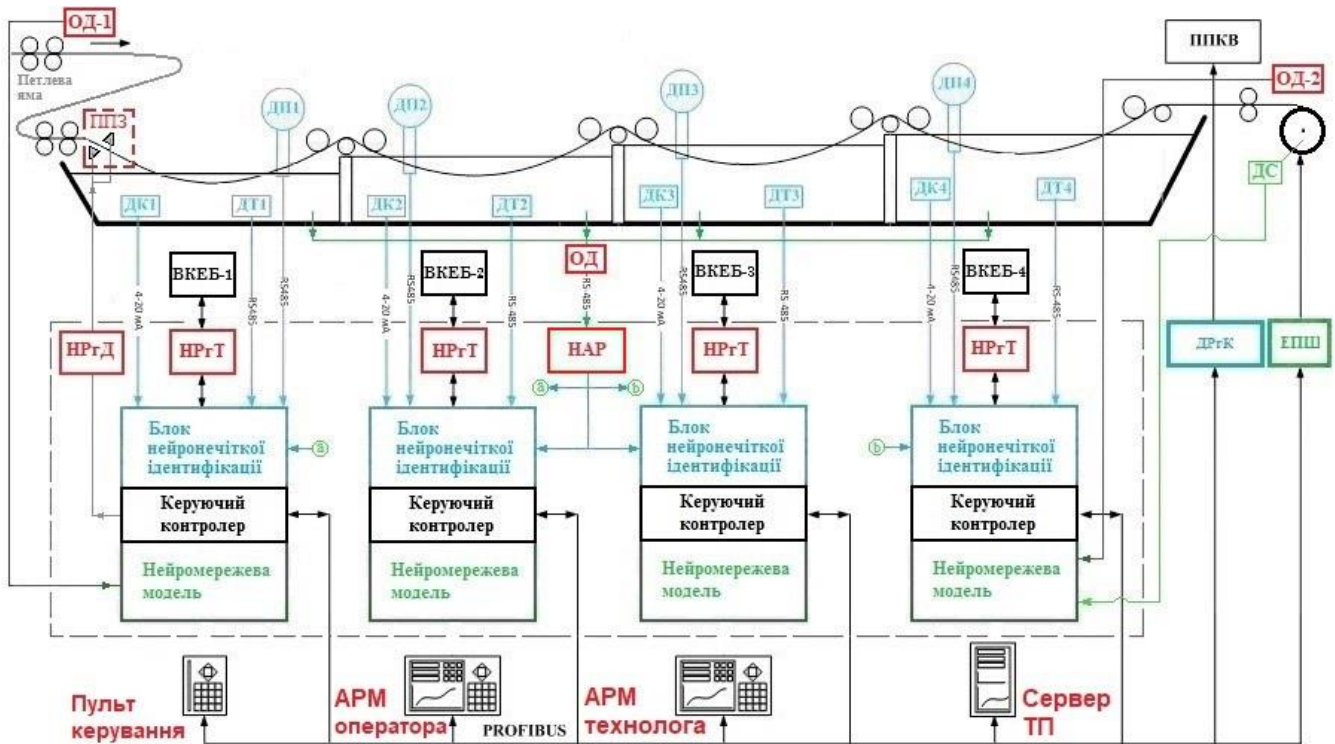


Рисунок 4.3 – Модифікована структурна схема АСК БТА

Позначення і скорочення, наведені на рис.4.3:

- ОД-1, ОД-2 – оптичні датчики входних/вихідних дефектів сталевої смуги;
- ОД – оптичний датчик нечіткого аналізатора состава розчину (НАР);
- ДТ – датчики температури травильного розчину;
- ДК – датчики концентрації кислоти;
- ДП – датчики щільності травильного розчину;
- НРГД – неймережевий регулятор тиску подачі ТР в ППЗ;
- ДС – датчик швидкості сталевої смуги;
- ЕП Ш – електропривод регулювання швидкості ходу сталевої смуги;
- ДРГК – дозуючий регулятор концентрації кислоти в травільних розчинах;
- ППЗ – підсистема попереднього зрошення дефектів;
- НРГТ – інтелектуальні нейронні регулятори температури ТР;
- ВКЕБ – високоефективний керований енергоблок;
- ППКВ – підсистема подачі кислоти та води;

За допомогою сигналів з виходів оптичних датчиків контур ППЗ забезпечує формування керуючих впливів на електроприводи регулювання прохідного перетину

форсунок ППЗ і виконує зрошення відповідної області дефекту травильним розчином з певним тиском. Керування тиском в соплах блоку ППЗ здійснюється через контролер ЕП з лінійним двигуном FESTO ESBF-LS-40-30-2.5P: подається струмовий сигнал в діапазоні 4-20 мА, що визначає зміщення штока клапана сопла. ЕП спроектований для спеціальних задач, що вимагають точних високошвидкісних переміщень між крайніми позиціями штока. Максимальна швидкість 4 м / с, хід штока 30 мм, час виходу в задану точку – за діаграмою, точність $\pm 0,1$ мм, інтерфейс D32 / RS485.

У якості оптичних датчиків (ОД) використано камери функціонального контролю FESTO SBOC-MR-1B-N [110], призначені для роботи в агресивних середовищах, з наступними характеристиками: дозвіл від 640x480 в кольорі до 1280x1024 пікселів (монохром), час експонування 0,04 ÷ 1,0 мсек, швидкість зйомки до 241 кадр / сек, тип датчика монохромний, підтримуваний протокол TCP / IP, з'єднувальний роз'єм Ethernet100 M12, швидкість передачі даних 100 Mbit / s. Структурна схема видів забезпечення автоматизованого модуля керування ППЗ наведена в Додатку Б (рис.Б.3).

У якості датчиків температури травильного розчину (ДТ) використано термоперетворювачі ПТ 9212 / RS, призначені для вимірювання і безперервного перетворення температури в цифровий сигнал по інтерфейсу RS485. Похибка вимірювань в діапазоні 0..100°C не перевищує $\pm 0,5\%$.

У якості датчиків вимірювання концентрації сірчаної кислоти (ДК) використовуються датчики щільності TP – ДТЩ-7А-31, що призначені для автоматичного контролю масової концентрації кислоти в розчинах. Для вимірювання щільності травильного розчину використано інтелектуальний датчик щільності ДТ301І (ДП), який компенсує температурні похибки вимірювань і має можливість віддаленого калібрування і контролю датчика через цифровий інтерфейс за протоколом HART.

Керування електроприводами, що регулюють швидкість руху полоси прокату (ЕПШ), здійснюється через 3 кВт частотні перетворювачі Siemens серії SINAMICS G110 типу 6SL3211-0AB23-0AA1, що мають в комплекті датчики швидкості (ДС).

У підсистемі подачі кислоти і води (ППКВ) дозуючий виконавчий елемент (ДРГК) реалізовано на базі 2/2-ходового електромагнітного клапана з розділовою

діафрагмою типу DL10 (339003). Корпус клапана виготовлений з поліпропілену, а ущільнюючим матеріалом є FPM-фторкаучук, що володіє підвищеною хімічною стійкістю, високою герметичністю, температурним діапазоном: -40°C до $+200^{\circ}\text{C}$.

Для реалізації інтелектуальних нейронних регуляторів температури травильних розчинів (НРТ) використано програмуємий логічний контролер PLC (Programmable Logic Controller) Simatic S7 серії S7-300 - спеціалізований мікропроцесорний пристрій з вбудованим апаратним і програмним забезпеченням, яке використовується для виконання функцій керування технологічним обладнанням. В пілотному проекті для керування ВКЕБ першої ванни БТА та автоматизованим модулем ППЗ використано багатоканальний контролер РТГ-2 (рис. 4.4), що був реалізований на базі мікропроцесора АТМega32.



Рисунок 4.4 – Контролер РТГ-2

Контролер реалізує нейромережевий алгоритм керування температурою ТР для стабілізації швидкості травління окалини, (представлено в розділі 3 даної роботи). Програмна модель прототипу контролера наведена в Додатку В.

Однак для імплементації нових математичних моделей (блоку нейромережевої моделі ідентифікації процесу, алгоритмів інтелектуального регулювання) і для реалізації додаткових функцій (керування насосними групами, організація бездротового каналу передачі даних та крізь промислові мережі зв'язку, як на рівні виконавчих пристроїв, так і на верхньому рівні АСК БТА) продуктивності виявилось явно недостатньо. Тому в ході налаштування ВКЕБ та ППЗ було випробувано

регулятор на базі мікроконтролера MSP432P401R [111], що реалізує інтелектуальне керування чотирма ДПЗ та насосними групами для підтримки температури ТР в кожній з травильних ванн. Типову схему включення регулятора до системи теплозабезпечення та блок-схему його архітектури наведено в [86].

Надалі в штатному режимі експлуатації передбачено застосування PLC з лінійки Simatic S7 серії S7-300 Siemens AG (рис. 4.5).



Рисунок 4.5 – PLC SIMATIC S7-300

З огляду на необхідність обробки аналогових сигналів обрано контролер S7-314C-2-DP. Для введення і виведення аналогових сигналів використовується восьмиканальний модуль аналогового вводу SM 331 з оптичною ізоляцією і тринадцятибітною шиною. Набір вбудованих технологічних функцій вирішує завдання швидкісного рахунку, вимірювання частоти або тривалості періоду, позиціонування, переведення частини дискретних виходів в імпульсний режим.

Інтерфейс автоматизованого робочого місця забезпечує взаємодію оператора БТА з АСК ТП, введення програм травління (коригування коефіцієнтів моделей), керування технологічними агрегатами, контроль параметрів ТП, індикацію готовності та стану систем, діагностику роботи обладнання БТА, збір та архівування виробничої інформації. Візуалізацію інтерфейсу БТА та етапи контролю оператором якості роботи регулятора тиску в ППЗ (обведено жовтим) представлено на рис. 4.6.

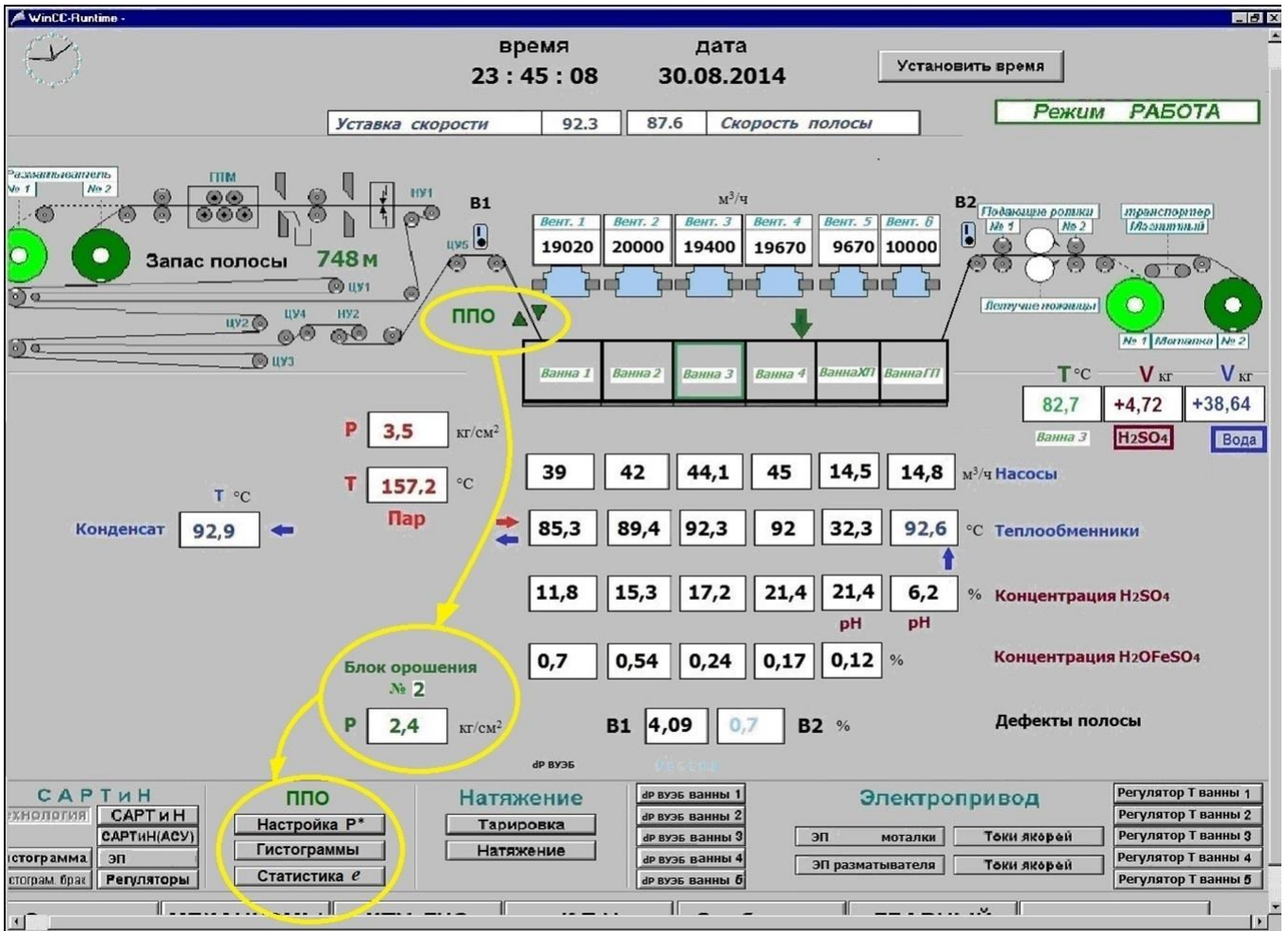


Рисунок 4.6 – Відображення мнемосхеми керування БТА

Для зчитування і формування дискретних сигналів використовується модуль SM 323 з гальванічною розв'язкою зовнішніх і внутрішніх ланцюгів, що містить вісім входів (24В) і вісім виходів (24В / 0.5А). Підключення до промислової мережі PROFIBUS-DP забезпечується модулем CP 342-5 FO з оптичним інтерфейсом і швидкістю передачі до 12 Мбіт / с. Програмне забезпечення контролера інтегроване із середовищем розробки HMI WinCC.

4.2 Інформаційна модель системи інтелектуального керування БТА

Керування БТА здійснюється по декількох незалежних контурах [9]:

- керування концентрацією TP (DR, C);
- керування температурою TP (NR, T), за завданням T* яке ідентифікує НАР (рис.4.3);
- стабілізація швидкості руху

сталевої смуги (FR, V(t)), яку визначає швидкість травління окалини $V = t_p = const$, що залежить в свою чергу від двох попередніх параметрів (C, T); – керування тиском ТР в соплах попереднього зрошення дефектів смуги (NR jets, P), завдання P^* якого ідентифікує нейромережева модель ППЗ; – керування дозаторами кислоти і води (DR, C) поповнення об'єму ТР.

Заретушовані на рис.4.7 блоки схеми інформаційної моделі системи інтелектуального керування БТА відображують вирішені в роботі завдання.

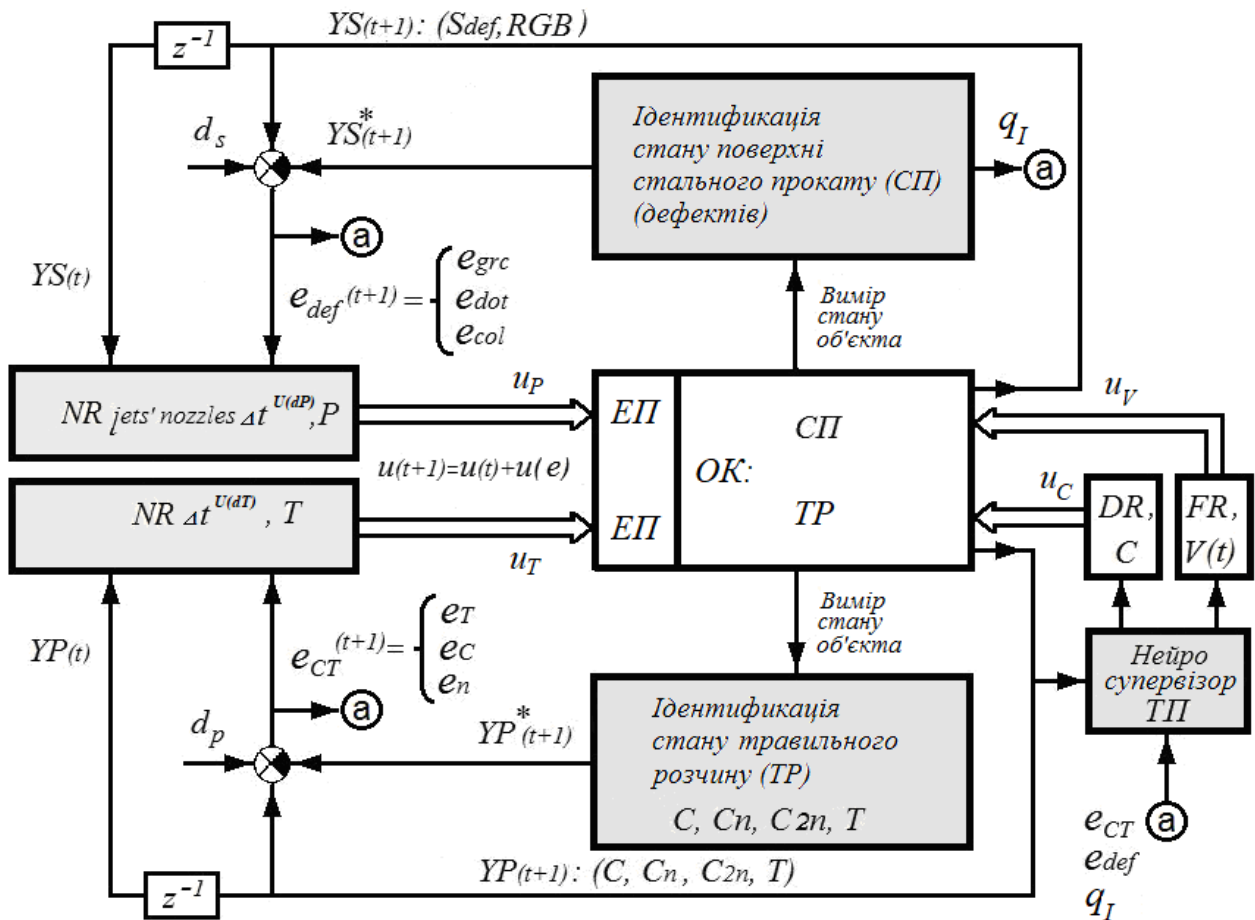


Рисунок 4.7 – Інформаційна модель АСК БТА

На рисунку позначено: $\Delta t^{U(dT)}$ – час подачі напруги, що керує ЕП регулятора витрати пари для підтримки температурного режиму ТР та стабілізації швидкості ТП; $\Delta t^{U(dP)}$ – час подачі напруги, що керує ЕП регулятора гідравлічного тиску в соплі попереднього зрошення; e_{def} – сумарна помилка травління усіх дефектів класів e_{grc} , e_{dot} , e_{col} , що враховує взаємовплив всіх факторів ТП, обчислювана за формулою:

$$e_{def} = e_{grc} + e_{dot} + e_{col} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N s_i \cdot \frac{\|Y(RGB)_{et} - Y(RGB)_i\|}{\|Y(RGB)_{et}\|}, \quad (4.1)$$

де e_{grc} – помилка травління жорстких оксидів сірої гами по краях рулону,

e_{dot} – помилка травління несистемних точкових дефектів,

e_{col} – помилка травління кольорових оксидних плівок по центру рулону,

S – загальна площа смуги, протравлена в період $(t+1) - (t)$,

s_i – сумарна площа дефектів з відхиленнями RGB_i від колірного еталона RGB_{et} ,

e_{CT} – сумарна помилка керування параметрами ТР:

e_T – помилка відхилення температури ТР від оптимальної,

e_C – помилка відхилення концентрації ТР від оптимальної,

e_n – помилка відхилення концентрації суміші мультігідратів сульфату заліза в ТР від оптимальної,

C_{2n} – концентрація моногідрату сульфату заліза в ТР в момент $(t+1)$,

$YP^*_{(t+1)}$ – вихідний вектор завдань оптимальних значень параметрів ТР: C, C_n, C_{2n}, T , ідентифікованих АСК в момент часу $(t+1)$, для формування регулятором температури ТР керуючого сигналу u_T з тривалістю $\Delta t^{U(dT)}$ з моменту $(t+1)$.

$YP^*_{(t)}$ и $YP^*_{(t+1)}$ – реальні параметри ТР: концентрації C, C_n, C_{2n} , ідентифіковані нечітким аналізатором-класифікатором та T – температура ТР в моменти t и $(t+1)$ відповідно. Сигнали стану ТР в момент часу $(t+1)$ беруться з виходу ОК і надходять на вхід суматора, на віднімаючий вхід суматора надходить на вихід ідентифікаційної моделі ОК, на третій вхід суматора надходять перешкоди вимірювань параметрів ТР d_p . На виході суматора формується помилка відхилення стану травильного розчину $e(t+1)$. Ця помилка та помилка з попереднього такту $e(t)$ після елементу затримки z^{-1} , надходять на вхід нейромережевого регулятора, який керує температурою ТР і в нейросупервізор процесу.

Сигнал стану поверхні СП $YS_{(t+1)}(S_{def}, RGB)$ в момент часу $(t+1)$ береться з виходу оптичного аналізатора і надходить на вхід суматора. На віднімаючий вхід

суматора надходить вихід ідентифікаційної моделі об'єкта $YS_{(t+1)}^*$, на третій вхід суматора надходять перешкоди вимірювань параметрів d_s . На виході суматора формується помилка відхилення стану поверхні часу $e_{def}(t+1)$. Ця помилка та помилка з попереднього такту $e_{def}(t)$ після елемента затримки z^{-1} , надходять на вхід нейромережевого регулятора, який керує тиском розчину в ППЗ, і в нейросупервізор процесу.

$YS^*(i, (x_1, x_2, y_1, y_2), P(t), RGB(t+1), P(t+1), sign(U_{dp}(t+1)), \Delta t^{U(dp)} = t_2 - t_1$ – вихідний вектор значень параметрів регулятора попереднього координатного зрошення (ППЗ): тривалість часу $\Delta t^{U(dp)}$ подачі тиску P_i на i -е зрошувальне сопло ідентифікованих для подачі в момент керуючого сигналу u_p на електропривод регулятора тиску подачі ТР.

$YS(t)$ и $YS(t+1)$ – параметри дефектів поверхні, що ідентифіковані ШНМ класифікатором (відносні координати, колір) в моменти (t) і $(t+1)$ відповідно.

u_T – керуючий сигнал на електропривод регулятора подачі теплоносія,

u_V – керуючий сигнал регулювання швидкості, що подається на електропривод змотувача,

u_C – керуючий сигнал в підсистему подачі кислоти та води (ППКВ) дозаторам кислоти і води для поповнення обсягу ТР, що формуються після отримання сигналу від нейросупервізора ТП,

d_s, d_p – помилки вимірювань (збурення) при інтелектуальної ідентифікації дефектів смуги і складу травильного розчину.

Помилки $e_{grc}, e_{dot}, e_{col}$, оцінювані в тимчасових вікнах і представляють собою залишки відхилень в контурах керування ТП, адекватно відображають швидкість реакції ОК на дії АСК і служать інформацією для оперативного контролю якості.

Превищення загальної помилки e_{def} регламентованої величини E_{def} , за період більший всановленого часового вікна, свідчить про розрегулювання в ТП. При відсутності додаткової інформації про вихід з режиму в якомусь з контурів керування здійснюється аналіз складових e_{def} . Якщо $e_{grc} > E_{grc}$ це може свідчити про: недогрів ТР, невідповідність концентрації ТР необхідному рівню, невірне формування завдань

тиску в форсунках, розташованих по краях рулону прокату. Якщо $e_{col} > E_{col}$ це свідчить про: недогрів ТР або невідповідність концентрації ТР завданню., невірне формування завдань тиску в форсунках, розташованих по краях рулону прокату. Якщо $e_{dot} > E_{dot}$ – невірне формування завдань тиску в ППЗ. Множину цих ЛПК доцільно систематизувати в вигляді ШНМ

На підставі аналізу залишків нейросупервізор виявляє нештатні ситуації, стани системи близькі до аварійних, і формує сигнали, які ініціюють контури керування; якщо залишки перевищують заданий рівень протягом певного періоду часу – коригує еталонні моделі ідентифікації, що формують поточні завдання. Доцільно зформувати інтегральний індекс якості – q_I що буде індикативно інформувати про відхилення в контурах керування при підвищенні регламентного показника – q_R допустимих забруднень поверхні прокату після травління. У випадку $q_I \geq q_R$ буде проводитися ретельний аналіз залишкових дефектів поверхні прокату за класами по оцінках e_{grc} , e_{dot} , e_{col} , а також середніх значень і відхилень помилок для діагностики якості керування в різних контурах.

4.3 Нейромережевий супервізор системи інтелектуального керування БТА

При виконанні ТП, завдяки впливу нестаціонарних збурень, параметри можуть сягати критичних меж, хоча самі ці межі критичних станів і алгоритми виходу з них можуть бути описані досить прозорими моделями та задані чіткими регламентами. Для розв'язання задач підтримки вихідних параметрів ТП в регламентованих межах, за умови дії нестаціонарних збурень, існує ряд ефективних рішень [112]. Стійкість керованої системи забезпечується за рахунок використання супервізора R_{NNS} на основі ШНМ – моделі в допомогу основному регулятору $R1$ контура керування $C1$ (або групи регуляторів R_n , які здійснюють керування об'єктом по незалежних контурах C_n). Супервізор відстежує стан і входи об'єкта керування. Якщо стан системи під впливом збурення d виходить за встановлені межі M_x (стає потенційно небезпечним), то супервізор запускає стабілізуючу дію v_2 , щоб повернути об'єкт в

область допустимих станів M_0 . Якщо результат виконання стабілізуючої дії незадовільний, то сигнал v_1 здійснює відключення вхідного сигналу u_1 .

Схему керування БТА, прототип якої наведено в [113], представлено на рис.4.8.

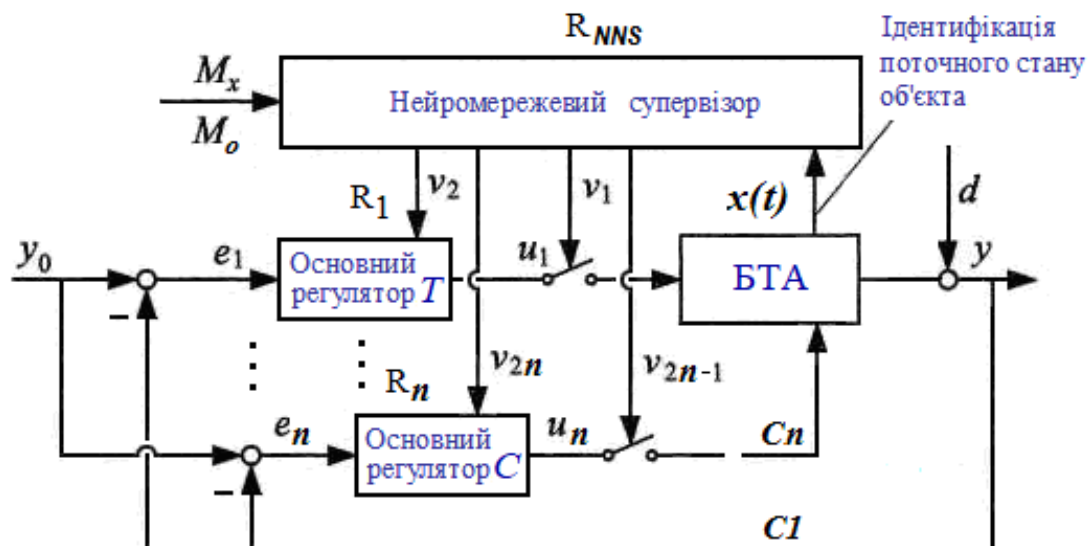


Рисунок 4.8 – Нейромережевий супервізор забезпечення стійкості керування нелінійними системами.

Супервізор відстежує стан і входи об'єкта керування. Якщо стан системи під впливом збурення d виходить за встановлені межі M_x (стає потенційно небезпечним), то супервізор запускає стабілізуючу дію v_2 , щоб повернути об'єкт в область допустимих станів M_0 . Якщо результат виконання стабілізуючої дії незадовільний, то сигнал v_1 здійснює відключення вхідного сигналу u_1 .

Підхід, заснований на використанні основного регулятора (ОР) і супервізорного регулятора, що дозволяє здійснити стабілізацію систем нейронечіткого керування нелінійними об'єктами деяких класів, описано в [113], де під поняттям стійкості приймається, що стан системи не виходить за встановлені межі. До побудови нейромережевого супервізора (НС) нелінійного об'єкта, що формує впливи $v_i, i=1, \dots, 2n$, можна підійти засновуючись на методах теорії нейронних мереж і нечітких систем.

Метод розробки супервізора запропоновано в [114], де дається прозоре доведення і методика перевірки стійкості системи керування для випадку невідомої

моделі об'єкта. НС забезпечує стійкість керування БТА, що є нелінійним об'єктом, який узагальнено можна представити рівнянням:

$$x^{(n)} = f(x) + g(x)u, \quad (4.2)$$

де $x \in \mathfrak{R}$ — вихід об'єкта, а $u \in \mathfrak{R}$ — його вхід. Вектор стану БТА $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ можна обчислити або виміряти, а f, g — нелінійні функції. Прийmemo, що ОР реалізує керування $u_r(x)$, а межа M_x задає ті стани об'єкта, які можна вважати безпечними і стійкими. Момент активації НС залежить від значення M_x , що визначається співвідношенням:

$$M_x : |x(t)| \geq M_x, \quad \forall t \geq 0, \quad (4.3)$$

де $|x(t)|$ — модуль вектора стану.

Вхідний сигнал даного об'єкту визначається виразом

$$u = u_r(x) + I \cdot u_s(x), \quad (4.4)$$

де функція ініціалізації I впливу на ОР визначається у вигляді:

$$I(x(t)) = \begin{cases} 1, & \text{if } |x| \geq M_x, \\ 0, & \text{if } |x| < M_x. \end{cases} \quad (4.5)$$

При цьому u_s позначає сигнал, що формується супервізором.

Щоб обґрунтувати стійкість системи такого роду, приймають, що відомі значення верхньої межі f^u функції f і нижньої межі g_l функції g . Вимоги для функцій f^u і g_l визначаються співвідношеннями:

$$\begin{aligned} f^u(x) &: f(x) \leq f^u(x), \\ g_l(x) &: 0 < g_l(x) \leq g(x). \end{aligned} \quad (4.6)$$

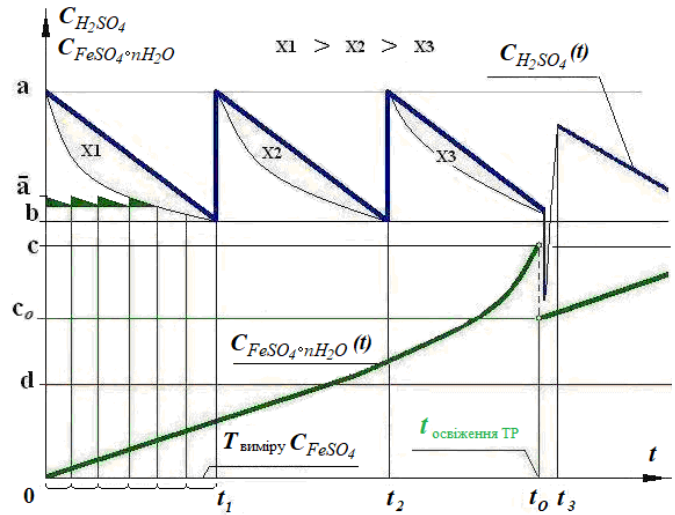
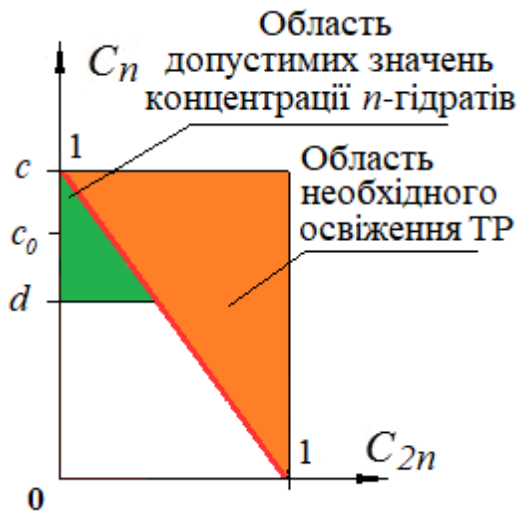
У випадку БТА визначено тільки загальний вигляд $g(x)$, а під час ТП функція приймає невідомі заздалегідь значення. Побудова функції ініціалізації $I(x(t))$ при нелінійно пов'язаних f, g в аналітичному вигляді класичними методами представляється складним завданням, але значно спрощується при використанні апарату ШНМ. Функція I , що активує супервизор, перемикає сигнал u_s між значеннями «включено» і «вимкнено», якщо стан об'єкта досягає межі області допустимих значень $|x| = M_x$. З цієї причини в області стану M_x можуть виникнути періодичні коливання. Для запобігання виникнення цих коливань форма функції ініціалізації I^* визначається співвідношенням:

$$I^* = \begin{cases} 0, & \text{if } |x| < a, \\ \frac{|x| - a}{M_x - a}, & \text{, якщо } a \leq |x| < M_x, \\ 1, & \text{if } |x| \geq M_x, \end{cases} \quad (4.7)$$

де параметр a враховує час переходу об'єкта в область допустимих станів і задається розробником системи. Умова $a \ll M_x$ означає, що вплив керуючого регулятора на об'єкт буде частим, але помірним за величиною. Якщо значення параметра a близьке до M_x , тоді керуючий регулятор буде впливати на об'єкт досить рідко, але по величині ці дії будуть значними.

Функція $g(C, C_n, C_{2n})$ обмежена поверхнею $g(\tilde{a}, c, c_{2n})$ (рис.4.9), та $b \leq f(c) \leq a$ – відповідно до умов (4.6) і згідно регламенту.

Вектор вхідних даних (навчальні пари) формуються 1 раз на 40 хвилин, отримуючи дані від датчиків кислотності і нечіткого аналізатора складу розчину (НАР), тому модель можна вважати статичною. При перевищенні загальної концентрації мультигідратів сульфату заліза в ТР – $C_n = X + C_{2n}$, (де X – концентрація мультигідратів виду $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ і $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) з урахуванням змісту моногідрату сульфату заліза – C_{2n} , негайно проводять освіження [64], що в нормованому вигляді представлено на рис.4.9(б).



(а) Подання області допустимих станів концентрацій n -гідратів C_n і моногідрату C_{2n} сульфату заліза в ТР в 1-й ванні

(б) (b; а) - допустимий і (b; ã) - робочий інтервали $C_{H_2SO_4}$ в ТР; c – верхній і d – нижній рівень C_n станів концентрацій $FeSO_4 \cdot nH_2O, n = 1,4,7$

Рисунок 4.9 – Области допустимих станів травильного розчину

НС БТА побудовано на базі багатошарового перцептрон (БП) структурою 4-8-2 (рис.4.10).

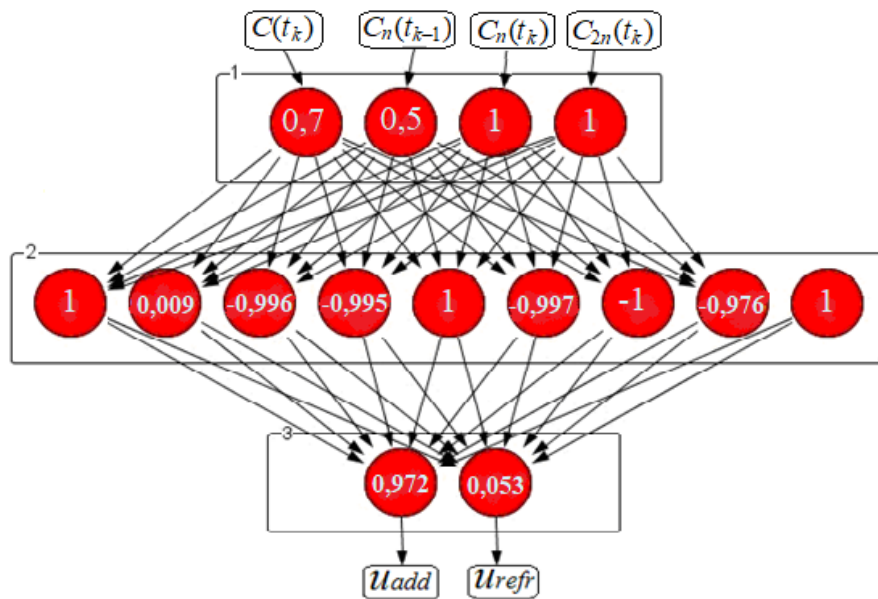


Рисунок 4.10 – Неймережевий супервізор БТА

Для врахування динаміки впливу змін загальної концентрації мультигідратів сульфату заліза в ТР виміри цього параметру присутні на вході в БП з затримкою на такт: $C_n(t_k)$ та $C_n(t_{k-1})$. БП з тангенціальними активаційними функціями 1-го і 2-го шарів і сигмоїдальною – в вихідному шарі, де додаткові нейрони 2-го і 3-го шарів є граничним зміщенням у формулі (3.54), і пошарово обчисленими векторами вагових коефіцієнтів w^* , має чотири входи: $(C(t_k), C_n(t_k), C_n(t_{k-1}), C_{2n}(t_k))$ і два виходи: u_{refr} та u_{add} .

Виходи ініціюють керуючі сигнали при межових значеннях: $u_{add} = 1$ – збільшення концентрації ТР; при $u_{refr} = 1$ відбувається зупинка подачі смуги на травління і освіження ТР; при $u_{refr} = 1$ і $u_{add} = 1$ відбувається зупинка подачі смуги на травління і повна заміна ТР. Досягнення u_{refr} та u_{add} заданих регламентованих значень, наприклад 0.9, приводить в дію регулятори, ВМ певних контурів, та відображується на АРМі оператора.

Включення НС в АСК узгоджує функціонування основних регуляторів. НС оперативно обробляє дані про поточні відхилення параметрів різних контурів ТП. Застосування супервізора спрощує структуру АСК, забезпечує можливість відмовитися від багатьох досить жорстких обмежень, які випливають із критеріїв стійкості, обійти такі дестабілізуючі явища, як нелінійність, зони нечутливості, коливання, гістерезис і т. д. Це дає можливість проектувати регулятори основних контурів керування з кращими характеристиками регулювання (коефіцієнтом посилення), що забезпечує більшу стійкість системи в цілому.

4.4 Дослідження стійкості роботи інтелектуальної цифрової системи регулювання температури травильного розчину

Приведення безперервного регулятора температури травильного розчину до дискретної форми проводилося в пакеті ScieLab з використанням фіксаторів нульового і першого порядку з різними кроками квантування: 0.05, 0.1, 15с.

Аналіз стійкості системи, керованої ШНМ, є нетривіальним завданням. В роботі застосовано метод «наслідуючого нейрокерування» [96], тому процес регулювання температури ТР може бути еквівалентно промодельований роботою

еталонного ПІ-регулятора витрат теплоносія з відповідними параметрами (п.3.2), на базі якого було здійснено навчання, а в подальшому – доналаштування ШНМ. Безперервний регулятор температури ТР у дискретній формі наведено на рис.4.11.

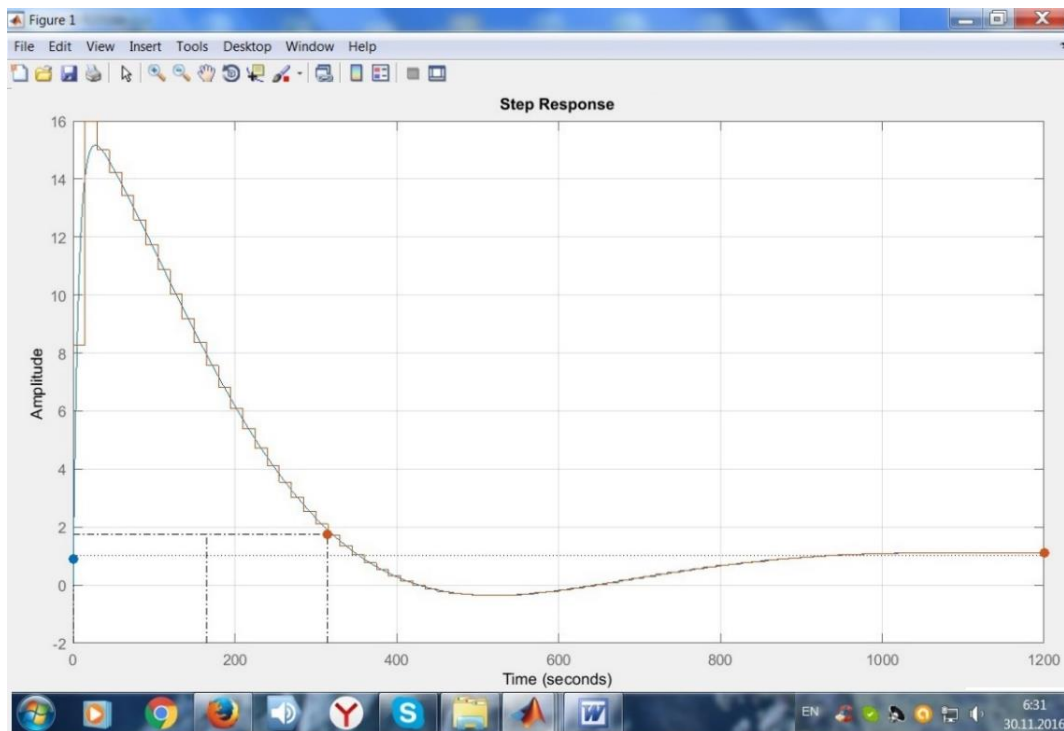


Рисунок 4.11 – Відгук системи при $T = 15c$

Крок квантування T може бути обраний за допомогою теореми Котельникова, згідно з якою безперервна функція відновлюється без спотворень за дискретною функцією, якщо між частотою повторення імпульсів ω_0 і максимальною частотою спектра безперервної функції ω_m виконується умова $\omega_0 \leq 2\omega_m$.

Нижче наведено обраний в результаті експерименту варіант стійкої системи з фіксатором першого порядку і періодом квантування $T = 0.1c$, що задовольняє вимоги ТП.

Матриці рівнянь стану і виходу аналогового регулятора були визначені за моделлю:

```
F6m_discrete1=c2d (F6manalog_T06lim4Mod, 0.1, 'tustin')
```

```
F6m_discrete1 =
```

```
A =
```

	x1	x2	x3
x1	0.9999	0.007692	0.1538

$$x2 \quad -5.574e-06 \quad 1 \quad -4.288e-07$$

$$x3 \quad -0.0006319 \quad 0.09231 \quad 0.8461$$

B =

u1

$$x1 \quad 0.1021$$

$$x2 \quad 0.01081$$

$$x3 \quad 1.225$$

C =

x1 x2 x3

$$y1 \quad -0.0005266 \quad 0.07692 \quad 1.538$$

D =

u1

$$y1 \quad 1.021.$$

Далі визначається передавальна функція (ПФ) системи (цифрового регулятора) в формі полінома:

```
>> WzT01=tf(F6m_discrete1)
```

WzT01 =

$$\frac{1.021 z^3 - 1.02 z^2 - 1.021 z + 1.02}{z^3 - 2.846 z^2 + 2.692 z - 0.8461}$$

і в формі «нулі / полюси / коефіцієнт посилення»

```
>> WzpkT01=zpk(F6m_discrete1)
```

WzpkT01 =

$$\frac{1.0212 (z-1) (z-0.9992) (z+1)}{(z-0.8467) (z^2 - 1.999z + 0.9993)}.$$

Діаграми Бодє [88, 91] для визначення запасів стійкості цифрової системи представлені на рис 4.12. Замкнута цифрова система стійка, тому що всі полюси її ПФ WzpkT01 (z) розташовані на z-площині всередині кола з одиничним радіусом.

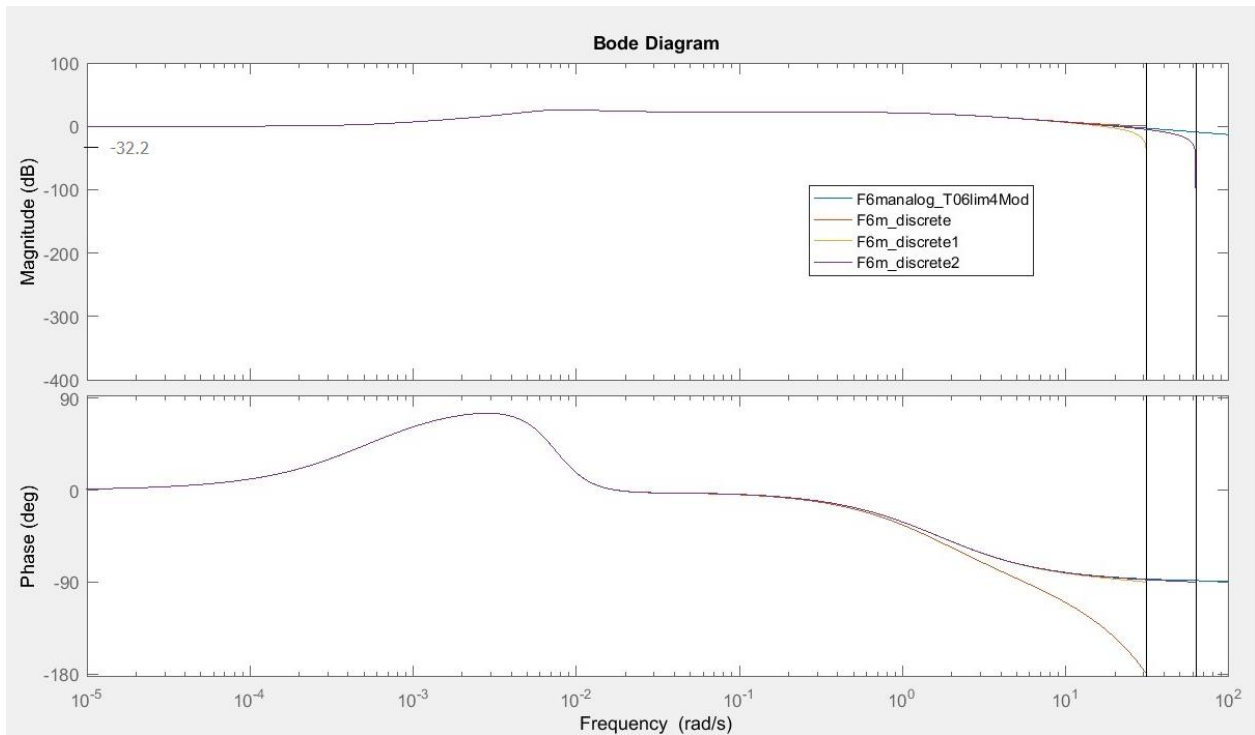


Рисунок 4.12 – Діаграми Бode

Система стійка, тому що всі полюси $WzpkT01(z)$ відповідають цій вимозі: $z_0=0.8467$, $z_{12} = 0.9995 \pm 0.0173i$. Полюси знайдені за процедурою:

```
>> q = [1 -1.999 0.9993];
>> z12 = roots(q).
```

Зменшення кроку квантування наближає полюса моделі до кордону в одиничному колі, послаблюючи стійкість, або переміщує полюса за одиничну окружність.

Для безперервної моделі - F6manalog_T06lim4Mod; для дискретних моделей: F6m_discrete з 0-фіксатором при $T = 0.1$; з фіксатором 1-го порядку при $T = 0.1$ – F6m_discrete1 та при $T = 0.05$ – F6m_discrete2.

```
>>bode(F6manalog_T06lim4Mod,F6m_discrete,F6m_discrete1,F6m_discrete2)
>>step(F6manalog_T06lim4Mod,F6m_discrete,F6m_discrete1,F6m_discrete2)
```

Запас по модулю становить $G_m = 32.2dB$ при 50.1 рад / с, запас системи по фазі не визначений.

```
>> eq = 20*log10(K) - 32.2; solve (eq, K)
```

>> $K=40.378$ – число, на яке необхідно помножити загальний коефіцієнт посилення системи, щоб система досягла критичного стану і вийшла з області

стійкості. Для дискретних систем кінцева точка діаграми відповідає частоті $\omega = \omega_T/2$, де $\omega_T = T^{-1}$. Дана точка відповідає $z = -1$.

Витратами теплоносія підтримується T^* – завдання по температурі для підтримання активності ТР. В Додатку Б (рис.Б.4 – Б.7) представлено графіки динаміки регулювання витрат теплоносія для різних періодів моделювання. Кольори ліній графіків відповідають позиціям входів – виходів моделі системи на рис.(3.8).

Час переходу ТП в сталий режим є випадковою величиною з математичним очікуванням ≈ 1000 с. Максимальне значення потоку теплоносія в моделі ПІ-регулятора лімітовано коефіцієнтом посилення 4.25, що відповідає найбільшому потоку пари крізь ДПЗ – 3.25Мкал за 1с. Розроблене в п.3.2 сімейство ПІ-регуляторів температури ТР справляється належним чином з наявністю параметричних невизначеностей ТП (шуми вимірювань, інерційність керування), однак є досить громіздким у обчислюваннях та потребує КТЗ для уникнення перерегулювання. Це зумовило синтез РБМ і її застосування в якості нейронного регулятора, що дозволило суттєво (з 7.246 до 6.700 МВт) знизити енергоємність процесу [55]. На рис. 4.13 наведено графіки споживання теплової енергії БТА:

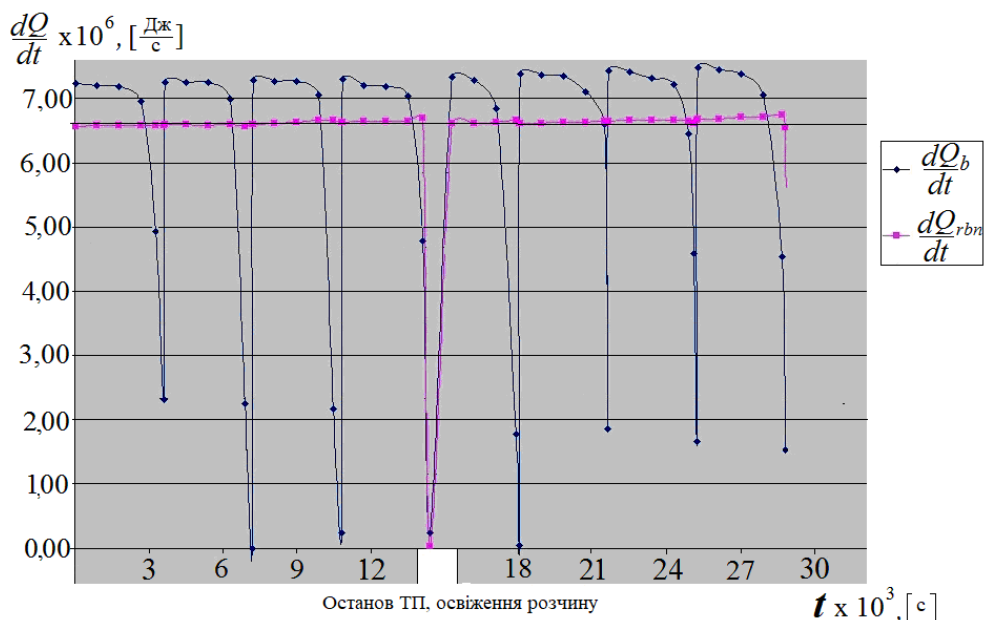


Рисунок 4.13 – Графіки споживання теплової енергії БТА

На рис.4.13 позначено: $\frac{dQ_b}{dt}$ – споживання теплової енергії БТА перед модернізацією системи керування тепlopостачанням;

$\frac{dQ_{rbn}}{dt}$ – після застосування ідентифікаційної радіально-базисної мережі

оптимальних параметрів ТП.

Модифікація структури системи автоматизованого керування БТА та застосування ВКЕБ – високоефективного енергоблоку непрямого нагріву ТР на базі ПТА, керованого з використанням інтелектуальних методів, суттєво знизили теплоспоживання, ресурсоспоживання процесу та утворення солевих шламів, що підлягають утилізації. На рис. 4.14 означено: теплоспоживання при застосуванні ПП-регулятора – $E_{ТПІ}$; $E_{ТАNN}$ – при застосуванні РБМ- регулятора.

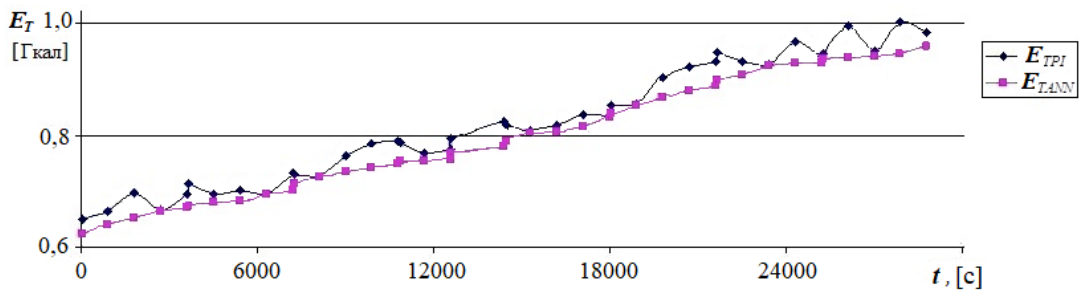


Рисунок 4.14 – Експериментальні дані теплоспоживання 1-ї ванни

Графіки витрат сірчаної кислоти БТА наведені на рис.4.15 , де позначено:

$\frac{dG_b}{dt}$ – споживання сірчаної кислоти до використання RBFN моделі

ідентифікації оптимальних значень T^* , C^* при заданому t_p ;

$\frac{dG_{rbn}}{dt}$ – після модернізації системи керування тепlopостачанням.

Автоматизація процесу регулювання температури ТР в травильних ваннах з метою стабілізації його активності та тиском попереднього зрошування дефектів дозволила зменшити технологічні витрати сірчаної кислоти на 21,5% (з 997 кг H_2SO_4 при нормативі 1270 кг на годину). У відповідних пропорціях зменшилися споживання технічної води та утворення солевих шламів, що підлягають утилізації, енергетичне навантаження на відділення регенерації сірчаної кислоти.

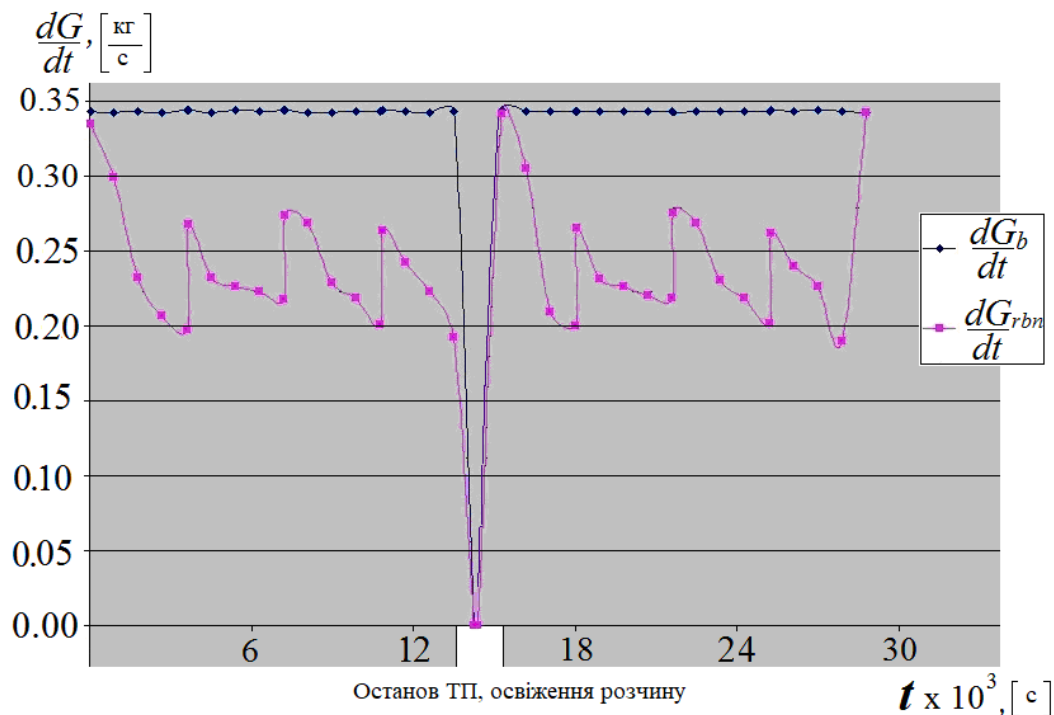


Рисунок 4.15 – Графіки споживання сірчаної кислоти БТА

4.5 Критерії оптимальності функціонування модифікованої системи керування процесом травління полосового прокату.

В процесі роботи БТА реалізуються дещо суперечливі цілі: досягнення максимальних показників очищення поверхні сталевого прокату, швидкості травління і продуктивності агрегату в цілому – з одного боку, і мінімізація ресурсних і енергетичних витрат – з іншого. БТА містить велику кількість факторів, що впливають на ТП і складно визначити, який саме з них в даний момент має найбільш вагомий вплив. Тому синтез критерію оцінки якості керування ТП та прогнозування стану агрегату є важливим аспектом функціонування системи керування.

Для зменшення розмірності критерію якості роботи всього БТА при параметрах C, C_n, T , що повільно змінюються, можна представляти чотири травильні ванни як єдиний об'єкт, а вплив параметрів ТР враховувати інтегральною, зваженою або усередненою оцінкою [115].

Такі допущення дозволяють застосувати скалярний адитивно-мультіплікативний критерій з кластеризацією факторів загальною кількістю f^m за значимістю, що враховує їх груповий взаємний вплив на перебіг стану ТП [116, 117].

$$C_{AMc} = \sum_1^4 \left[\sum_{j=1}^{f^{Im}} \lambda_j^{Im} c_j + \prod_{j=f^m-f^{Im}+1}^{f^{Ad}} c_j^{\lambda_j^{Ad}} \right] + \prod_{j=f^m-f^{Im}-f^{Ad}+1}^{f^{Ins}} c_j^{(1/\lambda_j^{Ins})} \rightarrow \min, \quad (4.8)$$

$$\text{де } f^{Im} + f^{Ad} + f^{Ins} = f^m, \lambda_j \neq 0, \forall j = \overline{1, m}$$

де f^m – кількість факторів c , що враховуються системою; f^{Im} – група значущих факторів, які необхідні для наочної оцінки функціонування процесу травління; додаткові фактори f^{Ad} підвищують адекватність моделі оцінки реального ТП, використання незначних – f^{Ins} , – підвищує чутливість і повноту критерію для оцінки примірника стану реальної системи. Підхід до деталізації факторів та експертні процедури, за якими визначають коефіцієнти c, λ наведено в [117].

Відзначимо, що дві перших складових враховуються для кожної з 4-х травильних ванн. Практично, кількість факторів визначають $|f^m| = 5 \div 7$.

Основним критерієм якості очищення поверхні сталевий смуги є залишки після травління трьох видів дефектів: e_{grc} – смугові по краю, e_{dot} – точкові НД і e_{col} – кольори мінливості в середині рулону, таким чином, $|f^{Im}| = 3$. Їх загальне значення пропонується оцінювати за допомогою безрозмірного інтегрального індексу якості очищення поверхні [55]:

$$q_I = \frac{\sum S_i^{Out} \delta_i}{\sum S_j^{In} \delta_j}, \quad (4.9)$$

де в чисельнику і знаменнику представлені сумарні показники площі S та оцінки товщини дефектів δ по кожному з видів на виході і вході в БТА відповідно. Перевищення регламентованої величини ($q_I \geq q_R$) свідчить про відхилення, та потребує ретельного аналізу за видами дефектів для подальшої корекції параметрів керування в контурах. Індекс забрудненості, нормовану оцінку площі дефектів $e_{Out} = f(Y, D^m)$ в момент часу $t+1$ на виході з БТА запропоновано оцінювати згідно (4.1) наступним чином:

$$e_{out} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N s_i * \frac{\|Y(RGB)_{et} - Y_i(RGB(t))\|}{\|Y(RGB)_{et}\|}, \quad t \in (t; t+1], \quad (4.10)$$

де $\frac{1}{S} \sum_{i=1}^N s_i$ – сума скалярних множників питомої площі та відхилень оцінок

[118] відтінків N дефектів від еталону якості, ідентифікованих і оброблених на загальній площі прокату S за фіксований період часу $T = (t, t+1]$. Накопичення відхилень здійснюється в тимчасовому «вікні спостережень» ($n=10T$). В якості оцінок c_j в групі факторів f^{lm} прийняті безрозмірні коефіцієнти наявності трьох видів дефектів на виході з БТА, обчислені за формулою (4.10).

Нормовані оцінки C, C_n, T в групі факторів $|f^{Ad}| = 3$ прийняті як:

$$c_j^{Ad} = \frac{|c_j - c_j^{opt}|}{c_j^{opt}}, \quad (4.11)$$

де c_j^{opt} – «найкращі» за регламентом, оптимальні для поточного стану ТР значення величин параметрів C, C_n, T ; c_j – їх поточні значення, що вимірюються не менш одного разу за період часу $T = (t, t+1]$.

Задавана регламентом постійна швидкість змотування V смуги, що визначається продуктивністю лінії для певного сортаменту, визначена як доповнюючий фактор $|f^{Ins}| = 1$, прийнята $\lambda^{Ins} = 0.5$ і нормована аналогічним до (4.11) чином. Накопичення відхилень по кожному з f^m факторів здійснюється в тимчасовому «вікні спостережень» ($n=10T$).

Оптимальне значення критерію $C_{AMc}^{opt}(c_j^{RBN}(t))$ для поточного моменту визначається за допомогою ШНМ за поточними значеннями параметрів ТП. Відхилення $\Delta C_{AMc} = C_{AMc}^{opt} - C_{AMc}(t)$ обмежено допустимою регламентом величиною помилки ε . У разі $\Delta C_{AMc} \geq \varepsilon$ діагностується збійна (позаштатна) ситуація ТП, вектор значень параметрів поточного стану системи передається нейромережевому

супервізору, який за результатами обробки інформації ініціює сигнали дій відповідним регуляторам: нагрів ТР, часткове або повне освіження ТР, корекція еталонної моделі блоку керування тиском ТР.

Зріз моделі $f(C, C_n, T)$, редукованої за регламентованою швидкістю травління $t_p = const$, ідентифікує температуру, необхідну для забезпечення заданої швидкості процесу при зміні значень поточних параметрів, і передає значення $T^*(k)$ як завдання регулятору витрати теплоносія в k -й момент часу. Отримана в розділі 2 RBF-мережа визначає оптимальні параметри ТР при регламентних обмеженнях по зрізу (T, C) , і підтримці швидкості травління на заданому рівні $t_p = const$. Задана стратегія ТП травління холоднокатаної сталі полягає в поступовому підвищенні температури в ваннах до максимальної межі (до 85°C - в 1-й ванні, до 95°C - в 2,3-й ваннах, до 92°C - в 4-й), що компенсує зниження C без додавання кислоти. На рис.4.16 наведено приклад для $t_p^* = 38\text{s}$ і $C_n = 5\%$. Множина пар оптимальних значень (T, C) розташована на кривій червоного кольору. При зменшенні C в ході ТП з 10% до 8% (без підтримки C на верхній межі регламенту) оптимальна температура ТР для регламентованої швидкості травління $t_p^* = 38\text{s}$ і поточному значенні мульгидратів в ТР $C_n = 5\%$ становитиме $T^* = 93^\circ\text{C}$, що є завданням для регулятора температури.

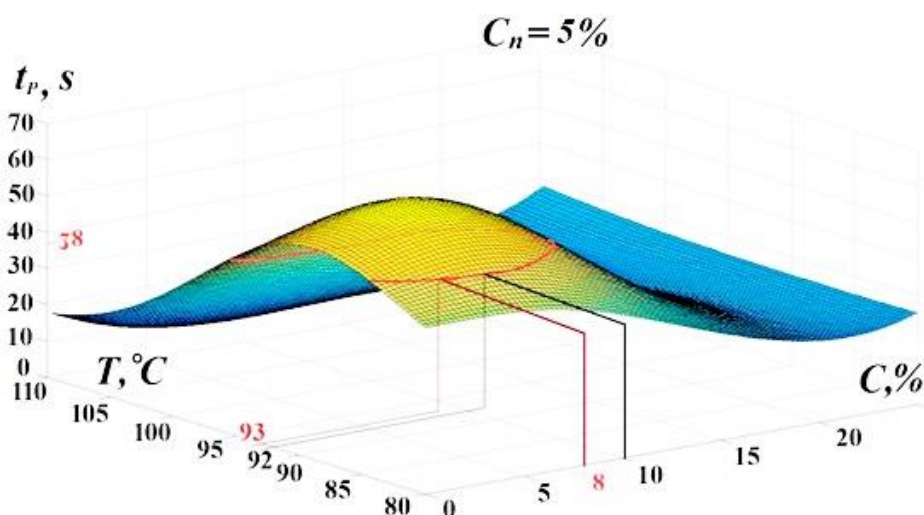


Рисунок 4.16 – Множина пар оптимальних значень (T, C) для $C_n = 5\%$, $t_p^* = 38\text{s}$

Критерій керування параметрами пропонується привести до стандартної вартісної форми, що враховує операційні витрати, введенням скаляра нормованих

коефіцієнтів питомих витрат B і ваг значущості α на зміну кожного з керованих параметрів ΔX : ΔT – зміна температури ТР, ΔC – зміна концентрації ТР, ΔC_n – зміна концентрації солей у ТР, ΔV – зміна швидкості змотування смуги. У загальному випадку при формуванні поточних завдань регуляторам у вигляді (T^*, C^*, C_n^*, V^*) необхідно вирішувати наступну оптимізаційну задачу [119]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \arg \min_x t_p \\ \text{for } B_1 \cdot \alpha_1 \cdot \Delta T + B_2 \cdot \alpha_2 \cdot \Delta C + B_3 \cdot \alpha_3 \cdot \Delta C_n + B_4 \cdot \alpha_4 \cdot \Delta V \rightarrow \min \end{array} \right., \quad (4.12)$$

Ваги значущості α визначаються з урахуванням перехресного впливу параметрів ΔX згідно експертної процедури, наведеної в [116].

4.6 Оцінювання якості керування процесами травління

Будь-яка системна помилка керування є наслідком невиконання якимось із елементів системи керування своєї функції в ній належним чином. Це результат дефектності елемента і, як наслідок, зниження можливості системи виконувати своє призначення. Тому пошук «помилки» – це виявлення дефектного елемента і визначення, як саме він знижує ефективність системи. Діагностика починається з аналізу процесів функціонування підсистем: які процеси забезпечують виконання системою свого призначення в цілому, які з них діють в холосту або навіть прямо гальмують інші процеси. Потім визначають, який саме елемент – ініціатор негативного впливу і як саме він впливає на кінцевий результат.

Оцінювання якості роботи контурів регулювання процесів травління холоднокатаної листової сталі може бути засноване на аналізі середніх значень і відхилень залишків (помилки керування) [120]. Залишки визначено, як різницю між заданим (оптимальним) та реальним значеннями керованих параметрів керуючих контурів [121]. Кореляція між якістю продукту і помилками керування (залишками), що визначається відповідним коефіцієнтом, може бути використана для оцінювання якості роботи контурів керування БТА [122]: контуру регулювання параметрів ТР в травильних ваннах і контуру керування блоком попереднього зрошення дефектів поверхні сталюного прокату.

Якщо відхилення залишків на деякому часовому інтервалі перевищує встановлений поріг, то діагностується позаштатна ситуація (ПС), яка може виникнути або як результат невідповідності моделі (закону керування) реальному ТП, або в результаті аварії. Рисунок 4.17 ілюструє принцип виявлення та діагностики позаштатних ситуацій, а також оцінювання якості керування процесом, відповідно до значущості залишків.

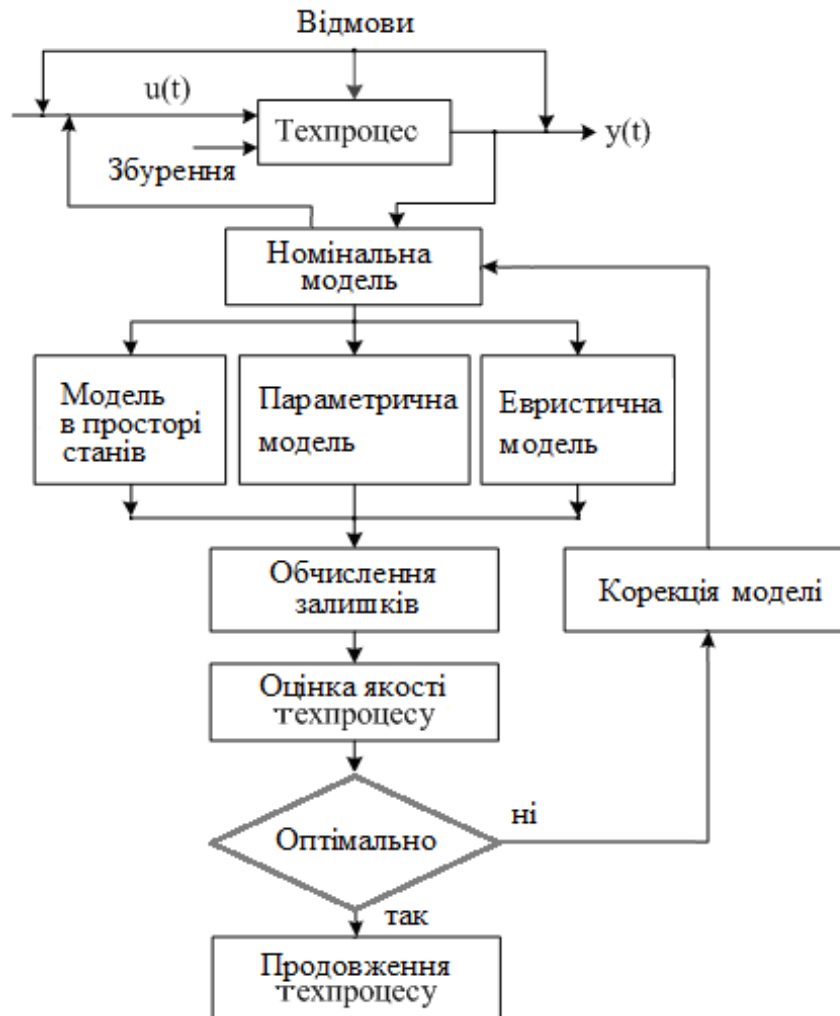


Рисунок 4.17 – Принцип оцінювання якості з використанням залишків

Побудова процедури виявлення позаштатних ситуацій (ВПС) на першому етапі передбачає отримання даних від датчиків і моделей, та їх попередню обробку для виявлення і класифікації симптомів ПС [123]. Реєстрована послідовність сигнатурних значень таких симптомів може далі використовуватися іншою моделлю, яка бере до уваги безпосередньо самі значення величин параметрів. Процедура ВПС

заснована на аналізі залишків, які визначаються різницею виходів моделей для нормальних і позаштатних ситуацій. При оцінюванні якості використовується метрична відстань між статистичними даними процесу і їх впливом на якість продукції. Оптимальний режим роботи задають для оптимізації якості продукції; кореляція між ним та ПС розраховується із застосуванням ШНМ.

Перший крок запропонованої процедури полягає у визначенні якості поверхні сталевих смуг відповідно до вихідної динаміки ТП. Висока якість продукції (чистота поверхні прокату на виході з БТА) свідчить про оптимальність керуючих параметрів ТП.

Другим кроком є побудова імітаційної моделі. Оптимальна якість продукції відповідає мінімальній метричній відстані між середнім значенням оптимального для поточних умов ТП залишку керуючих сигналів і його фактичним значенням [48, 118, 124]. На третьому кроці визначається вид функціональної залежності, що будується – між значеннями залишків керуючих сигналів та показниками дефектів після травління або/та впливом значень залишків на виникнення ПС та виробничі відмови. Статистичні властивості залишків зазвичай використовують як інструмент для діагностики. Реальні залишки дефектів сталевих смуг на виході з БТА залежать від динаміки змін величин залишків в контурах керування [125] підсистемами агрегату.

Процедура локальної діагностики заснована на адаптивному методі розрахунку середніх значень залишків і їх відхилень [123], які корельовані з коефіцієнтом якості прокатної продукції. Якісне виділення ознак засноване на визначенні представницького тренду інформації. Аналіз тренду і прогнозування - важливі компоненти процесу моніторингу та супервізорного (диспетчерського) керування. Моделювання тренда може бути використано для діагностики ПС, збоїв і передбачення майбутніх станів [117, 124, 125]. Статистичні властивості залишків можна використовувати як інструмент для оцінювання якості керування. Для цього зазвичай застосовують декілька індексів якості, що характеризують системну динаміку залишків. Залишок має бути нормованим по відношенню до оптимального режиму роботи. Середні значення та відхилення першої сумарної статистики залишків за 10 часових квантів керування $n = [1;10]$ розраховуються за правилом:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (4.13)$$

а відхилення:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.14)$$

Середні значення кожної наступної статистики оновлюються за правилом:

$$\bar{x}_n = \lambda \bar{x}_{n-1} + (1 - \lambda) x_n, \quad (4.15)$$

де \bar{x}_n – розраховане за n точками середнє значення залишку; x_n – дані наступної точки n ; $\lambda = (0;1)$ – фільтруючий коефіцієнт «забування».

Відхилення для кожної наступної статистики розраховується рекурсивно як середньоквадратичне величина, що враховує покрокову динаміку [125]:

$$\sigma_n = \sqrt{(\sigma_{n-1})^2 \left[\frac{n-2}{n-1} \right] + (x_n - \bar{x}_{n-1})^2}, \quad (4.16)$$

де σ_n – середньоквадратичне відхилення, розраховане за n точками; \bar{x}_{n-1} – попереднє середнє значення залишку параметру; x_n – поточне значення залишку параметру. Розраховані відносні зміни середніх значень залишків і їх відхилень можуть бути також використані в якості вхідних сигналів нейросупревізора ТП [126].

Узагальнено, коефіцієнт якості керування та класифікації ПС пропонується оцінювати наступним чином:

$$Q_n^{PC}(t) = F_{ANN}(e_{def}^{In}(t), \sigma_n(t), \bar{x}_n(t), q_I), \quad (4.17)$$

де F_{ANN} – нейромережева модель; $e_{def}^{In}(t)$ – оцінка питомої площі дефектів певного класу на вході в БТА, обчислена за інтервал робочого вікна n згідно (4.6); $\sigma_n(t), \bar{x}_n(t)$ – відповідно середньоквадратичне відхилення і середнє значення залишку помилок керування в робочому вікні n ; q_I – інтегральний індекс якості очищення поверхні (4.3), що є виходом моделі.

Збої керування параметрами ТП призводять до відхилень режимів і, як наслідок, до прямих або непрямих втрат якості продукції. ТП травління здійснюється із застосуванням ряду технологічних блоків. При цьому виробничий цикл орієнтований на різні режими роботи і сортамент сталі.

Якість кінцевої продукції безпосередньо залежить від поточного стану цих блоків. Загальний стан лінії або стан кожного контуру можна побічно діагностувати за динамікою значень залишку $\bar{x}_n(t)$ помилки керування j -м блоком. Тоді $Q_n^{PC}(t)$ відображує наслідки зміни якості керування або збоїв обладнання в j -му контурі керування ТП. Індекс якості керування залежить від коливань параметрів ТП, які визначаються статистичними властивостями і є індикатором, який класифікує локальний збій керування в робочому вікні n . Якість керування, наслідки виникнення збоїв обладнання в ППЗ запропоновано оцінювати за відхиленням ΔQ розрахункового значення індексу якості травління точкових несистемних дефектів, що визначається еталонною ШНМ-моделлю F_{ANN}^M , від реального.

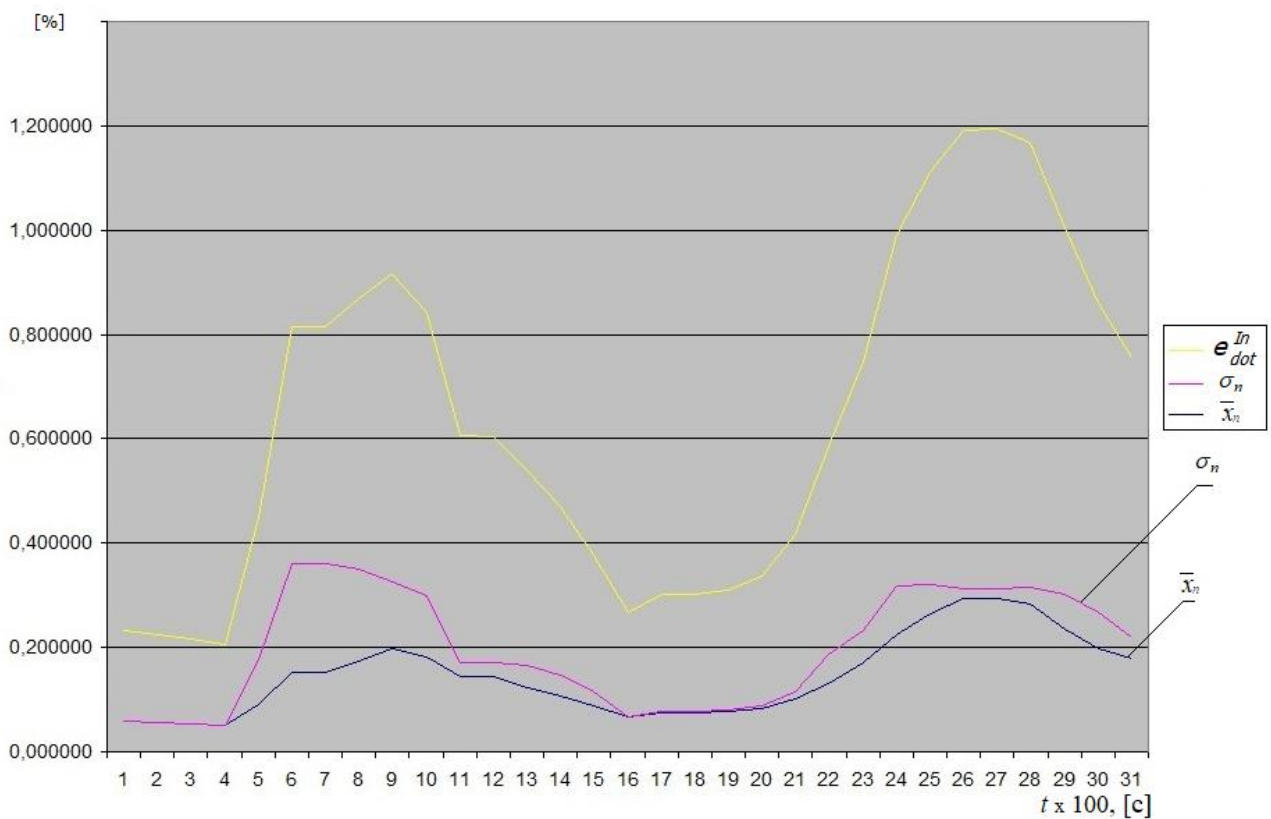


Рисунок 4.18 – Нормовані середні значення $\bar{x}_n(t)$ та дисперсія $\sigma_n(t)$ залишків відхилень параметру тиску P та значення індексу забрудненості $e_{dot}^{In}(t)$

При різних станах процесу були отримані дані про залишки помилок параметру тиску ТР: дисперсії і середніх значень помилки тиску ТР та значення індексу забрудненості поверхні прокату на вході БГА при задовільному значенні $q_I \leq q_R$ на виході з агрегату (рис.4.18). За цими даними проведено навчання еталонної моделі F_{ANN}^M . З використанням цих даних отримано приклад графіка динаміки параметрів моделі $Q_n^{PC}(t) = F_{ANN}(e_{dot}^{In}(t), \sigma_n(t), \bar{x}_n(t), e_{dot}^{Re}(t))$ – рис.4.19:

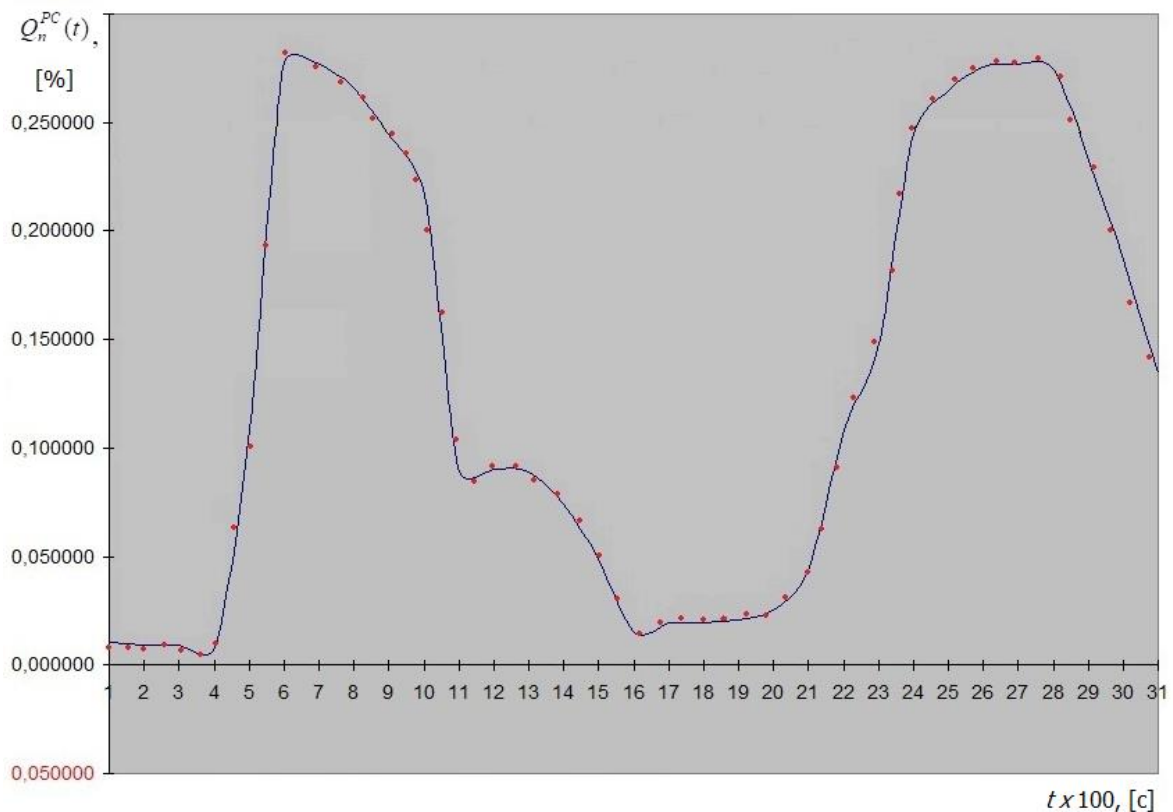


Рисунок 4.19 – Індекс якості $Q_n^{PC}(t)$

За характером коливань/відхилень $e_{dot}^{outM} = F_{ANN}^M(e_{dot}^{In}(t), \sigma_n(t), \bar{x}_n(t))$ як наслідок похибок \bar{x}_n, σ_n поточного значення параметру тиску ТР в соплах ППЗ від завдання P^* та величинами отриманих реальних поточних змін виходу моделі – e_{dot}^{Re} можна зробити висновок про якісні відхилення керування в контурі ППЗ.

Для визначення залишків якості керування тиском ТР в соплах ППЗ використано неймережевий підхід. Структура ШНМ $e_{dot}^{outRe} = F_{ANN}^{Re}(e_{dot}^{In}(t), \sigma_n(t), \bar{x}_n(t))$ була задана як (3-16-1).

ШНМ навчалася за даними, отриманими в нормальному режимі роботи $q_I \leq q_R$ технологічної лінії із швидкістю навчання – $\lambda = 0.15$. Статистичні властивості залишків параметру тиску, тобто \bar{x}_n, σ_n , корельовані з індексом якості Q_n^{PC} . Це підтверджується динамікою навчання задана точність моделі 0.001 досягнута за 809 ітерацій. Аналіз якості керування ППЗ запропоновано здійснювати за виразом/рівнянням:

$$\Delta Q = \left| F_{ANN}^M - e_{dot}^{outRe}(t) \right|, \quad (4.18)$$

де перевищення заданого регламентом порогу $\Delta Q \geq h$ свідчить про ПС.

Якщо $\lim_{t \rightarrow 0} \Delta Q \rightarrow 0$, то помилка в контурі керування є усуненою в сталому стані; якщо $\lim_{t \rightarrow 0} \Delta Q \rightarrow h = const$, помилка є статичною і усувається підстроюванням конкретних параметрів регулятора ППЗ; ситуація $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta Q \rightarrow H$, де $H \gg h$, підтверджує факт ПС, – помилка пов'язана із структурно-параметричними невідповідностями моделі керування реальному ТП, що вимагає оперативного підлаштування моделі або повної корекції закону керування. Необхідність корекції структури та параметрів моделі можна розглядати як позаштатний або аварійний стан обладнання ППЗ.

В роботі розглядається лише ділянки ТП травління, що пов'язані з можливістю виникнення збоїв, що викликають небезпеку перетраву або недотраву точкових дефектів сталевий смуги у контурі ППЗ. Тестування оцінок якості здійснено за реальними даними. Наслідки виникнення збоїв обладнання і їх вплив на якість продукції були оцінені шляхом аналізу вихідних даних і результатів моделювання. Залежності між статистичними характеристиками керуючих сигналів і індексами якості дозволяють оцінити поточний стан лінії без її зупинки, що в підсумку скоротить загальну вартість обслуговування технологічного комплексу.

4.7 Висновки до четвертого розділу

1. Недоліки існуючої системи керування (відсутність моделей і методів керування температурним режимом і концентрацією кислоти з урахуванням поточного стану травильного розчину; відсутність контуру керування ППЗ) були усунені в модернізованій АСК БТА. Розроблено структуру інформаційної моделі та

запропоновано комплекс технічних засобів – керуючих контролерів, інтелектуальних датчиків і виконавчих пристроїв для модернізованої системи.

2. У модернізовану систему керування БТА крім контуру регулювання температури травильного розчину додано контур, що регулює тиск подачі розчину в сопла попереднього зрошування дефектів прокату, та нейрорегулятор-супервізор, що узгоджує функціонування основних регуляторів, забезпечує можливість не зважати на обмеження, які впливають із критеріїв стійкості, при синтезі регуляторів ТП.

3. 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 між статистичними характеристиками даних про помилки керування і індексом якості дозволяють визначати позаштатні ситуації і оптимізувати поточний стан процесу та БТА без зупинки травильної лінії, що скорочує загальну вартість експлуатації та обслуговування технологічного комплексу.

4. Набув подальшого розвитку підхід до автоматизації процесів травління смугової сталі шляхом модифікації системи керування агрегатом на основі розроблених інтелектуальних моделей та методів, включенням до її складу синтезованих нейромережевих регуляторів, що оперативно обробляють поточні дані і формують керуючі дії, що дозволило підвищити точність регулювання технологічного процесу та якість травління за умов економії ресурсів.

5. 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.

Список використаних джерел у даному розділі наведено у повному списку використаних джерел під номерами: [107-126]. Основні результати даного розділу опубліковані в роботах [55, 64, 86, 116, 122].

ВИСНОВКИ

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 рішення цієї задачі отримані наступні наукові результати:

1. Визначено, що технологічний процес безперервного травління смугової сталі нестационарний і може бути віднесений до класу об'єктів інтелектуального керування. Обґрунтовано доцільність використання нейромережевих 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 нестационарних 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 неромережеві моделі використано для виробництва багатоканального мікроконтролерного регулятора витрат теплоносія, який впроваджено на ряді енергетичних, хімічних та комунальних підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Макаров И.М., Менский Б.М. Линейные автоматические системы. М.: Машиностроение, 2000. 504 с.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1985. 543 с.
3. Аверкин А.Н., Батыршин И.З., Блишун А.Ф. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986. 312 с.
4. Коломойцева М.Б., Хо Д.Л. Адаптивные системы управления динамическими объектами на базе нечетких регуляторов. М.: Спутник, 2002. 217 с.
5. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов Ф.С. Нечеткие модели и сети. London: Springer – М: Горячая линия. Телеком, 2007. 284 с.
6. Бодянский Е.В., Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. 369 с.
7. Ayoubi M. Nonlinear system identification based on neural networks with locally distributed dynamics and application to technical processes. Düsseldorf: VDI – Verlag, 1996. 168 p.
8. US Patent № 6096137. B08B 1/02, B08B 3/08. Pickling plant and method of controlling the same. Katsumi Mabuchi; assignee: Hitachi, Ltd. (Tokyo, JP) ; filing date 20.03.2002 ; publ. date 01.08.2000. 22 p. <https://www.freepatentsonline.com/6096137.html>
9. US Patent № 6959574. B2, B21B 45/04. Continuous pickling cold-rolling equipment and operating method thereof. Hidetoshi Nishi ; Hitachi, Ltd. (Tokyo, JP) ; filing date 20.03.2002 ; publ. date 11.01. 2005. 8 p. <https://www.freepatentsonline.com/6959574.html>
10. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. К.: «Радиоаматор», 2008. 972 с.
11. Батыршин И.З., Недосекин А.О., Стецко А.А., Тарасов В.Б. и др. Нечёткие гибридные системы. Теория и практика. М.: Физматлит, 2007. 208 с.
12. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети. Винница: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. 320 с.
13. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления. Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004. 143 с.

14. Галушкин А. И. Нейронные сети. Основы теории. М: Горячая Линия – Телеком, 2010. 480 с.
15. Омату С., Халид М., Юсоф Р. Нейроуправление и его приложения: пер. с англ. М.: ИПРЖР, 2000. 272 с.
16. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е издание: пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. 1104 с.
17. Ягер Р.Р. (ред.). Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: пер. с англ В.Б. Кузьмина. М: Радио и связь, 1986. 408 с.
18. Zadeh Lotfi A. (Ed.). Computing with Words in Information / Intelligent Systems 2. Heidelberg: Physyca – Verlag, 1999. 610 p. DOI 10.1007/978-3-7908-1872-7.
19. Babuska R. Fuzzy Modeling for Control. Norwell, MA: Kluwer, 1998.
20. Intelligent Systems'2014. (Eds. Filev D. et al.). Proc. of the 7th IEEE International Conf. Intelligent Systems IS'2014, September 24-26, 2014, Warsaw, Poland. Volume 2: Tools, Architectures, Systems, Applications. Springer, 2014. 907 p. DOI 10.1007/978-3-319-11310-4.
21. Ледков В.Г. Непрерывные травильные линии. М: Metallurgizdat, 1961. 158 с.
22. Hasler F., Stone N. The Whys and Hows of Hydrochloric Acid Pickling: chemical and operating data for effluent free pickling. Esco Engineering. Kingsville, Ontario: October 1997. 63 p. URL: <http://pas.mnsi.net/hydrochloricwhysnhows.PDF>
23. Gines M.J.L., Benitez G.I., Perez T., Merli E., Firpo M.A., and Egli W. Study of the Picklability of 1,8 mm Hot-Rolled Steel Streep in Hydrochloric Acid. *Latin American Applied Research*. 2002. June. P. 281–288. ISSN (online) 1851-8796.
24. Иванов С.С., Лукашкин Н.Д., Хламкова С.С. Линия травления окисленных металлических материалов. *Электрохимия, гальванотехника и обработка поверхностей: сборник трудов Международной конференции*. М., 2001. 123 с.
25. European Comission. Reference Document on Best Available Techniques for the Ferrous Metals Processing Industry. December, 2001, P. 538. Accessed 14, May, 2004. <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/reference-reports/best-available-techniques-bat-reference-documentforiron-and-steel-productionindustrial-emissions>.
26. Малышева Т.В., Руденко И.П. Коррозионно-электрохимическое поведение железа и сталей в серной кислоте, содержащей ферро-ионы. *Химическая и*

электрохимическая обработка проката: тезисы докладов III республиканской научно-технической конференции. Днепропетровск, 1983. С.53.

27. Золотов Ю.А. (ред.). Основы аналитической химии. Практическое руководство. М.: Высшая школа, 2001. 463 с. ISBN 5-06-003833-5.

28. Комацу Т., Наканиси Т., Такэно Т. Сооружение и эксплуатация в непрерывном режиме травильного агрегата № 2 и стана № 1 холодной прокатки на заводе в Мидзусиме. *Тэцүто хаганэ*. 2006. Т. 72, № 4. С. 367.

29. Коцарь С.Л., А.Д. Белянский, Ю.А. Мухин. Технология прокатного производства. М.: Metallurgia, 2010. 272 с.

30. Малышева Т.В., Руденко Н.П., Чудновский Е.М. Использование математических моделей для анализа процесса кислотного травления сталей. Днепропетровск, 1982. 13 с. Рукопись представлена ред. журнала "Технология и организация производства". Деп. в Укр.НИИНТИ 8.08.1982, № 3254-982.

31. Hasler F. The Whys and Hows of Sulfuric Acid Pickling and Recovery. Esco engineering. Kingsville, Ontario: 1995, 61 p.

URL: <http://pas.mnsi.net/wh%20sulfuric%20rev05.pdf>.

32. Илюнин 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

33. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986. 312 с. ISBN 10: 5-03-002326-7.

34. Прикладные нечеткие системы: перевод с япон. [Асаи К., Ватада Д., Иваи С. и др.]; под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. М.: Мир, 1993. 366 с.

35. Полухин П.И., Федосов Н.М., Королев А.А., Матвеев Ю.М. Прокатное производство. М.: Metallurgia, 1982. 695 с

36. Бровман М.Я. Энергосиловые параметры и усовершенствование технологии прокатки. М.: Metallurgia, 1995. 256 с.

37. Борисов Е.М., Авдеев В.А., Шаймович О.И. Техническое перевооружение черной металлургии и модернизация металлургических предприятий. *Сталь*. 1991. № 8. С.1–5.

38. Железнов Ю.Д., Кузнецов Л.А. Об оптимизации работы комплекса из станов горячей и холодной прокатки. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 1982. № 6. С. 69–71.
39. Авраменко В.П., Божинский И.А., Илюнин О.О. Управление пространственно-распределенными системами в условиях неопределенности и нечеткости исходной информации. *Системи обробки інформації*. 2012. № 2(100). С.112–117.
40. Коптев С.В. Тонколистовая прокатка. *Тематический сборник научных трудов*. Воронеж: ВорПИ, 1983. С.141-144.
41. Илюнин 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
42. Семенов А.Д., Артамонов Д.В., Брюхачев А.В. Идентификация объектов управления. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2003. 211 с.
43. Bubnicki Z. Modern control theory. Berlin: Springer, 2005. 423 p.
44. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. М.: Наука, 1991. 432 с.
45. Nelles O. Nonlinear system identification. Berlin: Springer – Verlag, 2000. 785 p.
46. Ham F.M., Kostanic I. Principles of Neurocomputing for Science and Engineering. N.Y.: Mc Graw-Hill Inc. 2001. 468 p.
47. Змеу К.В., Марков Н.А., Шипитько И.А., Ноткин Б.С. Безмодельное прогнозирующее инверсное нейроуправление с регенерируемым эталонным переходным процессом. *Интеллектуальные системы*. 2009. № 3. С. 109–117.
48. Кацюба О.А. Теория идентификации стохастических динамических систем в условиях неопределенности. Самара: СамГУПС, 2008. 119 с.
49. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. Пер. с польского И.Д.Рудинского. М. Финансы и статистика, 2004. 344 с.
50. Володин, А.А., Лубенцова Е.В. Адаптивная нейро-нечеткая система управления биотехнологическим процессом. *Инфокоммуникационные технологии в инновациях, медико-биологических и технических науках: сборник научных трудов Пятого международного научного конгресса «Нейробиотелеком-2012»*. – СПб.: Политехника, 2012. С. 223–226.

51. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. 287 с.
52. Демирский А.В., Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю. Нечеткая интерполяция концентрации компонентов технологических растворов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 4. С. 35–41. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/ite/uk/archiv-nomeriv/2015/2015_4.pdf.
53. Илюнин О.О., Бессонов А.А., Илюнин А.В. Нечеткий регулятор скорости травления стали. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування: матеріали VI міжнародної науково-технічної конференції*. Харків: ДП «ХНДІ ТМ», 2016. С.25.
54. Илюнин О.О., Шамраев А.А. Интеллектуальное управление непрерывным процессом травления металлического полосового проката с нечетким выводом. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування: матеріали III науково-технічної конференції*. Харків: ДП «ХНДІ ТМ», 2013. С.34–35.
55. 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>. (Індексується у **Scopus**).
56. Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраев А.А. Нечеткая процедура оценивания предельно допустимой концентрации сульфата железа в травильных растворах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С.120–124. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2014/2014_4.pdf.
57. Шведене Н.В. Ионоселективные электроды. *Соросовский Образовательный Журнал*. 1999. №5. С.60–65.
58. URL: <http://www.sensotech.com>
59. Levine Ira N. Physical Chemistry. 6th ed. NY: McGraw-Hill Companies Inc, 2009. 967 p.

60. Отто М. Современные методы аналитической химии. М: Техносфера, 2006. 544 с.
61. Данилов В. П. Технология минеральных солей. Ч.1. Л., 1974. С. 694 – 707.
62. Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Нечеткое управление процессом непрерывного травления листовой углеродистой стали в условиях неопределенности. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні (ІТММ-2013): матеріали науково технічної конференції*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2013. С. 98–101.
63. Salomon D. Data compression – The Complete Reference. 4th Edition. London: Springer, 2007. PP. 17–46, 253–530. DOI 10.1007/978-1-84628-603-2.
64. Ilyunin 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>. (Індексується уScopus).
65. Субботин С.А. Неитеративный синтез и редукция нейро-нечетких моделей. *Искусственный интеллект*. 2006. № 3. С. 323–330.
66. Патент № 2145418 Российская Федерация. МПК⁷ G01N33/14, G01N21/21, G01N21/39, G01J4. Устройство для автоматического экспресс-анализа концентрации сахара и других оптически активных веществ в прозрачных растворах. Бадалян А.М., Поляков О.В., Беднаржевский С.С., Акинина Е.В., Смирнов Г.И.; опубл. 30.06.2012. Бюл. №24. 5 с. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/214/2145418.html>
67. Пат. № 2228522 Российская Федерация. МПК⁷ G01N33/02, G01N21/39, G01N15/06, G01N15/02, C13F1/02. Устройство для определения концентрации и среднего размера частиц в кристаллизующихся растворах сахарозы. Петров С.М., Шлык Ю.К., Шестов А.Г., Подгорнова Н.М., Солуянова Н.Н.; опубл. 24.06.2015. Бюл. №12. 5 с. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/222/2228522.html>
68. Mamdani E.H., Assilian S. Applications of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *Proc. IEEE 121*. 1974. No.12. P. 1585–1588.

69. Илюнин О.О., Руденко О.Г. Нечеткая идентификация состава рабочего раствора непрерывного травильного агрегата полосовой стали. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів керування: матеріали V міжнародної науково-технічної конференції*. Полтава: ПНТУ, 2015. С.22–23.
70. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg: Physica – Verlag, 2011. 798 p.
71. А. с. 1568051 СССР, МКИ³ G 06 F 15/20. Устройство для обработки результатов измерений параметров линейных неоднородных материалов. В.Г. Близнюк, С.П. Горелов, О.О. Илюнин, В.Р. Петренко, Л.В. Руднева, В.В. Сергейчук (СССР); заявитель Харьковский институт радиоэлектроники им. акад. М.К.Янгеля. – № 4357402/24 – 24 ; заявл. 05.01.88 ; опубл. 30.05.90. Бюл. № 20. 5 с.
72. Илюнин О.О., Селяков А.М., Шамраев А.А. Процедура нечеткой оценки параметров сред и контактных материалов тепловых систем. *Проблеми інформатизації: матеріали першої науково-технічної конференції*. Черкаси: ЧДТУ, 2013. С.32.
73. Илюнин О.О. Идентификация несистемных дефектов в непрерывном технологическом процессе травления стального проката. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2013. №1(46). С.394–396.
74. 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 ; publication date: 16.07.2002, 6 p. <https://www.freepatentsonline.com/6419756.html>
75. Bansal B., Cheng X.D., Muller-Steinhagen H. Analysis of “classical” deposition rate low for crystallization fouling. *Chemical Engineering and Processing*. 2008. Vol. 47. P. 1201–1210.
76. URL: http://www.ence.ch/rus/pickling_fluid_analyzer.
77. Пат. 104710 УКРАЇНА, МПК (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. Пристрій для безперервного травлення прокату листової вуглецевої сталі. Арсеньєва О.П., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Подпружников П.М., Селяков О.М., Тимофєєв В.А. ; заявник та власник Харківський національний університет радіоелектроніки. № u 2012 09428; заявл. 02.08.12 ; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4.

78. Ульев Л.М. Оценка перепада давления на начальном гидродинамическом участке ламинарного течения в соосном коническом диффузоре. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2005. № 4. С.11 – 28.
79. Karustenko 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 12.10.2013. (Індексується у **Scopus**).
80. Олдендерфер М. С., Блэшфилд Р. К. Кластерный анализ: пер. с англ.; од. ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
81. Питеркин С.В., Оладов Н.А., Исаев С.Н. Практика применения EPR-систем. СПб: Альпина Паблишер, 2003. 368 с.
82. Лапшенков Г.И., Полоцкий Л.М. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. М: Химия, 1982. 377 с.
83. Дудников Е.Г., Казаков А.В., Софиева Ю.Н., Софиев А.Э., Цирлин А.М. Автоматическое управление в химической промышленности. М: Химия, 1987. 368 с.
84. Shinsky F.G. Unit Operations Control. In: Green D.W., Perry R.H., eds. *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 8th edn. NY: McGraw-Hill, 2008. P. 839 – 847.
85. Ілюнін О.О., Руденко О.Г., Селяков А.М. Нечеткий регулятор потока через дисковый поворотный затвор. *Проблеми інформатизації: тези доповідей III науково-технічної конференції*. Полтава: ПНТУ, 2015. С.20.
86. 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 Dovbnya, Andriy Kovalenko and Oleg Ilyunin]; V. Kharchenko et al. (eds.). 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>. (Індексується у **Scopus**)
87. Waite A.W.R., Eng P. Final Control Elements and Regulators. In: Green D.W., Perry R.H., eds. *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 8th edn. NY: McGraw-Hill, 2008. P. 871 – 896.

88. Бесекерский В.А., Попов Е.П. 4-е изд. Теория систем автоматического управления. СПб.: Профессия, 2003. 752 с.
89. Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко и др.; Под ред. Г.Л.Хавина. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении: Монография. Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. 448с.
90. Synchronous motors. Technical Data. Berger Lahr Mechatronic Basic Products, 8/2004. P. 98
91. Соколов Ю.Н. Компьютерный анализ и проектирование систем управления. Ч.2. Цифровые системы. Харьков: НАУ «ХАИ», 2005. 184 с.
92. Omidvar O., Elliott D.L. (eds.). Neural Systems for Control. NY: Academic Press, 1997. 272 p.
93. Чернодуб А.Н., Дзюба Д.А. Обзор методов нейрорегуляции. *Проблемы программирования*. 2011. №. 2. С. 79 – 94.
94. Prokhorov D. and Wunsch D. Adaptive Critic Designs. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 1997. Vol. 8, N 5. P. 997 – 1007.
95. Gundy-Burlet K., Krishnakumar K., Limes G., Bryant D. Augmentation of an Intelligent Flight Control System for a Simulated C-17 Aircraft. *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication*. 2004. Vol. 1, N 12. PP. 526 – 542.
96. Архангельский В.И., Богаенко И.Н., Грабовский Г.Г., Рюмшин Н.А. Нейронные сети в системах автоматизации. К.: Техника, 1999. 234 с.
97. Купін А.І. Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології. – Кривий Ріг: КТУ, 2008. 204 с.
98. Dias F.M., Mota A.M. Comparison between Different Control Strategies using Neural Networks. *9th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Dubrovnik, Croatia, 2001. P. 1–12.
99. Zhenni W., Christine D., Ming T., Morris J.A. A procedure for determining the topology of multilayer feedforward neural networks. *Neural Networks*. 1994. №2(7). PP.291 – 300.
100. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., Капустенко П.А. К вопросу о загрязнениях поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников. *Энергетика*. Минск: БПИ, Известия ВУЗов МВССО СССР, 1984. №6. С.101 – 102.
101. Hung S.L., Adeli H. Machine Learning. NY: John Willey & Sons, 1995. 211 p.

102. Бессонов А.А., Илюнин О.О., Руденко О.Г. Нейросетевое управление травлением несистемных дефектов стального проката. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2016. № 4. С. 52–61.
103. Илюнин 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.
104. Илюнин 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.
105. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Б., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки: справочник. М.: Металлургия, 1986. 430 с.
106. Bouhouche S., Boucherit M.S., Lahreche M. Improvement of breakout detection system in continuous casting process using neural networks. *IEEE Proceedings on Advanced Process Control – Applications for Industry Workshop*. Vancouver, Canada, 2001. P. 53 – 63.
107. Технологічні контролери для систем керування переміщенням та позиціонування. Департаменти IA&DT ТОВ Сіменс. 2010. URL: http://www.automationdrives.ru/as/download/ascat/simatic_s7/s7_300/14_Technology_r.pdf.
108. Вегман Й., Кіліан М. Profibus DP SIMATIC-S7. Департаменти «Промислова автоматизація» та «Технологія приводів» (IA&DT) ТОВ Сіменс. 2010. URL: http://www.automationdrives.ru/as/download/doc/simatic_net/profibus/01_Basic PROFIBUS.pdf.
109. Мережі Industrial Ethernet. Департаменти IA&DT ТОВ Сіменс. 2010. URL: http://www.automationdrives.ru/as/download/doc/simatic_net/ethernet/2_IndustrialEthernetNetworks_r.pdf.
110. Сайт Festo Group: <http://www.festo.com>
111. Texas Instruments: MSP432P401x mixed-signal microcontrollers. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp432p401r.pdf> (2015)
112. Opitz H.P. Fuzzy Control-Stabilitat von Fuzzy-Regelungen. *Autmatisierugstechnk*. 1993. Vol.41, №88. PP. A21 – A24.

113. Wang L.X. Adaptive fuzzy systems and control design and stability analysis. NJ: Prentice Hall, 2004. 232 p.
114. Wang L.X. A supervisory controller for fuzzy control systems that guarantees stability. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1994. Vol.39, №9. P. 1845 – 1847.
115. Соболева Е.В. Исследование критериев обобщенной полезности для задач многокритериального оценивания. *SAIT 2012, 14-th International conference on science and technology*. Kyiv, April 24, 2012. P.236-238. ISBN 978-966-2748-07-9. URL: www.sait.kpi.ua/books. (2012.12.05).
116. Boldyryev S., Garev A., Ilunin 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. (Индексується у Scopus).
117. Ivakhnenko A.G., Madala H.R. Inductive learning algorithms for complex systems modeling. London, Tokyo: CRC Press, 1994, 352 p.
118. Bouhouche S., Lahreche M., Ziani S., and Bast J. Quality Classification and Monitoring Using Adaptive Metric Distance and Neural Networks: Application in Pickling Process. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*. 2008. Vol. 2, No.9. P. 210 –215.
119. C. West Churchman. Introduction to operations research. NY: Wiley International Edition, 2009. 645 p.
120. Мазур В.Д., Добронравов А.И., Чернов П.И. Предупреждение дефектов листового проката. К.: Техника, 1986. 141 с.
121. Chiang L.H., Russell E.L. and Braatz R.D. Fault detection and Diagnosis in Industrial Systems. London: Springer-Verlag, 2nd edn., 2001. 278 p. ISBN 1-85233-327-8.
122. Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Метод оценки качества работы контуров регулирования процессов производства листовой стали. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. С. 79–80.
123. Джонстон Дж. Эконометрические методы: пер. с англ. М.: Статистика, 1980. 444 с.

124. Искусственный интеллект. Системы общения и экспертные системы: Справочник. Т. 1. Под ред. Э. В. Попова. М.: Радио и связь, 1990. 464 с.
125. Huber P.J., Ronchetti E. Robust Statistics. 2nd edn. NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2009. 354p.
126. Жернаков С.В. Контроль и диагностика комплексных отказов САУ ГТД с использованием рекуррентных нейронных сетей. *Авиакосмическое приборостроение*. 2009. №2. С.33 – 49.

Додаток А

Впровадження результатів дисертаційної роботи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ „АТ Співдружність - Т”

Капустенко П.О.

«14» травня 2016 р.

АКТ

впровадження наукових результатів дисертаційної роботи аспіранта кафедри ЕОМ
ХНУРЕ Ілюніна Олега Олеговича

Комісія товариства з обмеженою відповідальністю „АТ Співдружність- Т ” (далі ТОВ „АТ Співдружність - Т”) у складі директора, професора кафедри ІТЕ Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут",— Капустенка П.О., та членів комісії: заступника директора з виробництва Клочка Є.А., начальника ділянки виробництва контрольно-вимірювальних пристроїв і автоматики Добромислова О.С., провідного інженера з автоматичних систем керування Зоренка В.В., підтверджують факт впровадження результатів дисертаційної роботи Ілюніна О.О. у виробничий процес ТОВ „АТ Співдружність – Т ”, а саме:

- в багатоканальних температурних регуляторах витрати теплоносія, що виробляє ТОВ „АТ Співдружність - Т” для підприємств енергетики та комунального господарства, металургійних та хімічних виробництв до основи обробляючого блоку регулятора покладені нейронечіткі процедури та нейромережеві RBF-моделі, розроблені у дисертаційній роботі Ілюніна О.О., що дозволяють здійснювати керування температурою робочих рідин в нестаціонарних технологічних процесах (ТП) за умов оптимізації теплового енергозабезпечення ТП;

- впроваджені нейромережеві та нейронечіткі моделі розроблені особисто Ілюніним О.О., з чим згодні співавтори його наукових праць;

- впровадження відбувалось в 2009-2015рр. в межах господарчої діяльності АТ „Співдружність - Т” та його правонаступника ТОВ „АТ Співдружність - Т”. Промислові об’єкти впровадження: ВАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» (ММК ім. Ілліча), КП «Харківські теплові мережі», ПрАТ «Теплоенергетичний центр Роганського промвузла», ПрАТ «Філіп Моріс Україна»;

- розроблена система інтелектуального керування температурою робочої рідини забезпечує оптимальне енергоспоживання та загальне підвищення ефективності ТП. Зокрема, застосування підсистеми інтелектуального керування модулем нагріву травильного розчину на базі теплообмінника Alfa Laval дозволило додатково знизити теплоенергоємність безперервного процесу травління сталю прокату на $\approx 7,5\%$ (ВАТ «ММК ім. Ілліча»). Автоматизація процесів регулювання температури розчину в травильних ваннах дозволила оптимізувати баланс сірчаної кислоти в розчині та зменшити її витрати на $\approx 21,5\%$ на ділянці травління ТП.

Комісія ТОВ „АТ Співдружність - Т”

Клочок Є.А.

Добромислов О.С.

Зоренко В.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор
Харківського національного
університету радіоелектроніки
В. В. Семенець
« 15 » грудня 2020р.



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи
Ілюніна Олега Олеговича

Комісія у складі керівника відділу навчального процесу доцента кафедри інформаційних управляючих систем Міхнової А. В., завідувача кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем професора Руденка О. Г., професора кафедри комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем Корабльова М. М. підтверджує, що результати дисертаційної роботи Ілюніна Олега Олеговича впроваджені у навчальний процес на кафедрі комп'ютерних інтелектуальних технологій та систем в курсі «Нейронні обчислювальні структури», а також у курсовому та дипломному проектуванні.

Керівник ВВП

А. В. Міхнова

Завідувач кафедри КІТС

О. Г. Руденко

Професор кафедри КІТС

М. М. Корабльов

№ 593743

ДЕРЖАВНИЙ КОМПЕТЕТ УКРАЇНИ З ПИСАНИХ ТЕХНІЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ
ТА СТОЖИВНОЇ ДОПІТНОЇ
ДЕРЖАВНА СИСТЕМА СЕРТИФІКАЦІЇ УКРАЇНИ

Серія ВВ

СЕРТИФІКАТ ВІДПОВІДНОСТІ

Зареєстровано в Реєстрі за № UA1.007.0183354-07

Державна служба з Реєстрації

Термін дії з 21 грудня 2007 до 20 грудня 2009

Срок дієвості с

Продукція **Регулятор температури автоматичний РТГ-2**

Позначення

код УКТ ЗЕД 79.222

31.20.31

код ЄАНП 1901

Відповідає стандартам

Середовища: ГОСТ Р 51330-2005

ТУ У 24341711.002-2000 "Регулятор температури автоматичний РТГ-2. ТУ"

Виробник продукції

Назва виробника продукції

АТ "СПІВДРУЖНІСТЬ-Т" юридична адреса: 61002, м. Харків,

пр-к. Червонопрапорний, 2, кв. 19, код ЄДРПОУ 23457736;

адреса виробництва: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХП"

Сертифікат надано

Середовища: ГОСТ Р 51330-2005

АТ "СПІВДРУЖНІСТЬ-Т",

61002, м. Харків, пр-к. Червонопрапорний, 2, кв. 19, код ЄДРПОУ 23457736

Додаткова інформація

Додатковий інформаційний код

Регулятор температури автоматичний РТГ-2, що виготовляється серійно з 21.12.2007р.

до 20.12.2009р., з урахуванням гарантійного терміну зберігання, технічний нагляд за

сертифікованою продукцією один раз на рік

Сертифікат надано органом з сертифікації

Середовища: ГОСТ Р 51330-2005

ДП "Харківстандартметрологія", м. Харків, вул. Мирославицька, 36 №UA.P.007 від 01.04.2005р.

тел./факс (057) 700-37-02; 756-37-58; 756-37-85

На відставі

На основі

випробувань, що були проведені: ДВЦ електротехнічної та машинобудівної
продукції "Електромаш" ДП "Харківстандартметрологія", 61002, м. Харків, вул.
Мирославицька, 36, атестат №UA6.001.H.055 від 05.02.2002р. Протокол №612.12.080
від 18.12.2007р. Висновок за результатами аналізу документації №12/1704-Ан від
20.12.2007р.

Керівник органу з сертифікації

Підпис

М. М. Будьоний

підпис

М. М. Будьоний

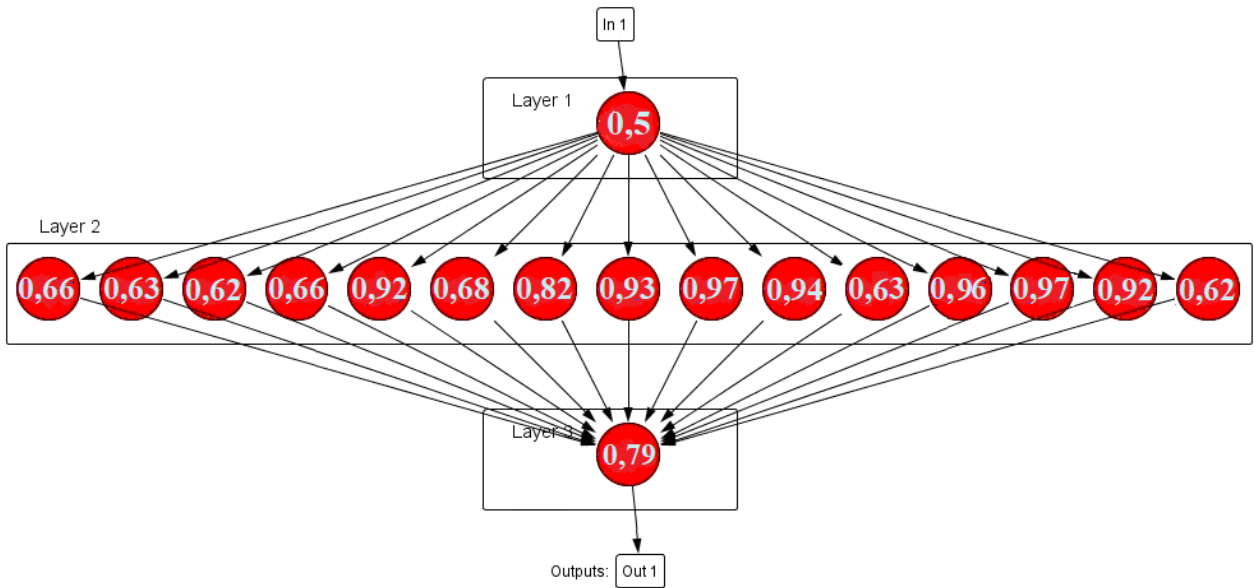
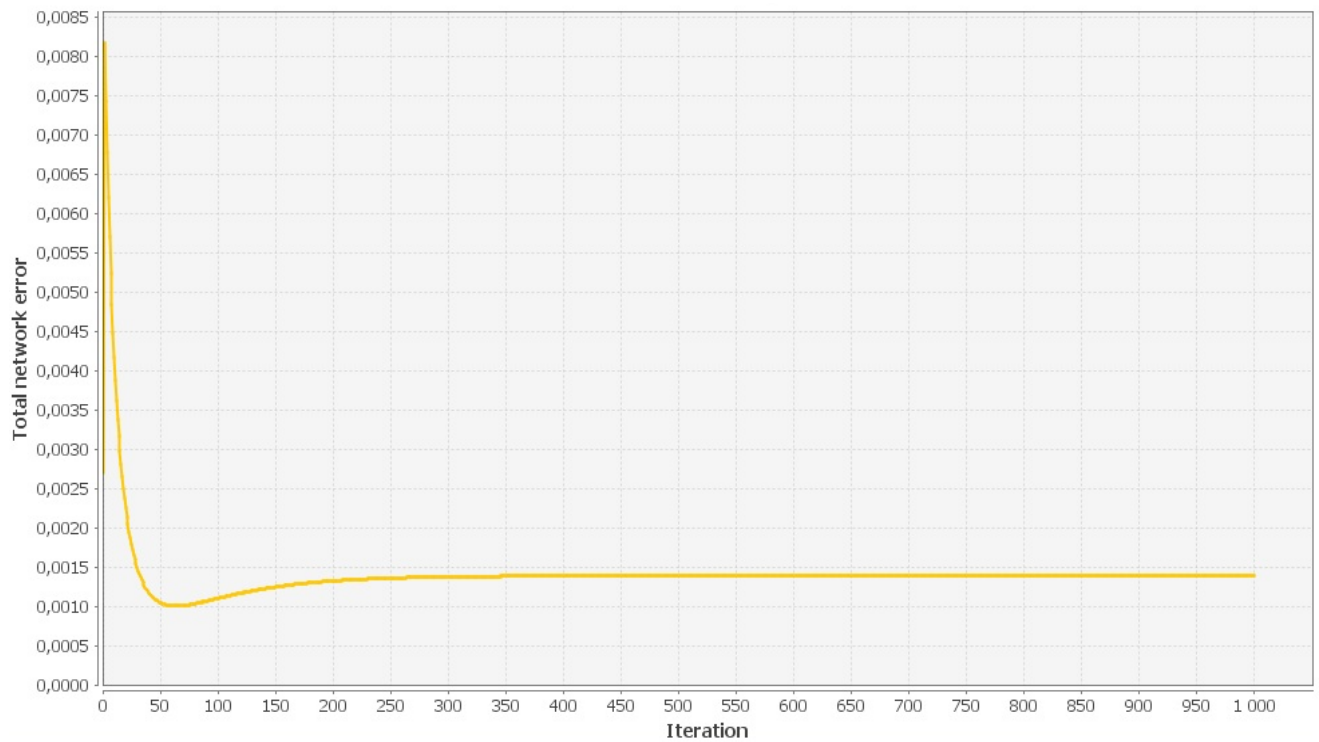
ініціали, прізвище



Чисельність серійності відповідає код мейла
виробника в Реєстрі системи УкрСЕПРО
за №: (044) 537-35-76

ДОДАТОК Б

Графічні матеріали

Рисунок Б.1 – Структура радіально-базисної моделі $\varphi(G)$ Рисунок Б.2 – Динаміка навчання радіально-базисної моделі $\varphi(G)$

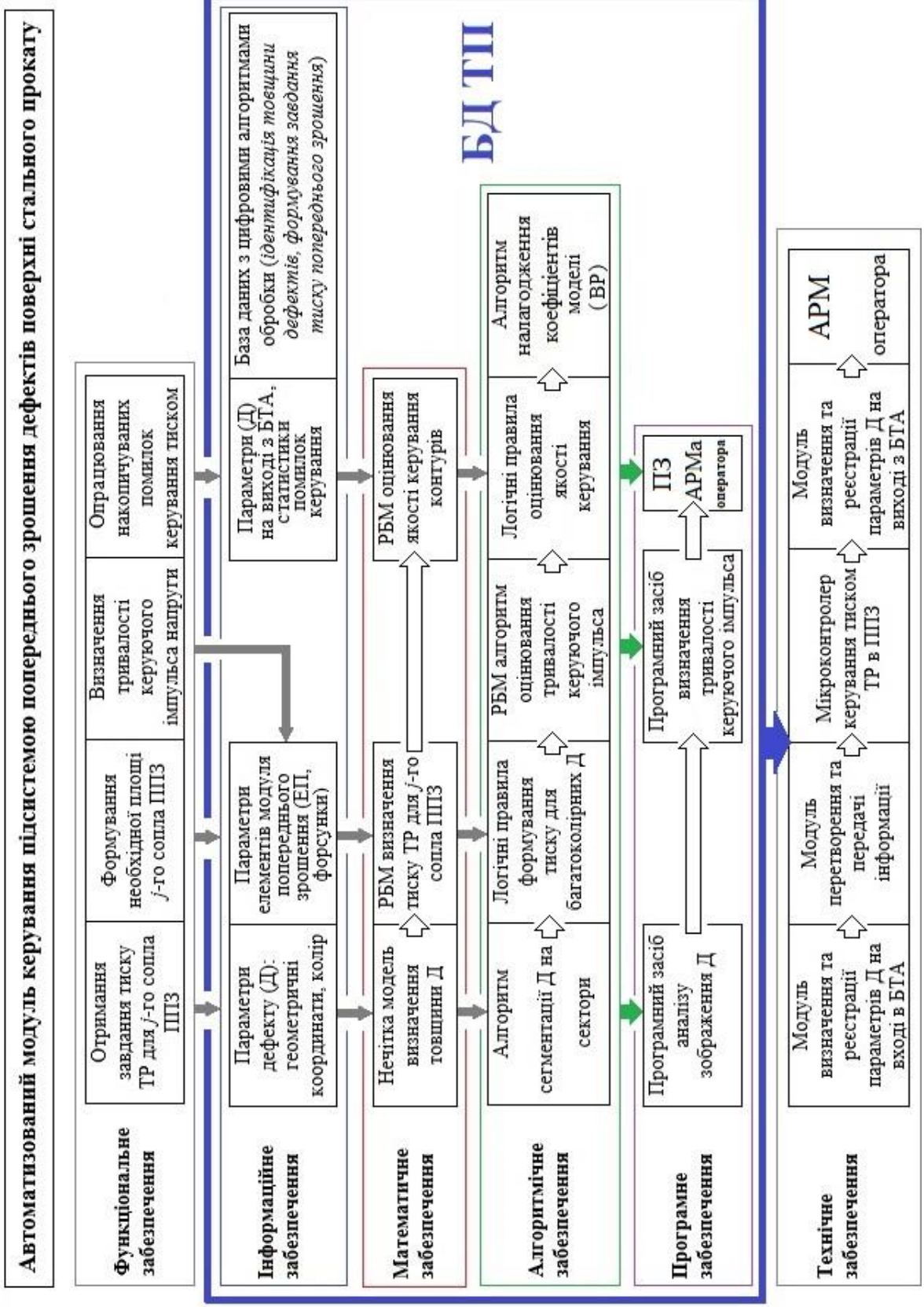


Рисунок Б.3 – Структурна схема видів забезпечення автоматизованого модуля керування підсистемою попереднього зрошення дефектів



Рисунок Б.4 – Графік регулювання витрат теплоносія БТА за період $T = 1\text{c}$

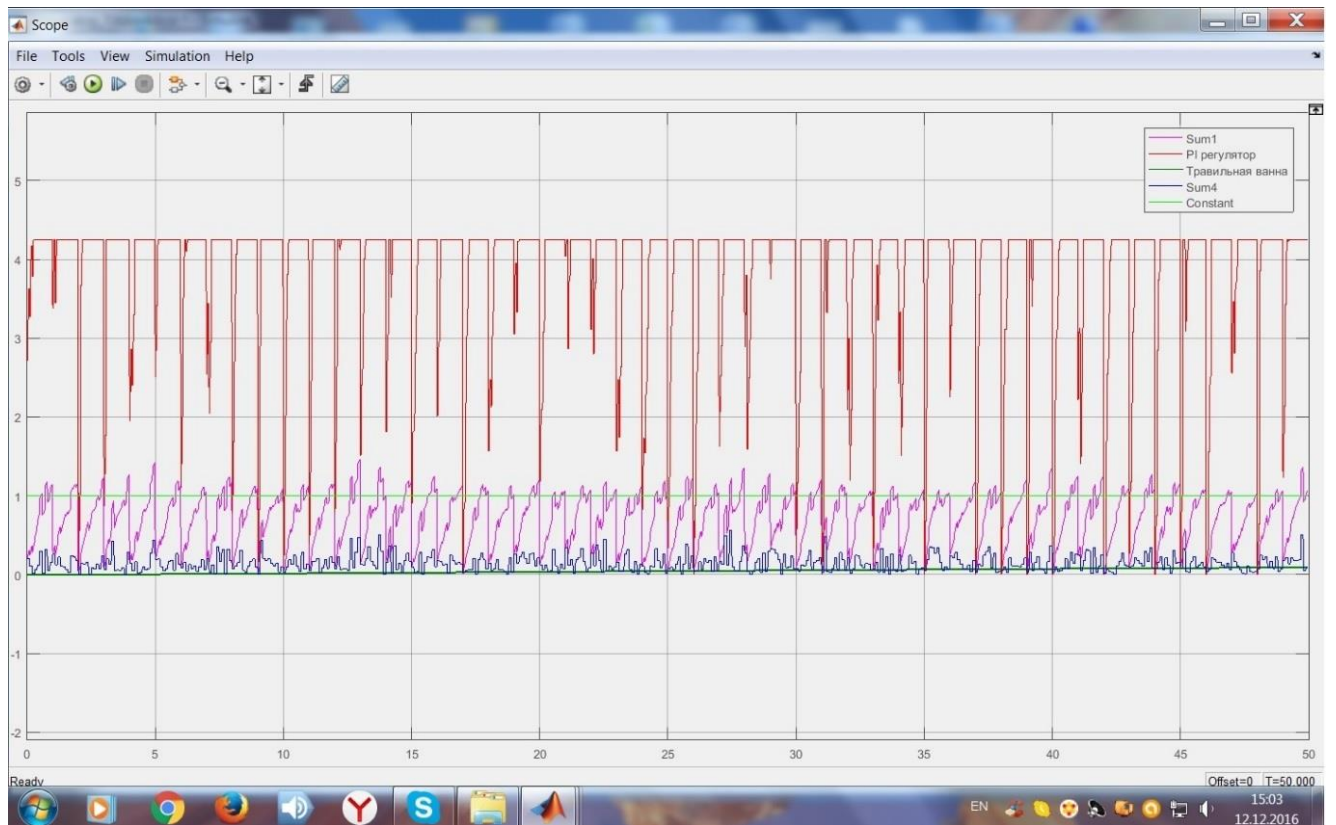


Рисунок Б.5 – Графік регулювання витрат теплоносія БТА за період $T = 50\text{c}$

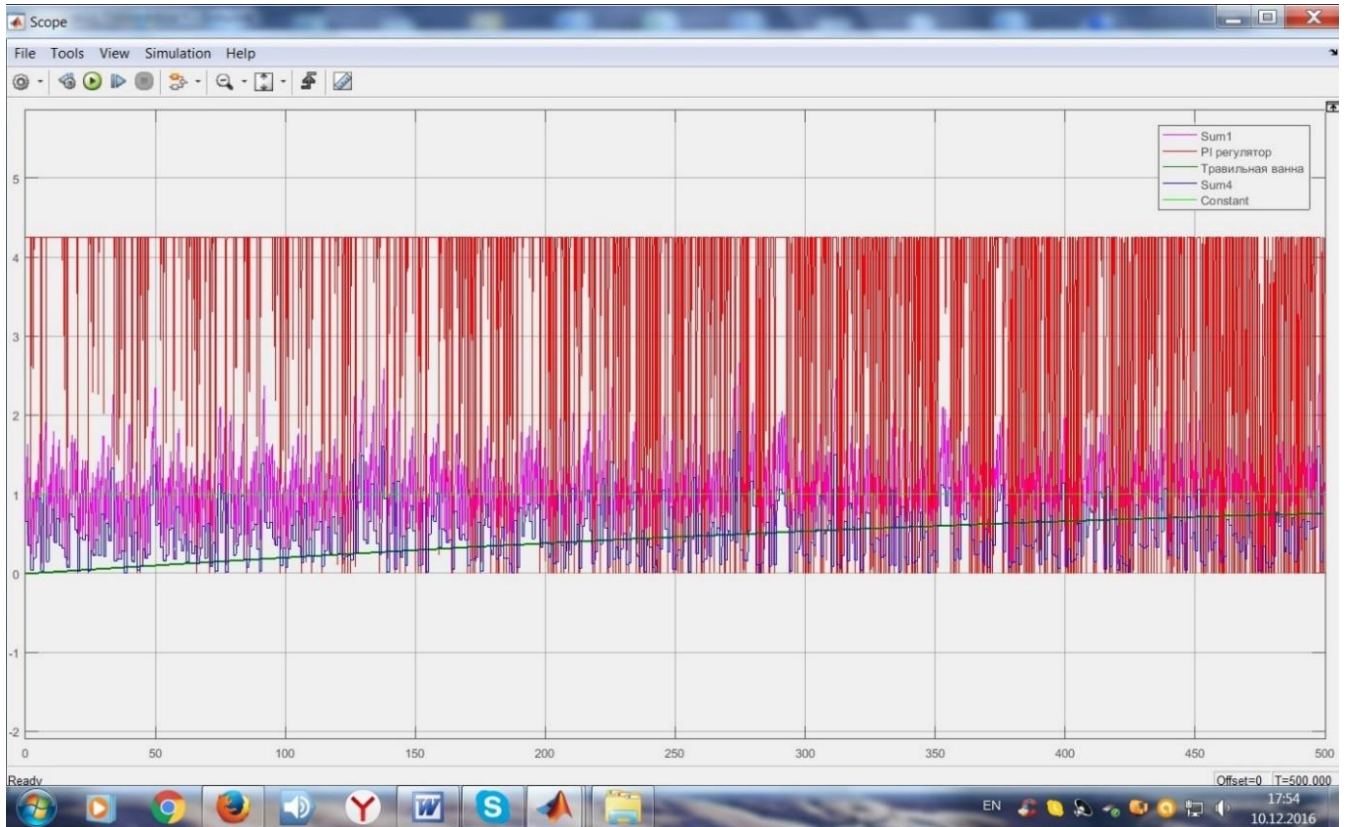


Рисунок Б.6 – Графік регулювання витрат теплоносія БТА за період $T = 500\text{с}$

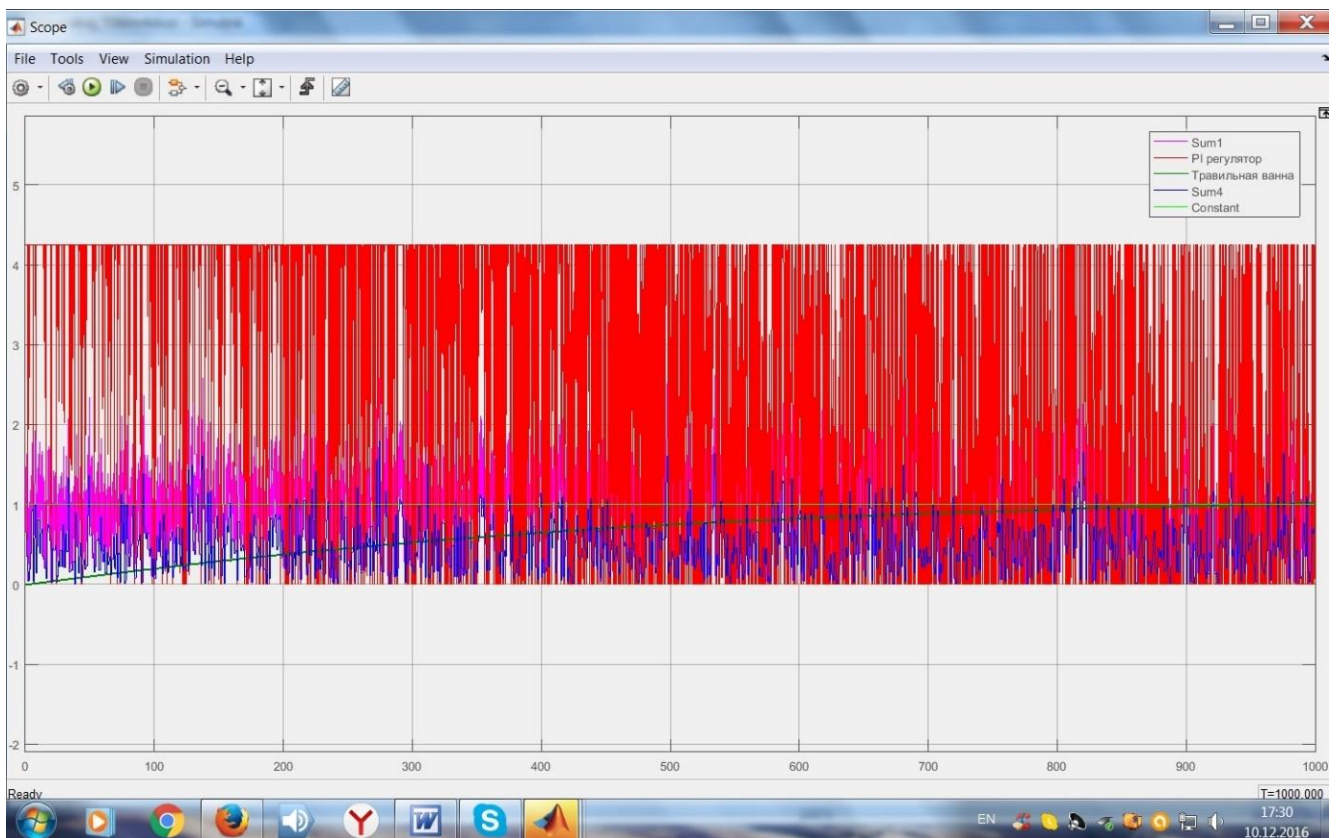


Рисунок Б.7 – Графік регулювання витрат теплоносія БТА за період $T = 10^3\text{с}$

ДОДАТОК В

Програмна модель прототипу контролера РТГ-2

```

#include <Serial.h>
#include <Math.h>

const int (nLPIN=6, nRPIN=7, n=15, statePin=1);
/* живлення -> PIN за напрямом поворота ДПЗ: PIN6 -left, PIN7 -right*/
const float (C0 =1, C[n], Kv[n], Delta[n], accFi =0.0001); // ! масиви ввести
/*ф. 3.24, 1-15-1: загрузка масивів коефф. РБМ Fi(G), точність поверту ДПЗ*/
const int N=375, K=1500;
/* N= об/хвилину, K=передавальний коеф. ЕлектроПриводу*/

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  float Fit1=0.0, Fit2=0.0, Gt1=0.0, Gt2=0.0; // ініціація початкових значень
}

void int turnOn (nPin, statePin, onTime)
{
  PINMODE (nPin,statePin);
  delay(onTime);
  PINMODE (nPin,!statePin);
  /* подача живлення до піна nPin тривалістю (onTime) мс, обчислює РБМ */
}
turnOn (nLPIN, statePin, 60000); // установлення ДПЗ в 0°- положення «закрито»

void loop() {
  LabelR: Serial.read (Gt2); /*отримання поточного завдання G* */
  float Fit2 = C0;

  for (int i = 0; i < n ; i++) { /*цикл обчислення завдання кута ДПЗ*/
    Fit2 = ++ (C[i]*exp (-(Kv[i]-Gt2)**2/(2*Delta[i]**2)));
  }
  if (abs(Fit2-Fit1) =< accFi) goto LabelR;

  if (Fit2>Fit1) nPin = nRPIN else nPin = nLPIN; /*визначення напрямку поверту ДПЗ*/
  int onTime = K*abs(Fit2-Fit1)/(60*N); /*обчислення тривалості подачі напруги*/
  turnOn (nPin, statePin, onTime);
  Fit1= Fit2;
  /*присвоєння попереднього значення кута стартовому стану для наступної ітерації*/
  delay(5000);
}

```

ДОДАТОК Д

Список наукових праць Ілюніна Олега Олеговича

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 Dovbnya, 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>. (Індексується у **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. (Індексується у **Scopus**).
3. Boldyryev S., Garev A., Ilunin 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. (Індексується 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>. (Індексується 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.

6. Илюнин 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.

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

8. Илюнин 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.

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

11. Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраев А.А. Нечеткая процедура оценивания предельно допустимой концентрации сульфата железа в травильных растворах. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 4. С.120–124. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/archive/Наукова_періодика/ite/2014/2014_4.pdf.

12. Демирский А.В., Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю. Нечеткая интерполяция концентрации компонентов технологических растворов. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 4. С. 35–41. URL: http://www.kpi.kharkov.ua/ite/uk/arhiv-nomeriv/2015/2015_4.pdf.

13. Бессонов А.А., Илюнин О.О., Руденко О.Г. Нейросетевое управление травлением несистемных дефектов стального проката. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2016. № 4. С. 52–61.

14. Пат. 104710 УКРАЇНА, МПК (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. Пристрій для безперервного травлення прокату листової вуглецевої сталі. Арсеньєва О.П., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Подпружников П.М., Селяков О.М., Тимофєєв В.А.; заявник та власник Харківський національний університет радіоелектроніки. № u 2012 09428; заявл. 02.08.12; опубл. 25.02.2014, Бюл. № 4. URL: <https://uapatents.com/5-104710-pristriijj-dlya-bezperervnogo-travlennya-prokату-smugi-vuglecevo-stali.html>.

15. Ilyunin 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>. (Індексується уScopus).

16. Ілюнін О.О., Удовенко С.Г., Шамраєв А.А. Нечеткое управление процессом непрерывного травления листовой углеродистой стали в условиях 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 керування: 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 першої науково-технічної конференції*. Черкаси: ЧДТУ, 2013. С.32.

19. Илюнин О.О., Удовенко С.Г., Шамраев А.А. Метод оценки качества работы контуров регулирования процессов производства листовой стали. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні: матеріали науково-технічної конференції (ІТММ-2014)*. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2014. С. 79–80.

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

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