УДК 681.52: 666:94

НЕЙРОННА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ВИПАЛУ КЛІНКЕРУ В ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ

МАЛИШЕВ О. І.[1*], *магістр,*
УЖЕЛОВСЬКИЙ В. О.[2], *к. т. н., доц.*
[1*] Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (050) 480-34-42, e-mail: olegys93@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8736-6897.
[2] Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (099) 446-59-21, e-mail: uzhelovsky2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2908-3116.

Анотація. ***Постановка проблеми.*** Обертові печі для випалу клінкеру широко використовуються на багатьох промислових підприємствах із виробництва цементу. Процес виготовлення клінкеру вимагає великих затрат енергії. Отримання кінцевого продукту з високими якісними показниками можливе шляхом контролю і регулювання заданих технологічних параметрів. В значній мірі це залежить від професійного рівня оператора та прийняття ним безпомилкових рішень. Багато підприємств, у яких в експлуатації знаходяться обертові печі, все ще використовують застаріле обладнання, яке не відповідає сучасним вимогам управління технологічними процесами випалу клінкеру. Питання покращення якісних показників, наразі є вкрай актуальним. Удосконалити технологічний процес випалу клінкеру можливо шляхом застосування систем керування з контролерами нечіткої логіки, або сучасних нейросистем керування. ***Аналіз літератури.*** На сьогоднішній день відомо багато літературних джерел та наукових праць у галузі розробки автоматизованих систем керування процесом випалу клінкеру. Значний вклад у створення систем керування та інтенсифікації процесу випалу внесли учені: В. К. Класен [4], П.В. Беседин [1], М. А. Вердіян [8]. У роботах цих науковців представлені методи створення систем керування випалом клінкеру, що покращують якісні показники відносно одного якогось параметру або забезпечують використання нечіткої логіки управління чи нейромережі з регулюванням одного контуру процесу обпалу. Аналіз літературних джерел показує, що нейронні системи управління є перспективним напрямком удосконалення технологічного процесу обпалу клінкеру і потребують подальшого розвитку. ***Мета та завдання.*** Метою дослідження є пошук можливих шляхів покращення якості випалу готового матеріалу (клінкеру) з одночасним зниженням енерговитрат, поліпшенням умов роботи оператора на підприємстві, зниженням загального часу випалу клінкеру шляхом створення автоматизованої системи керування з нейронним регулятором на основі еталонної моделі та безпосереднім її налаштуванням. ***Висновки.*** 1. У середовищі Matlab Simulink розроблено систему керування процесом випалу клінкеру в обертовій печі із використанням нейроконтролера на основі еталонної моделі Model Reference Controller та проведено моделювання системи керування. 2. Розроблено дві додаткові моделі технологічного процесу: загальну та еталонну, які використовуються на етапі навчання нейроконтролера. 3. На основі побудованих моделей проведено навчання ідентифікатора нейромережі та самого нейроконтролера. Експериментальним шляхом визначено необхідні параметри нейроконтролера та нейромережі. 4. У процесі навчання нейросистеми отримано графіки, які відображають різні етапи навчання нейромережі та нейроконтролера на основі еталонної моделі, включаючи графіки похибок під час навчанні, графіки відповідності вхідних параметрів до вихідних, графіки декількох етапів навчання нейроконтролера та інші. 5. Аналіз отриманих графіків процесу навчання і управління нейросистемою вказує, що розроблена система відповідає усім якісним показникам моделювання, може виконувати автоматизоване керування процесом випалу клінкеру в обертовій печі з великою точністю і бути рекомендованою до використання при проектуванні подібних систем.

Ключові слова: *випал, клінкер, обертова піч, імітаційна модель, нейронне керування, нейронний регулятор, нейронна система, нейромережа.*

НЕЙРОННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБЖИГА КЛИНКЕРА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

МАЛЫШЕВ О. И. [1*], *магистр,*
УЖЕЛОВСКИЙ В. А. [2], *к. т. н., доц.*
[1*] Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (050) 480-34-42, e-mail: olegys93@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8736-6897.
[2] Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (099) 446-59-21, e-mail: uzhelovsky2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2908-3116.

Аннотация. Постановка проблемы. Вращающиеся печи для обжига клинкера широко используются на многих промышленных предприятиях по производству цемента. Процесс изготовления клинкера требует больших затрат энергии. Получение конечного продукта с высокими качественными показателями возможно путем контроля и регулирования заданных технологических параметров. В значительной степени это зависит от профессионального уровня оператора и возможного принятия им безошибочных решений. Многие предприятия, в эксплуатации которых находятся вращающиеся печи, все еще используют устаревшее оборудование, которое не соответствует современным требованиям управления технологическими процессами обжига клинкера. Вопрос улучшения качественных показателей, все еще, является крайне актуальным. Усовершенствовать технологический процесс обжига клинкера возможно путем применения систем управления с контроллерами нечеткой логики, или современных нейросистем управления. ***Анализ литературы.*** На сегодняшний день известно много литературных источников и научных работ в области разработки автоматизированных систем управления процессом обжига клинкера. Значительный вклад в создание систем управления и интенсификации процесса обжига внесли такие ученые: В. К. Класен [4], П. В. Беседин [1], М. А. Вердиян [8]. В работах этих ученых представлены методы создания систем управления обжигом клинкера, улучшающие качественные показатели в отношении одного из параметров или обеспечивающие использование нечеткой логики управления или нейросети с регулировкой одного контура процесса обжига. Анализ литературных источников показывает, что нейронные системы управления являются перспективным направлением совершенствования технологического процесса обжига клинкера и требуют дальнейшего развития. ***Цель и задачи.*** Целью исследования является поиск возможных путей улучшения качества обжига готового материала (клинкера) с одновременным снижением энергозатрат, улучшением условий работы оператора на предприятии, снижением общего времени обжига клинкера путем создания автоматизированной системы управления с нейронным регулятором на основе эталонной модели и непосредственной ее настройкой. ***Выводы.*** 1. В среде Matlab Simulink разработана система управления процессом обжига клинкера во вращающейся печи с использованием нейроконтроллера на основе эталонной модели Model Reference Controller и проведено моделирование системы управления. 2. Разработаны две дополнительные модели технологического процесса: общую и эталонную, которые используются на этапе обучения нейроконтроллера. 3. На основе построенных моделей проведено обучение идентификатора нейросети и самого нейроконтроллера. Экспериментальным путем определено необходимые параметры нейроконтроллера и нейросети. 4. В процессе обучения нейросистемы получено графики, отражающие различные этапы обучения нейросети и нейроконтроллера на основе эталонной модели, включая графики ошибок при обучении, графики соответствия входных параметров к выходным, графики нескольких этапов обучения нейроконтроллера и другие. 5. Анализ полученных графиков процесса обучения и управления нейросистемой свидетельствует, что разработанная система соответствует всем качественным показателям моделирования, может выполнять автоматизированное управление процессом обжига клинкера во вращающейся печи с большой точностью и быть рекомендованной к использованию при проектировании подобных систем.

Ключевые слова: *обжиг, клинкер, вращающаяся печь, имитационная модель, нейронное управление, нейронный регулятор, нейронная система, нейросеть.*

NEURONS PROCESS CONTROL SYSTEM CLINKER BURNING IN ROTARY KILNS

MALYSHEV O. I. [1*], *Master,*
UZHELOVSKYI V. A. [2], *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*
[1*] Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (050) 480-34-42, e-mail: olegys93@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8736-6897.
[2] Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Education Establishment “Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, tel. +38 (099) 446-59-21, e-mail: uzhelovsky2015@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-2908-3116.

Summary. Raising of problem. Rotary kiln clinkers are widely used in many industrial plants for the production of cement. Clinker manufacturing process requires the large consumption of energy. Getting the quality of final product is possible by controlling and regulating the set of process parameters. It largely depends on the professional level of the operator and possible unmistakable solutions. Many industrial plants in which operation are the rotary kilns are still using outdated equipment that does not match to modern requirements of process control clinker. The question of improving the quality indicators is still extremely important. To improve the process of clinker burning is possible through the using of control systems with fuzzy logic controllers or modern neyrosystem control. **Analysis of the literature.** Currently, there is a lot of literature and scientific works in the field of automated control systems of the clinker burning process. Significant contribution to the development of control systems and intensify the process of firing have made by

such scholars: V. K. Class [4], P. V. Besedin [1], M. A. Verdiyan [8]. In the works of these scholars are presented methods for creating control systems clinker, improving quality indicators in relation to one of the options or providing use of fuzzy logic control and neural network with one control circuit for the burning process. The analysis of the literature demonstrates that the neural control systems are the promising way to improving the clinker burning process and require further development. **The purpose and objectives.** The aim of the study is to find opportunities to improve the quality of the firing of the finished material (clinker) while reducing power consumption, improving the work conditions of the operator at the plant, reducing the total time of the clinker burning through the creation of automated control system with neural controller, based on the reference model and its immediate setting. **Conclusions.** 1. In Matlab Simulink environment management system was developed clinker burning process in the rotary kiln with neyrocontroller based reference model Model Reference Controller and simulated control system. 2. Two additional process models are developed: general and reference that are used during the training phase neyrocontroller. 3. On the basis of the constructed models were trained neural network identifier and the neyrocontroller. Experimentally were determined the necessary parameters of the neyrocontroller and the neural network. 4. During training neural network were obtained graphs showing the different stages of neural network learning and neyrocontroller based on the standard model, including graphic errors during training, the graph corresponds to the input parameters to the source, several stages of training schedules neyrocontroller and others. 5. Analysis of the graphs of the learning process and control neural network system demonstrates that the developed system matches all the quality indicators modeling is able to perform automated control of the clinker burning process in the rotary kiln with high precision and to be recommended for use in the design of such systems.

Key words: *burning, clinker, rotary kiln, the simulation model, neural control, neural controller, the neural system, neural network.*

Постановка проблеми. Сьогодні цемент в основному виробляють із використанням обертових печей випалу клінкеру. Велике значення при виробництві цементу відіграє випал клінкеру. Від якості клінкеру залежить якість цементу.

Ефективність роботи обертових печей цементної промисловості у значній мірі залежить: від налагодження технологічного устаткування; процесу випалу клінкеру і режиму експлуатації печей під час випуску клінкеру високої активності. Комплекс процесів, що відбуваються в обертових печах під впливом теплової енергії, досить великий і складний.

Однією з важливих цілей керування процесом випалу в обертовій печі є досягнення високої якості продукту, мінімізація витрат палива і досягнення високих техніко-економічних показників. На практиці якість продукту визначається шляхом ручного відбору проб із періодичністю близько однієї години. Тому, актуальним є контроль якості, що здійснюється у реальному часі і заснований на безпосередньому спостереженні за зонами печі нейрокомп'ютером.

У зв'язку з цим, досягнення високої якості продукції, з мінімальними енерговитратами при максимальній продуктивності, можливе завдяки створенню нейросистеми керування із «вчителем» (оператором) на основі нейрорегулятора. Така система здатна використовувати знання, набуті в процесі її навчання оператором, коректувати режим випалу та підтримувати необхідні параметри процесу випалу.

Аналіз літератури. У [4] пропонується використовувати для побудови математичної моделі колосникового холодильника нейронну мережу Елмана, яка відображає рух клінкеру на колосниковій решітці, теплообмін між повітрям і клінкером та рух повітря. При цьому в системі відсутнє безпосереднє регулювання параметрів печі в процесі випалу.

У [8] розглядається спосіб регулювання процесу охолодження клінкеру в холодильнику, який включає вимір витрат повітря на вході і температури клінкеру на виході з холодильнику без врахування інших значень температури в процесі випалу.

У роботі [1] дається опис застосування нечіткої логіки і теорії нечіткого керування для рішення задач керування процесом випалу, а також виконаний синтез системи нечіткого регулювання витрат палива.

У [5] розроблено комп'ютерну програму числового моделювання тепломасообмінних процесів при дифузійному горінні природного газу в експлуатаційних умовах цементної обертової печі. Однак точність застосованої диференціальної моделі радіаційного переносу, достатня для більшості інженерних розрахунків, в даному випадку

не дозволяє надійно розрахувати положення зони займання

У науковій роботі [6] розглянуто шляхи підвищення ефективності процесу випалу клінкеру за рахунок оптимізації управління випалом шляхом розробки автоматизованої системи керування, локальні підсистеми якої реалізують керування обертовою цементною піччю. Недоліком такої системи є те, що при управлінні вона враховує лише зону спікання та охолодження.

На основі аналізу літератури можна зробити висновок, що актуальною є розробка нейронної системи управління на основі нейрорегулятора з еталонною моделлю, яка б виконувала регулювання параметрів процесу випалу в реальному часі по всьому контуру цементної печі.

У науковій літературі описано багато прикладів практичного використання нейронних мереж для розв'язання задач керування різноманітними об'єктами. На даний момент розроблено декілька методів нейрокерування: імітуюче, інверсне, з прогнозуванням, багатомодульне, гібридне, допоміжне та інші [3].

У пакеті прикладних програм Neural Network Toolbox системи Matlab [2] приведені найбільш теоретично обгрунтовані нейроконтролери**,** які можуть бути використані при створенні системи керування випалом клінкеру:

- із прогнозуванням (Neural Predictive Control – NPC);
- з моделлю нелінійної авторегресії з ковзаючим середнім (Nonlinear Auto Regressive Moving Average – NARMA-L2);
- з еталонною моделлю (Model Reference Controller – MRC).

Мета та завдання. Метою дослідження є пошук можливостей покращення якості випалу готового матеріалу (клінкеру) з одночасним зниженням енерговитрат у процесі роботи, поліпшенням умов роботи оператора на підприємстві, зниженням загального часу випалу клінкеру шляхом створення автоматизованої системи керування з нейронним регулятором на основі еталонної моделі та безпосереднім її налаштуванням.

Виклад основного матеріалу. У науковій роботі створено і досліджено імітаційну модель нейросистеми автоматичного управління з еталонною моделлю , яка виконує керування процесом випалу клінкеру в обертовій печі в середовищі Matlab Simulink Neural Network Toolbox. Для дослідження нейросистеми керування процесом випалу клінкеру було також додатково створено дві імітаційні моделі, які використовували для налаштування загальної моделі з нейроконтролером.

Структурна схема, що демонструє принцип побудови системи керування з еталонною моделлю, приведена на рисунку 1 і створена на основі результатів дослідження, наведених у [7].

Відповідно до структурної схеми виконано побудову нейросистеми у середовищі Matlab Simulink (рис. 2).

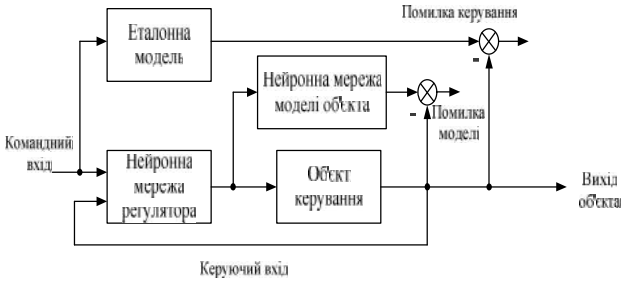

Рис. 1. Структурна схема САК з еталонною моделлю

Імітаційна модель включає: блок формування випадкових східчастих імпульсів (Uniform Random Number); нейроконтролер на основі еталонної моделі (Model Reference Controller); підсистему об'єкта керування (Pech) та вихідний осцилограф (x(2y)Graph) з годинником (Clock).

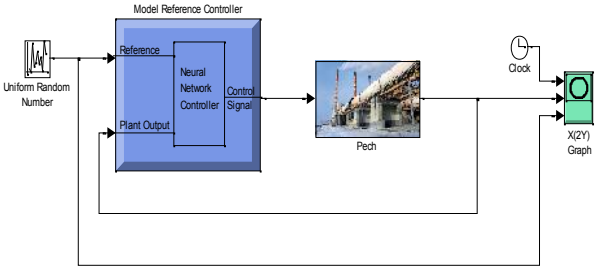

Рис. 2. Модель САК з нейроконтролером у середовищі Simulink

Після задання параметрів та вибору необхідної моделі для ідентифікатора і конт-

ролера виконувалася генерація даних. На підставі згенерованих даних ідентифікатора Plant Identification отримано графік (рис. 3), який відображає дані на вході системи з нейроконтролером та дані, на виході ідентифікатора моделі. Ці дані в подальшому використовуються для навчання нейромережі з відповідними параметрами.

Програма генерує навчальні дані шляхом впливу випадкових східчастих впливів на модель Simulink керованого процесу.

Перше навчання відбувається з використанням 5 нейронів та 6000 навчальних прикладів. Як можна побачити з графіка (рис.3), система виконує необхідне відпрацювання вхідного сигналу, а на виході їх розузгодження із вхідними.

Наступним етапом є навчання тренованої нейромережі. У процесі навчання будується структура нейромережі та графіки процесу навчання ідентифікатора. Згідно заданих параметрів, нейронна мережа являється багатошаровою.

Під час навчання нейромережі можна оцінювати якість вихідних сигналів. Вони досить точно описують вхідний сигнал, тобто якість моделювання достатня. Відповідна похибка є, але вона стає мінімальною у разі збільшення кількості нейронів.

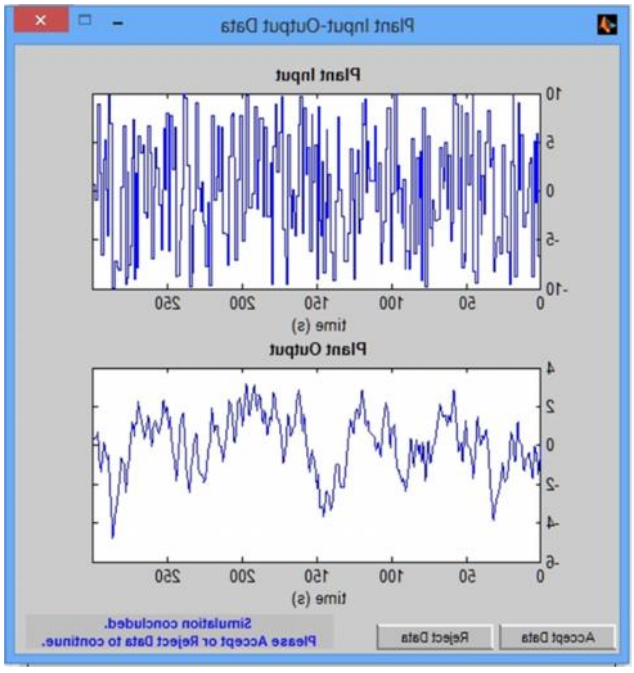

Рис. 3. Графік навчальних даних вхідного та вихідного сигналів

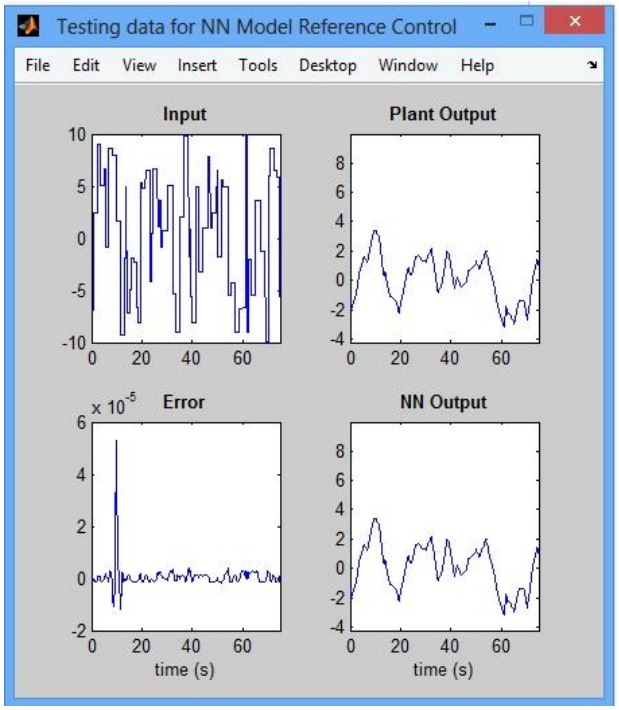

Рис. 4. Графіки тестових даних

Таким чином, за оптимальної кількості нейронів та тренувальних етапів досягається велика точність відпрацювання сигналів нейроконтролером.

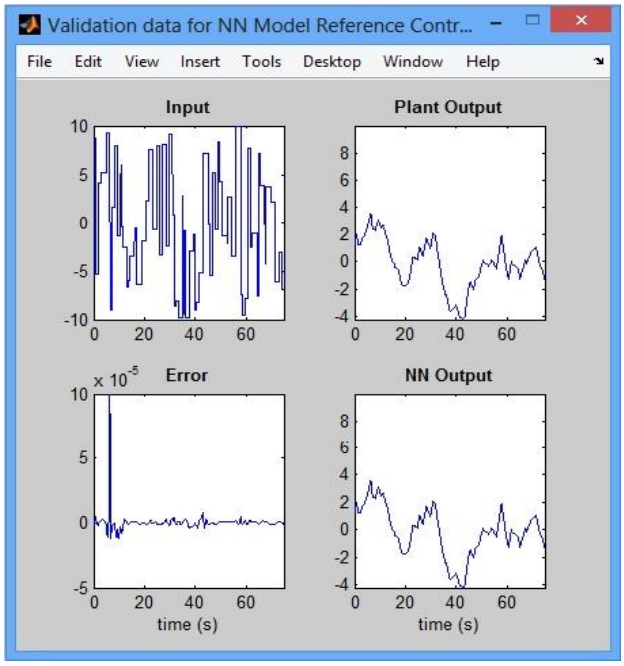

Рис. 5. Графіки перевірки даних

На рисунках 4 - 6 наведено графіки навчання ідентифікатора нейроконтролера.

Після навчання ідентифікатора контролера Plant Identification та отримання всіх графіків виконувалося навчання самого кон-

тролера на основі загальної еталонної моделі керування процесом випалу клінкеру.

Для контролера Model Reference Controller були задані відповідні дані процесу навчання. Після вибору еталонної моделі, числа нейронів та загальних параметрів відбувається етап створення тренувальних даних для нейроконтролера Model Reference Controller протягом 3000 начальних прикладів (рис. 7).

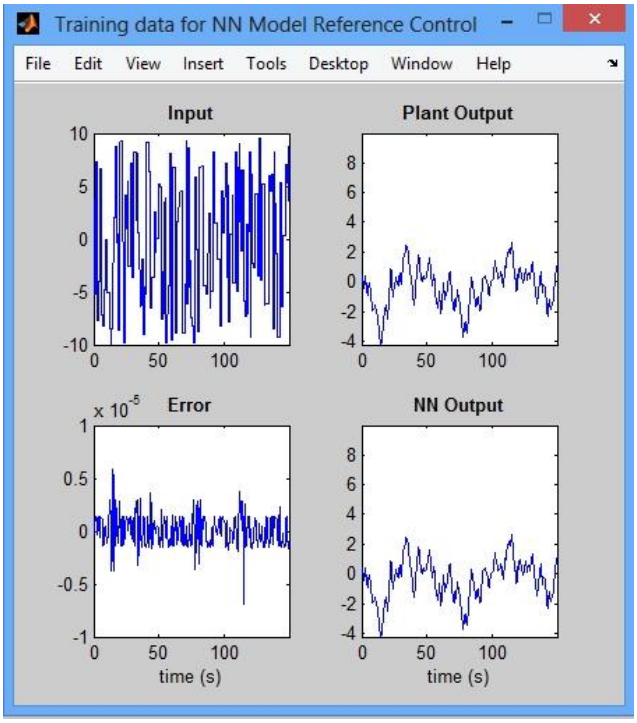

Рис. 6. Графіки тренувальних даних

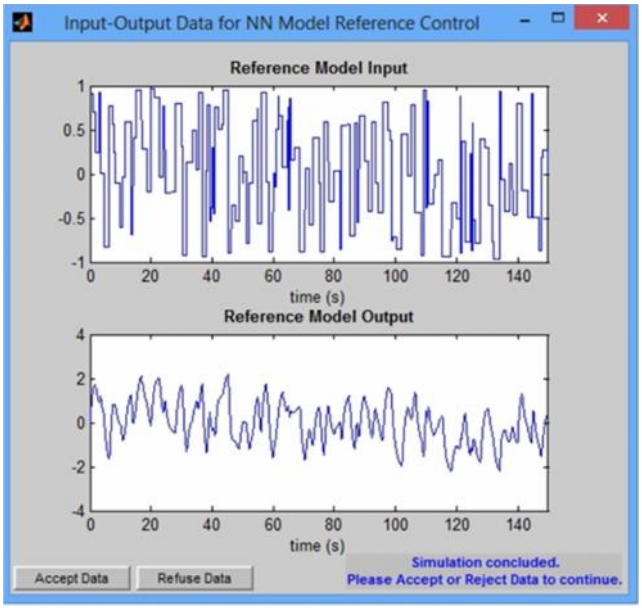

Рис. 7. Графіки вхідних та вихідних сигналів нейроконтролера

Після отримання тренувальних даних виконувалося навчання нейромережі нейроконтролера відповідно до кількості заданих етапів навчання та числа сегментів, які будуть обчислені на кожному етапі навчання нейроконтролера.

Кількість етапів навчання та сегментів кожного етапу повинна бути оптимальною та відповідати вимогам точності відпрацювання вхідного сигналу. У зв'язку з цим, експериментальним шляхом для кожного відповідного процесу були підібрані необхідні співвідношення кількості етапів до числа сегментів навчання.

По завершенню генерації тренувальних даних та отриманню графіків навчання нейроконтроллера маємо кінцевий результат представлений на рисунку 8.

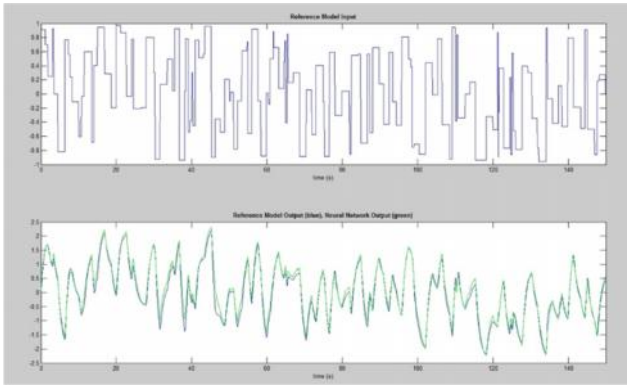

Рис. 8. Графіки вхідних сигналів моделі та вихідних сигналів моделі і відпрацьованих сигналів нейромережею

На отриманих кінцевих графіках навчання нейроконтролера (рис.8), можна побачити, що крива 2 (знизу), яка відповідає вихідному сигналу відпрацювання нейромережі, майже на 100% повторює вихідний сигнал моделі. Нейроконтролер виконав оптимізацію вхідного сигналу згідно з еталонною моделлю та точно відтворив вихідний сигнал системи. Все це дає змогу стверджувати, що здійснене навчання нейрокомп'ютера за допомогою «вчителя» дозволить керувати технологічним процесом та самостійно приймати необхідні рішення щодо регулювання тих чи інших параметрів, системи керування.

Тепер модель на рисунку 2 налаштована та може в повній мірі виконувати автомати-

чне керування технологічним процесом випалу клінкеру в обертовій печі.

На рисунку 9 наведено графік автоматичного регулювання нейро-контролером процесом випалу на підставі випадкових чисел, які надходять на вхід і моделюють роботу оператора.

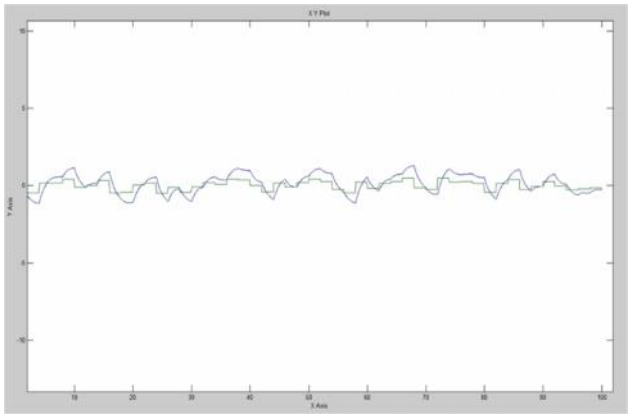

Рис. 9. Графік керуючого сигналу відпрацювання нейроконтролера при подачі на вхід випадкових чисел

Аналізуючи графіки можна зробити висновок, що система працює з достатньою точністю, а подальше збільшення кількості нейронів для навчання системи нейроконтролера підвищить точність до більш високого показника якості.

Висновки. 1. У середовищі Matlab Simulink розроблено систему управління процесом обпалу клінкеру в обертовій печі з використанням нейроконтролера на основі еталонної моделі Model Reference Controller та проведено моделювання системи керування.

2. Розроблено дві додаткові моделі технологічного процесу: загальну та еталонну, які використовуються на етапі навчання нейроконтролера.

3. На основі побудованих моделей проведено навчання ідентифікатора нейромережі та самого нейроконтролера. Експериментальним шляхом визначено необхідні параметри нейроконтролера та нейромережі.

4. У процесі навчання нейросистеми отримано графіки, які відображають різні етапи навчання нейромережі та нейроконтролера на основі еталонної моделі, включаючи графіки похибок під час навчанні, графіки відповідності вхідних параметрів до вихідних, графіки декількох етапів навчання нейроконтролера та інші.

5. Аналіз отриманих графіків процесу навчання і керування нейросистемою вказує, що розроблена система відповідає усім якісним показникам моделювання, може виконувати автоматизоване керування процесом випалу клінкеру в обертовій печі з великою точністю і бути рекомендованою до використання при проектуванні подібних систем.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Беседин П. В. Методы лингвистической аппроксимации в задачах управления обжигом клинкера / П. В. Беседин, А. В. Новиченко, С. В. Андрущак // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 4, ч. 1. – С. 13-17.
2. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 + Simulink 5/6. Инструменты ИИ и биоинформатики / В. П. Дьяконов, В. В. Круглов. – Москва : Солон-пресс, 2006. – 456 с.
3. Дьяконов В. П. Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Основы применения. Полное руководство пользователя / В. П. Дьяконов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2002. – 768 с.
4. Классен В. К. Технология и оптимизация производства цемента: краткий курс лекций : учеб. пособие / В. К. Классен. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.
5. Кузнецов В. А. Численное моделирование горения и теплообмена в цементной вращающейся печи / В. А. Кузнецов, О. А. Рязанцев, А. В. Трулёв // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2011. – № 4. – С. 161-164.
6. Порхало В. А. Автоматизация процесса обжига клинкера на осн. стат. идент. динамических параметров вращающейся печи : автореф. дис. канд. техн. наук : 05.13.06 ; защищена 26.06.13 / Порхало В. А. ; БГТУ им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2013. – 20 с.
7. Способ регулирования процесса обжига клинкера : а. с. 1587024 СССР / М. А. Вердиян, Е. Н. Головин, В. В. Бачурин, Д. Ф. Федосеев, А. Я. Литвин, Л. И. Пономарев, П. П. Пархоменко (СССР). – № 4460831/23-33 ; заявл. 18.07.88 ; опубл. 23.08.90, Бюл. № 31. – 3 с. – Режим доступа: http://www.findpatent.ru/patent/158/1587024.

8. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления : учеб. пособие для вузов / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин. – Москва : Высш. шк., 2002. – 183 с.

REFERENCES

1. Besedin P. V., Novichenko A. V., Andrushchak S. V. *Metody lingvisticheskoy approksimacii v zadachah upravleniya obzhigom klinkera* [Linguistic approximation methods in control problems of firing clinker]. *Fundamental'nye issledovanija*. 2013, no. 4, vol. 1, pp. 13-17. (in Russian).
2. D'yakonov V. P., Kruglov V. V. *MATLAB 6.5 + Simulink 5/6. Instrumenty II i bioinformatiki* [MATLAB 6.5 + Simulink 5/6. Tools II and bioinformatics].Moscow, Solon-press, 2006. 456 p. (in Russian).
3. D'yakonov V. P. *Matlab 6/6.1/6.5 + Simulink 4/5. Osnovy primeneniya* [Matlab 6 / 6.1 / 6.5 + Simulink 4/5. Fundamentals of application]. *Polnoe rukovodstvo pol'zovatelya* – Full user manual. Moscow, SOLON-Press, 2002. 768 p. (in Russian).
4. Klassen V. K. *Tehnologiya i optimizaciya proizvodstva cementa* [Technology and optimization of cement production]. *Ucheb. posobie* – Manual. Belgorod, Izd-vo BGTU, 2012. 308 p. (in Russian).
5. Kuznetsov V. A., Ryazantsev O. A., Trulyev A. V. *Chislennoe modelirovanie goreniya i teploobmena v cement-noy vrashhayushheysya pechi* [Numerical simulation of combustion and heat transfer in the cement rotary kiln]. 2011, no. 4, pp. 161-164. (in Russian).
6. Porhalo V. A. *Avtomatizaciya processa obzhiga klinkera na osn. stat. ident. dinamicheskih parametrov vrashhayushheysya pechi : avtoref. dis. kand. tehn. nauk* [Automation clinker burning process on the main stat. ident. dynamic parameters of the kiln. Author's abstract.]. BGTU im. V. G.Shuhova, Belgorod, 2013. 20 p. (in Russian).
7. Verdiyan M. A., Golovin E. N., Bachurin V. V., Fedoseev D. F., Litvin A. Ya., Ponomarev L. I., Parkhomenko P. P. *Sposob regulirovaniya processa obzhiga klinkera* [A method for controlling the clinker burning process]. Patent, no. a.s. 1587024 USSR, 1990. Available at: http://www.findpatent.ru/patent/158/1587024. (in Russian).
8. Terekhov V. A., Efimov D. V., Tyukin I. Yu. *Neyrosetevye sistemy upravleniya* [Neural network control system] *Ucheb. posobie dlya vuzov* – Manual. Moscow, Vyssh. shk., 2002. 183 p. (in Russian).

Стаття рекомендована до друку 06.07.2015 р.
Рецензент: д. т. н. Заренбін В. Г.
Надійшла до редколегії: 12.06.2015 р. Прийнята до друку: 15.06.2015 р.