

УДК 666:94.052:681.52

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.250918.66.198

РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННОЇ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБПАЛУ КЛІНКЕРА У ОБЕРТОВИХ ПЕЧАХ

УЖЕЛОВСЬКИЙ В. О.¹, канд. техн. наук, доц.,

УЖЕЛОВСЬКИЙ А. В.², канд. техн. наук, доц.,

КРАВЕЦЬ Г. В.³, маг.,

БАБЕНКО А. В.⁴, маг.

¹Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: uva@mail.pgasa ORCID ID 0000-0001-7328-8226

²Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: avuzhel@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5228-2463

³Дніпровський технікум зварювання та електроніки імені Є. О. Патона, Дніпро, вул. Володимира Моссаковського, 2-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-23-61, e-mail: ugalene30@gmail.com

⁴Кафедра автоматики та електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: babenkonasya@gmail.com

Анотація. *Постановка проблеми.* У промисловості виконано великий обсяг робіт зі створення і впровадження спеціалізованих приладів, установок автоматичного контролю, локальних систем автоматичного регулювання, розроблення автоматичних систем управління виробництвом (АСУВ) із застосуванням керуючих обчислювальних машин (КОМ). Автоматизація виробничих процесів посідає одне з провідних місць у комплексі технічних засобів, сприяє підвищенню продуктивності праці і поліпшенню якості продукції в усіх галузях промисловості, в тому числі і в промисловості будівельних матеріалів. Однак не слід вважати, що лише проведення звичайних налагоджувальних робіт може забезпечити підтримку оптимального процесу випалу клінкера.

На перебіг технологічного процесу можуть впливати такі фактори як: фізичний стан обслуговуючого персоналу, дія навколишнього середовища на технічні параметри автоматичних пристроїв, елементи автоматизації, неадекватна реакція операторів одо прийняття рішень. Оптимальне рішення може бути прийняте експертною радою у складі досвідчених фахівців, однак воно затратне. Перспективний напрямом в організації підтримки бажаного оптимального режиму випалу клінкера застосування сучасних засобів обчислювальної техніки з використанням нейронних мереж та нейроконтролерів. Створення автоматизованої системи управління з нейронним регулятором на основі еталонної моделі та безпосереднім її налаштуванням для конкретних механізмів технологічних процесів потребує додаткових досліджень для вибору методу навчання нейроконтролера.

Методика. Запропонована послідовність супервізорного навчання нейроконтролера базується на попередньому експериментальному визначенні дискретності вхідного навчального сигналу. Такий підхід дозволяє здійснити раціональний вибір кількості нейронів і уроків навчання. **Результати.** Установлено, що попередній вибір тривалості вхідного сигналу значно скорочує на початковій стадії затрати часу на навчання нейроконтролера, а розроблена система регулювання відповідає усім якісним показникам моделювання і відпрацьовує вхідні сигнали з бажаною точністю та здатна реагувати на збурювальні дії навколишнього середовища з мінімальною похибкою. **Наукова новизна.** Удосконалено послідовність супервізорного навчання нейроконтролера для роботи в системах автоматичного регулювання технологічних процесів.

Практична значимість. Запропонована послідовність супервізорного навчання нейроконтролера скорочує затрати часу на стадії проектування подібних нейроконтролерних систем автоматичного регулюваннята дозволяє підвищити точність і надійність їх роботи.

Ключові слова: обпал; клінкер; обертова піч; імітаційна модель; нейронне управління; нейронний регулятор; нейронна система; нейромережа

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕЙРОННОЙ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЖИГА КЛИНКЕРА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

УЖЕЛОВСКИЙ В. А.¹, канд. техн. наук, доц.,

УЖЕЛОВСКИЙ А. В.², канд. техн. наук, доц.,

КРАВЕЦЬ Г. В.³, *маг.*,
БАБЕНКО А. В.⁴, *маг.*

¹Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: uva@mail.pgasa, ORCID ID 0000-0001-7328-8226

²Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: avuzhel@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5228-2463

³Днепропетровский техникум сварки и электроники имени Е. О. Патона, Днепро, ул. Владимира Моссаковского 2-А, 49600, Украина, тел. +38 (0562) 47-23-61, e-mail: ugalene30@gmail.com

⁴Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 471700, e-mail: babenkonastya@gmail.com

Аннотация. Постановка проблемы. В промышленности выполнен большой объем работ по созданию и внедрению специализированных приборов, установок автоматического контроля, локальных систем автоматического регулирования, по разработке автоматических систем управления производством (АСУП) с использованием управляющих вычислительных машин (УВМ). Автоматизация производственных процессов занимает одно из ведущих мест в комплексе технических средств, способствует повышению производительности труда и улучшению качества продукции во всех отраслях промышленности, в том числе и в промышленности строительных материалов.

Однако не следует считать, что лишь проведение обычных наладочных работ может обеспечить поддержку оптимального процесса обжига клинкера. На протекание технологического процесса могут воздействовать такие факторы как: физическое состояние обслуживающего персонала, влияние окружающей среды на технические параметры автоматических устройств, элементы автоматизации, неадекватная реакция операторов по принятию решений, которые обеспечивают оптимизацию процесса. Оптимальное решение может быть принято экспертным советом в составе опытных специалистов, однако оно достаточно затратное.

Перспективным направлением в организации поддержки желательного оптимального режима обжига клинкера является применение современных средств вычислительной техники с использованием нейронных сетей и нейроконтроллеров. Создание автоматизированной системы управления с нейронным регулятором на основе эталонной модели и непосредственной ее настройкой для конкретных механизмов технологических процессов требует дополнительных исследований при выборе метода нейроконтроллера.

Методика. Предложенная последовательность супервизорного обучения нейроконтроллера базируется на предыдущем экспериментальном определении дискретности входного учебного сигнала. Такой подход позволяет осуществить рациональный выбор количества нейронов и уроков обучения. **Результаты.** Установлено, что предварительный выбор длительности входного сигнала значительно сокращает на начальной стадии затраты времени на обучение нейроконтроллера, а разработанная система регулирования отвечает всем качественным показателям моделирования и обрабатывает входные сигналы с желательной точностью и способна реагировать на возмущающие действия окружающей среды с минимальной погрешностью. **Научная новизна.** Усовершенствована последовательность супервизорного обучения нейроконтроллера для работы в системах автоматического регулирования технологических процессов. **Практическая значимость.** Предложенная последовательность супервизорного обучения нейроконтроллера сокращает затраты времени на стадии проектирования подобных нейроконтроллерных систем автоматического регулирования и позволяет повысить точность и надежность их работы.

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

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF RATIONAL PARAMETERS OF NEURON SIMULATION MODEL OF SYSTEM ADJUSTING TEMPERATURES OF BURNING OF CLINKER IN THE REVOLVED STOVES

UZHELOVSKIY V. O.¹, *Cand. Sc.(Tech), Assoc. Prof.*,

UZHELOVSKIY A. V.², *Cand. Sc.(Tech), Assoc. Prof.*,

KRAVETS G. V.³, *master's degree*,

BABENCO A. V.⁴, *master's degree.*

¹Department of automation and electrical engineering, State higher educational establishment the «Придніпровська state academy of building and architecture», street Чернышевського, 24th, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 471700, e-mail: uva@mail.pgasa, ORCID ID 0000-0001-7328-8226

²Department of automation and electrical engineering, State higher educational establishment the «Придніпровська state academy of building and architecture», street Чернишевського, 24th, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 471700, e-mail: avuzhel@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5228-2463

³Dniprovsky Technical College of welding and electronics named after E.O. Paton, Dnipro, st. Volodymyr Mossakovsky 2A, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-23-61, e-mail: ugalene30@gmail.com

⁴Department of automation and electrical engineering, State higher educational establishment the «Придніпровська state academy of building and architecture», street Чернишевського, 24th, 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 471700, e-mail: babenkonastyia@gmail.com

Annotation. *Aim.* In industry the large volume of works is executed on creation and introduction of the specialized devices, options of automatic control, in-plant systems of automatic control, on development of automatic control system by a production (АСУП) with the use of managing calculable machines (УВМ). Automation of productive processes occupies one of leading places in the complex of technical equipments, assists the increase of the labour productivity and improvement of quality of products in all industries of industry, including in industry of build materials. However, it is not necessary to consider that only realization of ordinary adjusting works can provide support of optimal process of burning of clinker. On flowing of technological process such factors can influence as: bodily condition of auxiliary personnel, influence of environment on the technical parameters of automatic devices, elements of automation, inadequate reaction of operators on making decision, which provide optimization of process. An optimal decision can be accepted by expert advice in composition the experienced specialists, however this expense enough decision. Perspective direction in organization of support of the desirable optimal mode of burning of clinker is application of modern tools of the computing engineering with the use of neuron networks and нейроконтролеров. Creation of CAS of management with a neuron regulator on the basis of standard model and her direct tuning for the concrete mechanisms of technological processes requires additional researches at a choice and method of studies of нейроконтролера. *Methodology.* The offered sequence of supervisor studies of нейроконтролера is based on previous експериментальном determination of discreteness of entrance educational signal. Such approach allows to carry out the rational choice of amount of neurons and lessons of studies. Results. It is set that pre-election of duration of entrance signal considerably abbreviates on the initial stage of expense of time on the studies of нейроконтролера, and the worked out system of adjusting answers all high-quality indexes of design and works off entrance signals with desirable exactness and able to react on the revolting actions of environment with a minimum error. Scientific novelty. The sequence of supervisor studies of нейроконтролера is improved for work in the systems of automatic control of technological processes. Practical meaningfulness. The offered sequence of supervisor studies of нейроконтролера reduces costs time on the stage of planning of the similar нейроконтролерних systems of automatic control and allows to promote exactness and reliability of their work.

Keywords: burning; clinker; circulating stove; simulation model; neuron management; neuron regulator; neuron system

Постановка проблеми. Обертові печі широко використовуються у виробництві цементу. Під час роботи цементних обертових печей оператор, як правило, здійснює суб'єктивне візуальне спостереження і контроль параметрів процесу випалу та використовує їх далі для прийняття рішення управління піччю.

У цементних обертових печах, що працюють мокрим способом виробництва, оператор враховує такі параметри, як стан матеріалу, факела, розмір гранул, величина шару клінкеру на виході зони охолодження печі, кут підйому матеріалу, запиленість, загальний стан зони спікання обертової печі. Контроль названих параметрів процесу випалу в зонах спікання і охолодження печі дозволяє операторам не тільки керувати процесами в цих зонах, а і використовувати їх для управління всією обертовою піччю [2-4; 6].

Ефективність роботи обертових печей цементної промисловості значною мірою залежить від налагодження технологічного устаткування, процесу випалу клінкеру, режиму експлуатації печей під час випуску клінкеру високої активності, мінімальних витрат палива і високих техніко-економічних показників.

Випал клінкеру – один із найскладніших енергоємних процесів. Загальні енерговитрати на виробництво цементу розподіляються приблизно таким чином: підготовка сировини – 10 %, випал клінкеру – 79 %, помол цементу – 10 %, інше – 1 %. Тому налагодження процесу випалу, зниження енерговитрат, насамперед витрат палива, набувають виняткового значення [2].

Аналіз публікацій. У науковій літературі описано багато прикладів практичного використання нейронних мереж для розв'язання задач керування

різноманітними об'єктами. Наразі розроблено декілька методів нейрокерування: імітуюче, інверсне, з прогнозуванням, багатомодульне, гібридне, допоміжне та ін. [7]. Значний вклад у створення систем керування процесом випалу внесли вчені: В. К. Класен [2], П. В. Беседін [1], М. А. Вердіян [6]. Виходячи з цього, можна зробити висновок що нейронні системи управління - це перспективний напрям удосконалення технологічного процесу обпалу клінкеру, що потребує подальшого розвитку.

Мета та завдання. Метою дослідження становить пошук можливостей поліпшення 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 управління з нейронним регулятором на основі еталонної моделі та безпосереднім її налаштуванням. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення автоматизованих технологічних комплексів, що забезпечують раціональне та оптимальне керування роботи обортових печей.

Нижче наведено розроблену імітаційну модель нейронної системи керування випалом клінкеру в обортових печах із використанням прикладного пакета MATLAB. Для дослідження роботи моделі створено еталонну модель (рис. 1), яка була використана в процесі налаштування нейроконтролера.

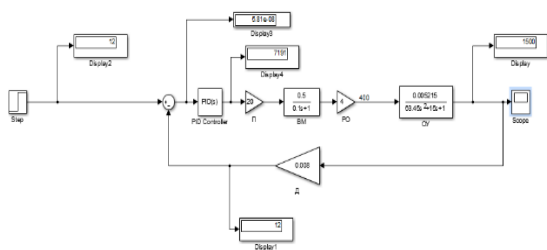


Рис. 1. Структурна схема еталонної моделі системи автоматичного регулювання температури обпалу клінкеру в обортовій печі

Супервізорне навчання нейроконтролера здійснено за методикою, запропонованою в [7]. Імітаційна нейронна модель керування в

зоні спікання клінкеру розроблена із врахуванням динамічних параметрів обортової печі обпалу, наведених у [5] (рис. 1).

Імітаційна модель включає: блок формування випадкових східчастих імпульсів (UniformRandomNumber); нейроконтролер на основі еталонної моделі (ModelReferenceController); підсистему об'єкта керування (Pech) та вихідний осцилограф (x(2y)Graph) з годинником (Clock) (рис. 2).

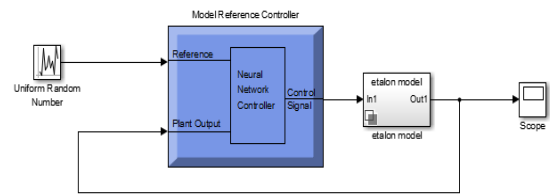


Рис. 2. Імітаційна модель САК температурів зони спікання печі випалу клінкеру з нейроконтролером у середовищі Simulink

Налаштування контролера здійснюється в два етапи. На першому етапі проводиться ідентифікація об'єкта управління (навчання ідентифікаційної МНС), а на другому - навчання керуючої БНС за умови, щоб поведінка замкнутої системи «контролер - об'єкт управління» була б ідентичною поведінці заздалегідь обраної моделі. Таким чином, у вибраному контролері реалізується стратегія навчання «з учителем».

Перше налаштування здійснювалося з використанням 10 нейронів та 6 000 навчальних уроків.

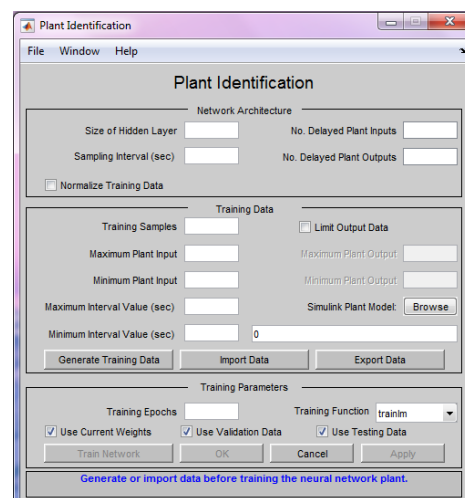


Рис. 3. Вікно ідентифікатора PlantIdentification

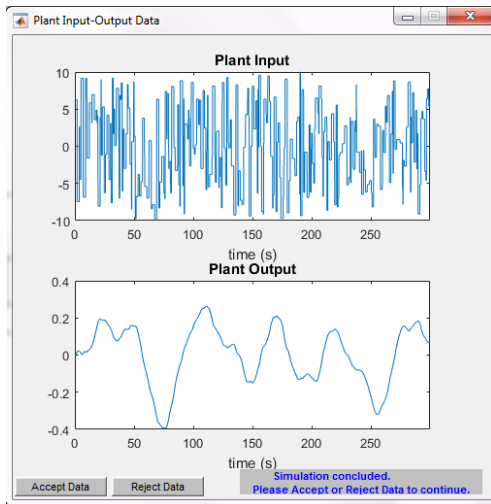


Рис. 4. Налаштування процесу ідентифікації об'єкта управління

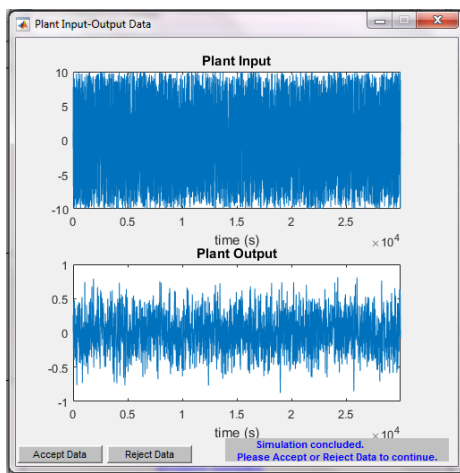


Рис. 5. Графік навчальних даних вхідного та вихідного сигналів зі збільшеною тривалістю дискретних відліків

Результати моделювання, наведені на графіку (рис. 4), показали, що система не встигає виконувати необхідне відпрацювання вхідного сигналу і на виході спостерігається неякісне навчання.

На такий результат може впливати не тільки кількість нейронів, а й частота дискретних відліків, які подаються на вхід. У зв'язку з цим були проведені дослідження процесу навчання нейроконтролера шляхом зміни тривалості вхідного сигналу і знаходження раціональних значень, за яких система буде якісно обробляти вхідний сигнал.

На рисунку 5 відображено результат моделювання, з якого видно, що у разі збільшення тривалості дискретних відліків система більш точно описує вхідний сигнал,

тобто якість моделювання стає достатньою. Відповідна похибка присутня, але вона мінімальна.

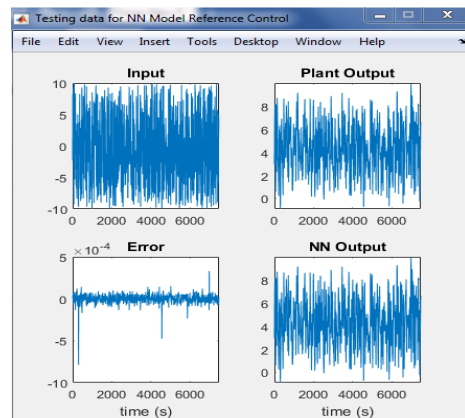


Рис. 6. Графіки тестових даних

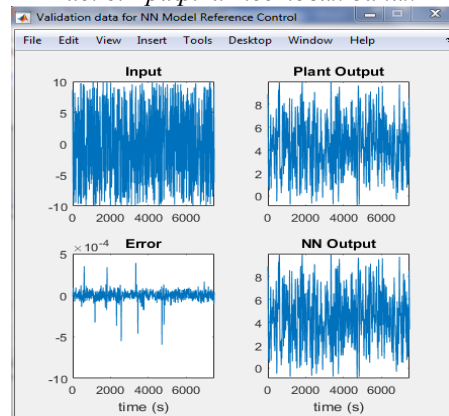


Рис. 7. Графіки перевірки даних

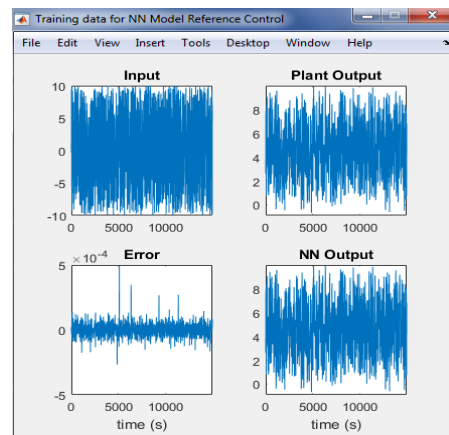


Рис. 8. Графіки тренувальних даних

Таким чином, за оптимальної кількості нейронів та правильного налаштування параметрів ідентифікатора досягається бажана точність відпрацювання сигналів нейроконтролером.

На рисунках 6-8 наведено графіки навчання ідентифікатора нейроконтролера. Після навчання ідентифікатора контролера

Plant Identification та отримання всіх графіків виконувалося навчання самого контролера 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 ModelReferenceController протягом 3 000 начальних урків (рис. 9).

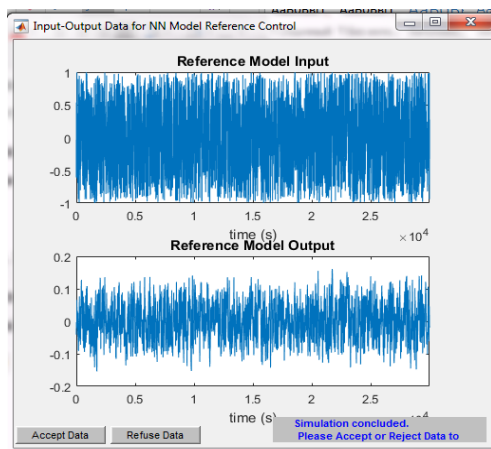


Рис. 9. Графіки вхідних та вихідних сигналів нейроконтролера

Після введення даних та вибору необхідних параметрів ідентифікатора і контролера було виконано генерацію даних. На підставі згенерованих даних отримано графік (рис. 10). Кількість етапів навчання та сегментів кожного етапу має відповідати точності відпрацювання вхідного сигналу. Співвідношення кількості етапів до числа сегментів підбирається експериментальним шляхом.

Після завершення генерації тренувальних даних маємо кінцевий результат, зображений на рисунку 10.

На завершальних графіках (рис. 10) спостерігаємо майже 100 % відпрацювання вхідного сигналу нейромережевою системою. Нейроконтролер (синя крива) виконав оптимізацію вхідного сигналу згідно з еталонною моделлю та максимально точно відтворив вихідний сигнал системи (зелена крива).

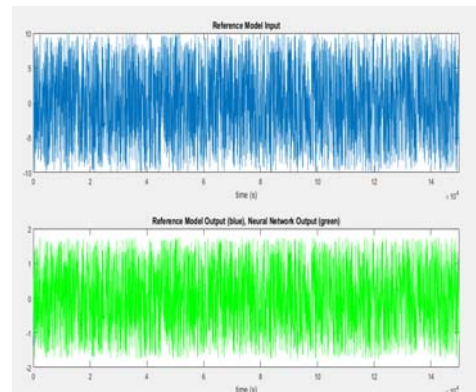


Рис. 10. Графіки вхідних та вихідних сигналів моделі і відпрацьованих сигналів нейромережею

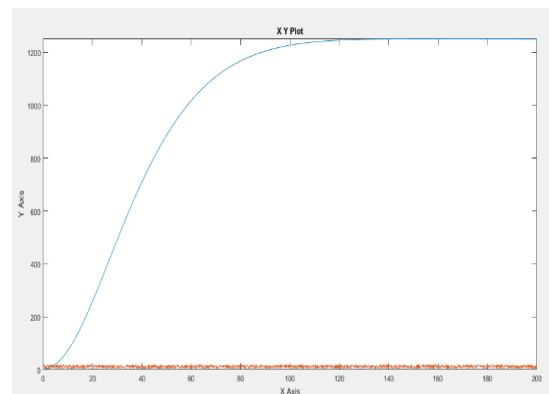


Рис. 11. Графік керуючого сигналу у разі подачі на вхід випадкових чисел із мінімальною похибкою

Проаналізувавши здійснене навчання у «супервізорному» режимі, можна зробити висновок, що така методика дозволить керувати технологічним процесом та адекватно реагувати на різноманітні впливи навколишнього середовища, підтримуючи необхідні параметри у нормі, або у разі необхідності самостійно приймати рішення щодо їх регулювання.

Отже, модель на рисунку 2 може бути налаштована та повною мірою виконувати автоматичне регулювання технологічним процесом випалу клінкеру в обертовій печі.

На рисунку 11, у режимі реального часу, спостерігається 100 % відтворення бажаного перехідного процесу системи з мінімальною похибкою у межах допустимої норми, незважаючи на різного роду зовнішні збурення та подачу на вхід системи випадкових чисел.

Висновки

1. У середовищі MatlabSimulink розроблено і досліджено систему управління процесом обпалу клінкеру в

обертовій печі з використанням нейроконтролера на основі еталонної моделі Model Reference Controller.

2. Наведено послідовність навчання ідентифікатора нейромережі та самого нейроконтролера.

3. У процесі навчання нейросистеми отримано графіки, які відображають різні етапи навчання нейромережі та нейроконтролера на основі еталонної моделі.

4. 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 у сх30 проектуванні подібних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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. Классен В. К. Технология и оптимизация производства цемента : краткий курс лекций : учеб. пособие / В. К. Классен. – Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. – 308 с.
3. 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.
4. Малишев О. І. Нейронна система керування процесом випалу клінкеру в обертових печах / Малишев О. І., Ужеловський В. О. // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури* : зб. наук. пр. – Дніпропетровськ, 2015. – № 7–8. – С. 84–91.
5. Порхало В. А. Автоматизация процесса обжига клинкера на основе статистической идентификации динамических параметров вращающейся печи : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.13.06 / Порхало Василий Александрович ; Белгород. гос. технол. ун-т им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2013. – 20 с.
6. Способ регулирования процесса обжига клинкера : а. с. 1587024 СССР : МКІ³ С 04 В 7/44 / 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.
7. 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. and Andrushchak S.V. *Metody lingvisticheskoy approksimatsii v zadachah upravleniya obzhigom klinkera* [Linguistic approximation methods in issues of control of burning clinker]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2013, no. 4, vol. 1, pp. 13–17. (in Russian).
2. Klassen V.K. *Tehnologiya i optimizaciya proizvodstva cementa* [Technology and optimization of cement production]. Belgorod: Izd-vo BGTU, 2012, 308 p. (in Russian).
3. Kuznetsov V.A., Ryazantsev O.A. and Trulyev A.V. *Chislennoe modelirovanie gorenija i teploobmena v tsementnoj vrashhayushheysya pechi* [Numerical modeling of combustion and heat transfer in the cement rotary kiln]. 2011, no. 4, pp. 161–164. (in Russian).
4. Malyshev O.I. and Uzhelovskiy V.A. *Neironna sistema keruvannia protsessom vypaly klinkerav obertovykh pecakh* [Neurons process control system clinker burning in rotary kilns]. *Visnyk PDABA* [Bulletin of Prydniprovsk'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture]. Dnipropetrovsk 2015, no. 7–8, pp. 84–91. (in Ukrainian).
5. Porhala V.A. *Avtomatizaciya processa obzhiga klinkera na osnove statisticheskoy identifikatsii dinamicheskikh parametrov vrashhayushheysya pechi. Avtoref. dis.* [Automation clinker burning process of clinker on the base of statistic identification of dynamic parameters of the rotary kiln. Author's abstract]. *Belgorod.gos.tech. univer. Im. V.G. Shukhova* [Belgorod state techn. univers. named after V.G. Shukhova]. Belgorod, 2013, 20 p. (in Russian).
6. Verdiyana M.A., Golovin E.N., Bachurin V.V., Fedoseev D.F., Litvin A.Ya., Ponomarev L.I. and Parkhomenko P.P. *Sposob regulirovaniya processa obzhiga klinkera* [A method for controlling the clinker burning process]. Patent, no. 1587024 USSR: МКІ³ С 04 В 7/44 /. (in Russian).
7. Terekhov V.A., Efimov D.V. and Tyukin I.Yu. *Neyrosetevye sistemy upravleniya* [Neural network control system]. Moskva: Vyssh. shk., 2002, 183 p. (in Russian).

Рецензент: Шпірько М. В., д-р техн. наук, проф.

Надійшла до редколегії: 16.04.2018 р.