

УДК 004.8

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195785

Система автоматичного керування процесом випалювання з мінімізацією ймовірності дефектів

А. П. Коротинський, О. А. Жученко

Розроблена та досліджена система автоматичного керування печею випалювання вуглецевих виробів з мінімізацією ймовірності дефектів на базі штучних нейронних мереж, яка відрізняється від відомих на сьогоднішній день систем можливістю обрання способу керування процесом випалювання відповідно до початкових умов та цілей ведення процесу.

Для процесу випалювання вуглецевих виробів до таких цілей можна віднести отримання продукції з мінімальною кількістю дефектних структур або безпечно скорочення тривалості технологічного процесу з метою економії енергоресурсів.

Для мінімізації кількості дефектних структур готових виробів пропонується прогнозувати ймовірність наявності дефекту у виробі, а для скорочення тривалості технологічного процесу – як показник готовності продукції використовувати ентропію. Розв'язання поставлених задач базується на використанні штучних нейронних мереж з їх здатністю до узагальнення даних, а саме різних значень ймовірності наявності дефекту за різних температурних полів печі випалювання при різних регламентах роботи.

Проблема обмеженої кількості даних, необхідних для навчання штучної нейронної мережі, вирішується шляхом застосування особливої структури штучних нейронних мереж – автоенкодера.

Розроблена системи керування має ряд переваг в порівнянні з існуючими на сьогоднішній день системами. Наприклад, надає можливість вибору кроку спуску, що визначає точність траєкторії оптимального спуску, а тому і точність керування в цілому. Вибір критерію спуску робить розроблену систему гнучкою при використанні в різних умовах та при різних задачах керування. У разі аварійного переривання технологічного процесу випалювання дана система дає змогу в будь-який момент часу спланувати подальший його перебіг, забезпечивши ефективно продовження кампанії випалювання, а тому запобігає невиправданним витратам. Алгоритм керування, що використовується у системі, дозволяє спрогнозувати час ведення кампанії випалювання та значення витрат палива, а відтак спрогнозувати економічну ефективність технологічного процесу.

Для оцінювання ефективності запропонованої системи автоматичного керування процесом випалювання проведено експериментальне дослідження роботи розробленої системи в порівнянні з існуючою системою керування на базі ПД-регулятора.

Результати дослідження засвідчили, що використання нової системи керування дозволяє знизити споживання палива на 3-4 м³/год. Крім того, зменшу-

ється приріст температури заготовок в процесі обробки, що позитивно впливає на якість готової продукції.

Ключові слова: процес випалювання, штучні нейронні мережі, автоенкодер, система керування з прогнозуванням, імітаційне моделювання.

1. Вступ

Процес випалювання є надзвичайно складним технологічним процесом термічної обробки виробів з великою енергозатратністю. Двома основними складовими енергозатратності є довготривалість процесу та високий вихід браку продукції. Зменшення хоча б однієї з складових витрат призводить до суттєвої економії та здешевлення готової продукції.

Починаючи з 50-х років минулого століття, ведення процесу випалювання майже не змінилося та являє собою нагрівання заготовок за існуючими регламентами.

Саме тому досі актуальною задачею залишається підвищення ефективності даного процесу, що може бути досягнуто шляхом впровадження сучасної автоматичної системи керування даним процесом. Незважаючи на численні спроби автоматизувати роботу багатокамерних кільцевих печей випалювання, до останнього часу так і не була реалізована ефективна система керування даним процесом [1, 2]. Відтак, аналіз існуючих на сьогоднішній день систем керування є доволі важливим кроком, що передувє розробленню системи керування, яка б відповідала сучасним вимогам.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Відповідно до матеріалів роботи [3], два дифузійні пальники, що встановлені в склепінні камери, при тиску газу 3000 Па дозволяли вести процес випалювання за заданим графіком з точністю $-50 \dots + 30 \text{ }^\circ \text{C}$. Очевидно, що крім низької точності дотримання графіку випалювання заготовок такий спосіб управління призводив до не виправдано високої перевитрати палива і значного браку через досить великий перепад температури по висоті камери.

В зв'язку з практичною неможливістю регулювання співвідношення повітря/газ через особливість конструкції печі, у роботі [4] наведено теоретичне обґрунтування використання системи імпульсного спалювання палива. Застосування запропонованої системи для багатокамерних печей випалювання призводить до зменшення перевитрати палива. Авторами [4] стверджується, що через недоліки використання розрідження, як основного параметру керування подачею повітря, виникає проблема підсосу повітря, а саме: зі збільшенням розрідження збільшується кількість повітря, що подається через газовий тракт та збільшується підсос повітря. Це, в свою чергу, негативно впливає на показники процесу, адже зі збільшенням підсосу холодного повітря збільшується його вплив на температурні поля. Також зі збільшенням кількості повітря в камері печі в цілому відбувається перевитрата газу на 30–40 % від теоретичного значення на тонну випалених виробів. З роботи [4], впливає, що запропонована система дозволяє зменшити перевитрату палива в зв'язку з надлишковим просочуванням повітря через склепіння печі на 12–15 %. За результатами проведе-

них випробувань, виконання даної методики забезпечує економію газу не менше, ніж на 7–12 %.

Недоліком даної системи є схема подачі повітря на пальники, для забезпечення необхідної інжекції повітря. Запропонований спосіб передбачає подачу повітря під значним надлишковим тиском, що можливе лише при додаванні в конструкцію печі насосів або ж його подачі напряму на пальники з атмосфери.

Перший спосіб передбачає модифікацію печі, що досить затратно. При використанні другого способу температура додаткового повітря, що йде на спалювання значно менша, ніж при його проходженні через камеру, що знаходиться на охолодженні. Відповідно до цього, температура факелу зменшується, а тому для забезпечення відповідного температурного режиму необхідне збільшення витрати палива.

У роботі [5] доведена ефективність застосування нейромережевого моделювання показників якості процесу випалювання для оперативного управління цими показниками. Перевагою даного підходу є можливість визначення невимірюваних показників якості процесу випалювання за вимірюваними і керуючими параметрами за допомогою штучних нейронних мереж.

Стратегія оптимального управління тепловим об'єктом вирішувалась шляхом синтезу і порівняльного аналізу систем за критерієм мінімуму собівартості на базі оптимального ПД-регулятора і нейромережевого прогнозуючого контролера. Початкові налаштування коефіцієнтів ПД-регулятора визначені методом Циглера – Ніколса. Автором зроблені висновки, що результати роботи розроблених систем управління мають перерегулювання, що становить 33 % та зумовлюють пошук альтернативних рішень щодо синтезу системи керування процесом.

У праці [5] була запропонована можливість поліпшення якості управління температурним режимом процесу випалювання шляхом синтезу системи управління із застосуванням нейромережевого прогнозуючого контролера (Neural Network Predictive Control – NN PC). Блок NN Predictive Control, містить в своєму складі дві нейронні мережі: нейроконтролер – Optim і NN Model. NNPC використовує NN Model об'єкта, для передбачення його реакції на вхідний вплив. Блок Optim NNPC обчислює керувальні впливи, які мінімізують заданий критерій, прогнозує поведінку об'єкта на моделі на заданому кроці прогнозу (N_u) і потім видає на об'єкт керуючий сигнал оптимальної величини.

В результаті синтезу і імітаційного моделювання систем автоматичного регулювання об'єкта авторами роботи [5] встановлено, що необхідна якість регулювання температурним режимом забезпечується як оптимальним ПД-регулятором, так і нейромережевим прогнозуючим контролером. Однак найкращі показники якості параметрів регулювання досягнуті з прогнозуючим нейроконтролером. З результатів роботи [5] випливає, що розроблена система керування забезпечує отримання продукції заданої якості та зменшує витрати природного газу на 14 %.

Автором роботи вказано, що в усьому діапазоні регулювання витрати газу автоматично підтримується оптимальне співвідношення газ – повітря для газоповітряної суміші. Оскільки температура середовища камери печі залежить не тільки від співвідношення газоповітряної суміші, а і від температури її складо-

вих, то початкові температури складових мають значний вплив на температури в печі. За умов подачі повітря з камери, що знаходиться на охолодженні, а відтак, його попереднього підігрівання, задача відсутності перерегулювання у стратегії оптимального управління повністю не вирішена.

У патенті [6] описано метод керування печами випалювання на базі показника випалювання. Ідея базується на тому факті, що температура анода, а отже і якість, відповідає сумарному тепловому потоку протягом усього часу випалювання. А отже, однакова якість аноду може бути досягнуто з використанням різних температурних режимів, доки загальний тепловий потік залишається незмінним.

Відповідно можна визначити індекс випалювання, який являє собою часовий інтеграл температур оточуючих димоходів. Еталонний індекс випалювання може бути легко знайдений, беручи реальні температурні криві оточуючих димоходів, у випадку, коли забезпечується потрібна якість анодів. Використовуючи цей показник випалювання як довідковий індекс, потрібно лише шукати відхилення від його еталонного значення.

Внаслідок порушень режиму горіння індекс випалювання змінюється, а отже якісна оцінка анода змінюється. З відхиленням від еталонного індексу випалювання значення відхилення характеризує відсутність або надлишок теплового потоку до анода.

Одним із застосувань індексу випалювання є компенсація недостатності або перевищення теплового потоку за допомогою автоматичного коригування температурної кривої випалювання. Простий розрахунок показує, що період часу з пониженням або перевищенням температури можна виправити за час, що залишився, шляхом зміни температурного графіка.

Недоліком даного методу є його неуніверсальність при випалюванні продукції різних розмірів. Зрозуміло, що для кожного окремого розміру продукції, або варіації їх завантаження необхідно спочатку визначити відповідний еталонний індекс випалювання, тільки після чого можливе керування даним процесом за запропонованим алгоритмом.

Можливість компенсації раніше допущених відхилень від температурної кривої випалювання в подальшому призводить до необхідності розрахунку максимально допустимого значення, що може бути компенсоване за час, що залишився, без виникнення дефектів в заготовках. В результаті можлива ситуація, коли еталонний індекс випалювання не буде досягнутий за час, що залишився, через потребу у дотриманні температурних обмежень.

Робота [7] присвячена визначенню основних проблем, що виникають при проведенні кампанії випалювання вуглецевих виробів на основі результатів експериментів. Отримані результати обчислювальних експериментів показали, що тепло, акумульоване кладкою печі і пересипкою, значно ускладнює регулювання температурного режиму. Вище сказане дозволяє стверджувати, що печі випалювання мають наступні недоліки: обмежені можливості забезпечення мінімальних перепадів температур і регулювання швидкості нагрівання заготовок; значні витрати тепла на нагрівання кладки і пересипки.

Усунення перерахованих вище недоліків вимагає модернізації системи нагрівання печей, внесення змін до їх конструкції і вдосконалення системи конт-

ролю і регулювання температурного режиму процесу випалювання. В якості можливих варіантів вирішення цих завдань авторами роботи [7] було запропоновано наступне: застосування систем імпульсного нагрівання. В умовах імпульсного нагрівання заготовок в пересипці її значний тепловий опір відіграє позитивну роль, тому що сприяє зменшенню прямого теплового впливу на заготовки. Однак при такій системі опалення залишається невирішеною проблема допалу летючих речовин. Також залишаються всі недоліки, наведені у роботі [3].

Ефективність виробництва і точність регулювання температури традиційної закритої печі низька. Для вирішення задачі підвищення ефективності печі в роботі [8] представлена система контролю температури в безперервній дифузійній печі. Система використовує ПД–каскадний алгоритм управління на основі оцінки попередньої компенсації для досягнення контролю температури печі.

Традиційна система управління на базі ПД–регулятора може задовольнити вимоги системи в більшості випадків, але не в процесі управління об'єктом з нелінійними тимчасовими змінами.

В даний час основними проблемами системи регулювання температури дифузійної печі є час проходження теплообміну, занадто довгий від стінки печі до середини печі, для чого розробляється алгоритм ПД–каскадного керування на основі Сміт–оцінки попередньої компенсації.

Додавання нового об'єкта управління – стінки печі, заснованого на вихідному об'єкті управління – камери печі, могло б завчасно попереджати недоліки при зміні керуваної величини. А тому, попередній аналіз зміни температури стінок печі може поліпшити якість всієї системи управління.

Використання каскадного керування на основі Сміт–оцінки попередньої компенсації при розробці системи керування багатокамерною піччю випалювання має ряд переваг, проте через інерційність об'єкта навіть очікування зміни температури печі на деяких ключових етапах займає досить значний час. Відтак некоректний керуючий вплив призведе до нераціонального використання тих чи інших ресурсів. Однак використання прогнозування температури стінки печі для даного алгоритму вирішує описану вище проблему інерційності.

З проведеного аналізу існуючих систем керування процесом випалювання вуглецевих виробів стає зрозуміло, що основними проблемами при розробленні системи керування є: підсос повітря, температура повітря, що йде на подальше горіння, інерційність процесу, та перерегулювання.

Очевидно, що при моделюванні об'єкту як послідовності зв'язаних між собою основних етапів кампанії випалювання дозволяє вирішити проблему, зв'язану з температурою повітря, що йде на подальше горіння. А підходи на базі прогнозування можуть вирішити проблеми, що виникають в результаті інерційності процесу, та передбачити ймовірне перерегулювання. Також відсутність можливості оцінювання якості або ступеня готовності продукції під час ведення процесу випалювання обумовлює перехід від класичних систем керування до систем керування на базі прогнозування.

3. Ціль та задачі дослідження

Метою даної роботи є синтез системи автоматичного керування багатокамерною піччю випалювання, що забезпечить вихід бездефектної продукції відповідної якості при мінімізації енергозатрат. Для досягнення поставленої мети були поставлені такі завдання:

- визначити показник готовності продукції процесу випалювання вуглецевих виробів;
- визначити показник якості готової продукції процесу випалювання вуглецевих виробів;
- розробити структуру системи автоматичного керування піччю випалювання вуглецевих виробів з мінімізацією ймовірності дефектів
- провести дослідження ефективності запропонованої системи керування в порівнянні з існуючими системи.

4. Багатокамерна піч випалювання вуглецевих виробів як об'єкт автоматичного керування

Типова багатокамерна піч складається з розташованих у два ряди прямокутних камер, з'єднаних між собою на торцях радіальною системою газоходів – вогневими каналами. Загальний вид багатокамерної печі випалювання зі знімним склепінням конструкції RIEDHAMMER представлений на рис. 1.

Щоб розглянути роботу багатокамерної печі, скористаємося схемою процесу випалювання групи камер, зображених на рис. 2. Розглянемо випадок, коли рампи з пальниками встановлені на камерах 7, 8 (рис. 2). Газ змішується з повітрям або з димовими газами, які проходять через камери 9 і 8, відповідно, і згоряє під склепінням і в вогневих каналах камер 7, 8. Отже, в камерах 7, 8 підтримується максимальна температура процесу або, як прийнято на виробництві, камери знаходяться «під вогнем». Продукти згоряння не відводяться відразу у димову трубу, а проходять через ряд камер 3–6 і підігрівають завантажені у них вуглеграфітові вироби, і таким чином охолоджуються.

Потрібне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру 9, в якій знаходяться вже обпалені електродні заготовки з досить високою температурою (до 1000 °С). Таким чином, повітря для спалювання природного газу нагрівається і подається до камери 8 з температурою 250-350 °С.

По завершенню випалювання подача газу припиняється, і рампа з пальниками переставляється на наступну камеру у напрямку руху димових газів. При цьому камера 9 буде відключена від групи камер, задіяних у процесі, тому що вона вже досить охолоджена і буде поставлена на розвантаження, а камера 1, яка тільки що завантажена, буде підключена до групи камер. На рис. 3 показана схема руху газів в розрізі камери печі випалювання.

Згоряння природного газу здійснюється під склепінням печі і у вогневих колодязях. Димові гази з простору під склепінням камери печі надходять через муфельні канали під подину камери. Далі димові гази через вогневі колодязі потрапляють у наступну камеру.

Враховуючи, що процес випалювання вуглецевих виробів складається з трьох основних етапів, таких як підігрівання димовими газами, камера “під во-

гнем” та охолодження, то для адекватного моделювання такого процесу та отримання відповідних температурних полів було реалізовано три повні математичні моделі даних етапів на основі математичної моделі, наведеної у роботі [9]. Досліджувана касета печі випалювання з розміром $3,8 \times 0,76 \times 4,05$ м має геометрію, що наведена на рис 4.

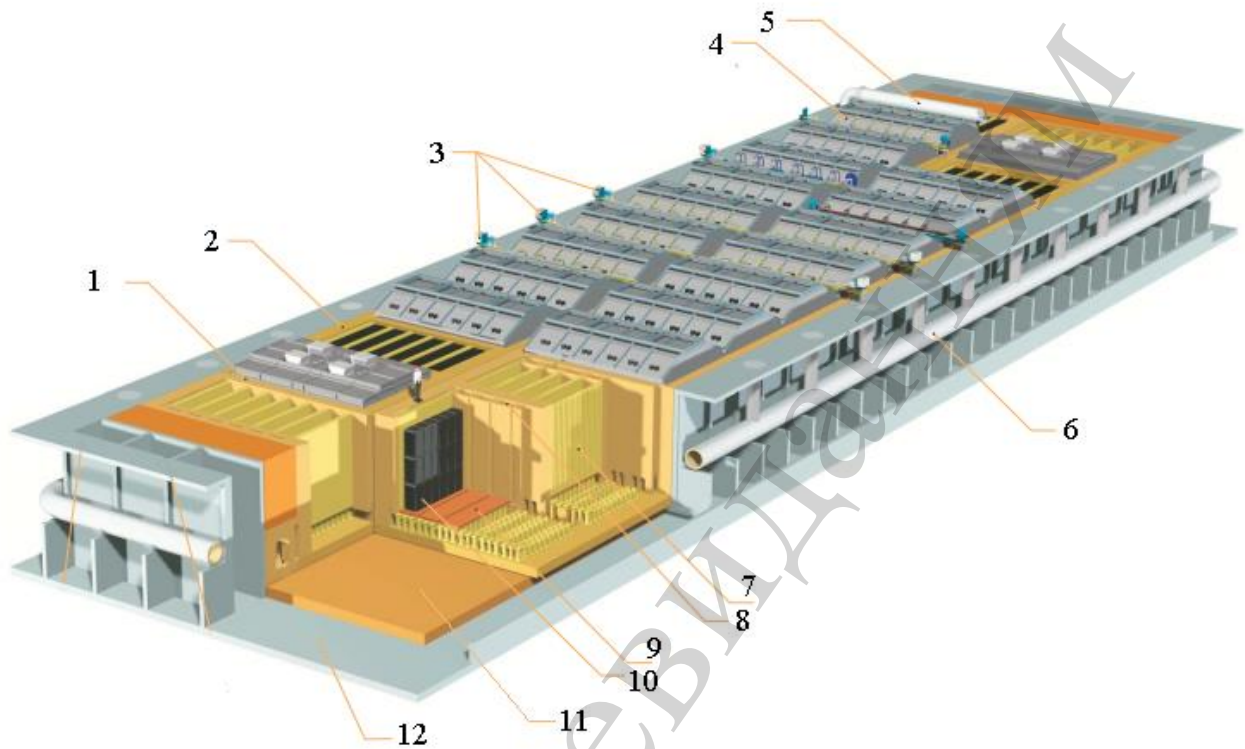


Рис. 1. Конструкція печі RIEDHAMMER для випалювання вуглеграфітової продукції: 1 – камера з касетами; 2 – пересипка; 3 – рампи з пальниками; 4 – склепіння; 5, 6 – обладнання для відведення і транспортування димових газів; 7, 8 – торцеві і бічні муфельні канали; 9 – подина; 10 – заготовки; 11 – цегляна кладка; 12 – бетон

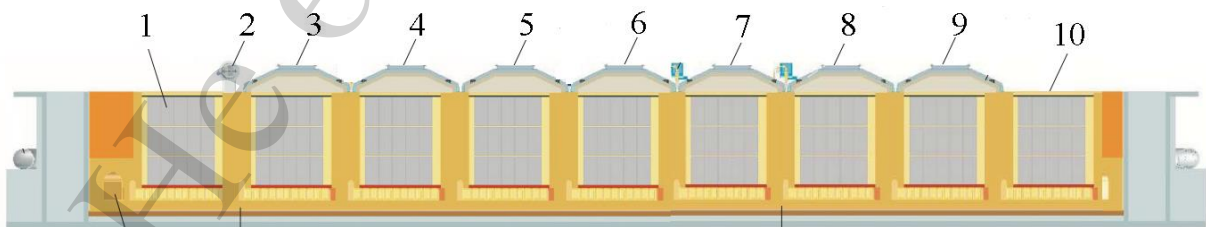


Рис. 2. Схема випалювання заготовок у багатокамерній печі закритого типу: 1 – камера на завантаженні; 2 – обладнання для відведення димових газів; 3–6 – камери, які підігріваються димовими газами, що відходять 7, 8; – камери «під вогнем»; 9 – камера на охолодженні; 10 – камера на розвантаженні

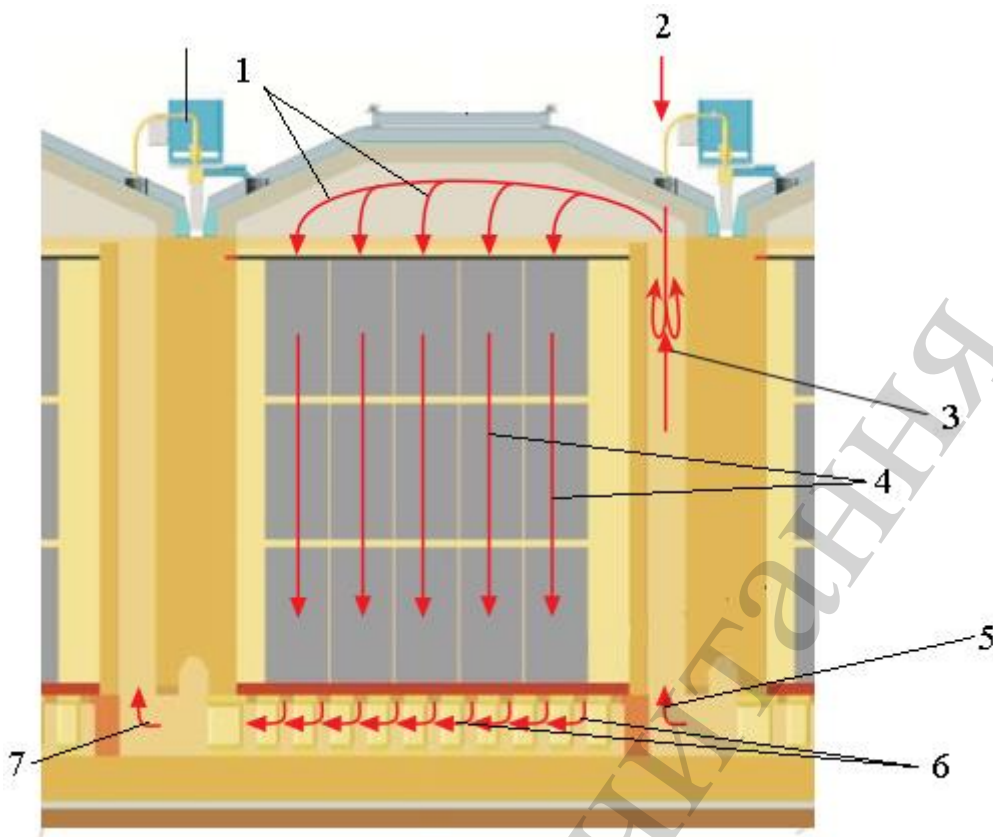


Рис. 3. Схема руху газів у камері печі випалювання: 1 – гарячі димові гази під склепінням; 2 – подача природного газу; 3 – горіння; 4 – гарячі димові гази у муфельних каналах; 5, 7 – нагріте повітря і димові гази відповідно; 6 – рух димових газів під подиною

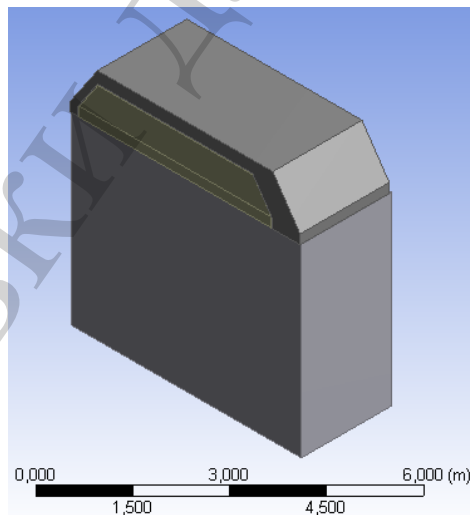


Рис 4. Геометрія касети печі випалювання

У роботі розглядається одна із камер багатокамерної печі випалювання закритого типу, в яку завантажено 5 заготовок діаметрами 700мм та висотою 2100 мм. Нумерація заготовок зліва на право (починається від вогневого колодязя)

5. Визначення готовності продукції процесу випалювання вуглецевих виробів

Як критерій готовності продукції у подальшому пропонується використовувати ентропію вуглецевих виробів. Зміна стану вуглецевих матеріалів, що піддаються термічній обробці, супроводжується зміною їх термодинамічних властивостей. Зокрема, такі зміни в процесі випалювання будуть відбуватись з ентропією. Причому зміна ентропії визначається лише початковим і кінцевим станами вуглецевої речовини і не залежить від шляху переходу з одного стану в інший.

Ентропія твердого тіла може розглядатися як сума доданків, що складається з двох складових – конфігураційної і вібраційної [10]. Причому конфігураційна складова характеризує досконалість кристалічної структури твердого тіла, чим більша структурна розпорядкованість, тобто чим менш досконала структура твердого тіла, тим більше його ентропія. Якщо зменшення ентропії можна пов'язати з зростанням впорядкованості структури матеріалу, то її зростання вимагає вже іншого трактування. Ймовірно, підвищення ентропії вуглецевого матеріалу на передкристалізаційній стадії можна пов'язати з виникненням і формуванням наступної (турбостратної) структури і процесами видалення гетероатомів з оброблюваної вуглецевої речовини [10].

Відповідно до вище сказаного, якщо процес випалювання приймається як початок передкристалізаційної стадії, то зміна знаку зміни (приросту) ентропії з плюса на мінус буде характеризувати початок передкристалізаційної стадії, де тільки починається зростання впорядкованості структури.

Задача визначення перехідного значення ентропії зводиться до пошуку локального максимуму на площині ентропії (рис. 5) при відомій кінцевій температурі обробки.

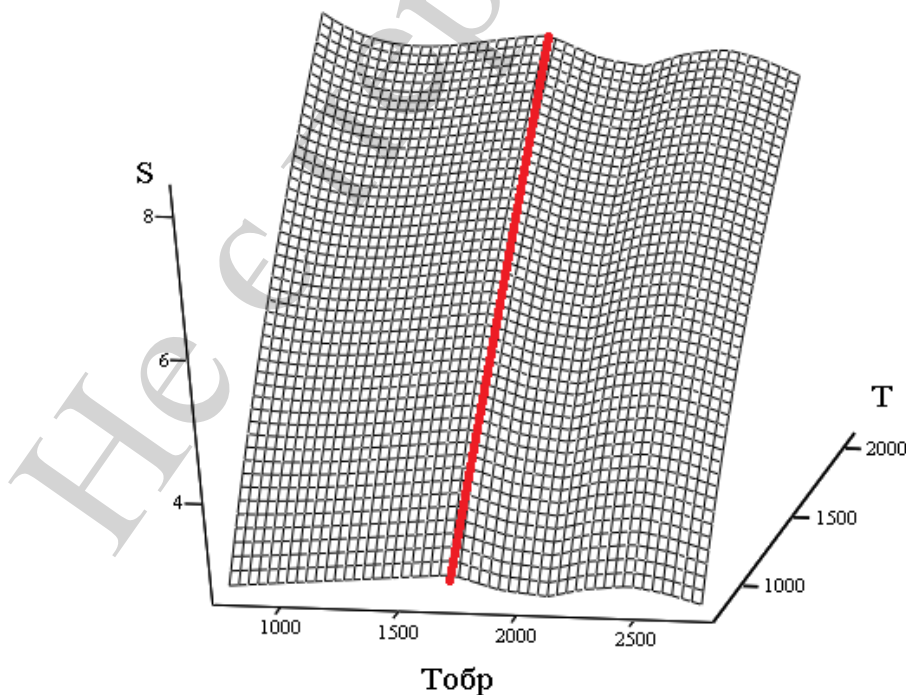


Рис. 5. Площина ентропії в залежності від температури обробки та поточної температури матеріалу

де S – ентропія, T – поточна температура, $T_{обр}$ – кінцева температура обробки.

Таким чином, застосування ентропії при веденні кампанії випалювання дозволяє визначити готовність продукції та момент завершення кампанії в цілому.

6. Оцінювання якості готової продукції процесу випалювання вуглецевих виробів

На сьогоднішній день в зв'язку із зростанням обчислювальних можливостей, набувають все більшого поширення штучні нейронні мережі для вирішення широкого класу задач. Загальне коло завдань, що вирішуються штучними нейронними мережами, налічує в собі: класифікацію образів, кластеризацію/категоризацію, зниження розмірності, апроксимацію функцій, передбачення/прогнозування і т. д. [11, 12]

Зрозуміло, що з прогнозованих даних, при всіх можливих варіантах керування, можливе формування площини ентропії як показника готовності виробів. Обравши точку готовності продукції, тобто точку завершення кампанії випалювання, можливо сформуванню керування, що забезпечить досягнення кінцевої точки з початкових умов. Причому розраховане керування дозволить отримати продукцію заданої якості за заданим критерієм, наприклад за умови мінімізації часу обробки або мінімізації затрат палива.

У той же час важливим моментом, який має бути врахований при синтезі системи керування процесом випалювання, є той факт, що реалізація розрахованих керувань може призвести до порушення цілісності заготовки через недотримання температурних обмежень. При порушенні температурних обмежень в заготовках виникають термічні напруження, що при досягненні порогового значення можуть призвести до дефекту в заготовках у вигляді тріщин. Очевидним вирішенням даної проблеми є обмеження керування у заданому технологічній діапазоні. З іншого боку, порушення температурних обмежень дає можливість сформуванню більш гнучку систему управління даним процесом, наприклад зменшити час, потрібний на термічну обробку заготовок.

Для вирішення даної проблеми пропонується прогнозувати ймовірність наявності дефекту у виробі. За допомогою здатності до узагальнення можливо отримати нейронну мережу, що буде спроможна визначати ймовірність браку в проміжних режимах та при різних умовах ведення кампанії. Обравши різні регламенти, при яких було отримано бездефектну структуру у всіх заготовках, та режими, при яких було повністю отримано брак, можна сформуванню вибірку для навчання штучної нейронної мережі.

Прогнозування ймовірності дефекту не заперечує отримання продукції відповідної якості з заданими теплофізичними властивостями, такими, наприклад, як теплоємність, електропровідність тощо.

Розроблення даної нейронної мережі ускладнюється у зв'язку з обмеженістю експериментальних даних, на основі яких можна провести навчання мережі. З аналізу літератури [13, 14] відомо, що у разі обмеженості навчальних вибірок доцільно застосовувати автоенкодер для переднавчання нейронної мережі.

Автоенкодер – це нейронна мережа прямого поширення, що відновлює вхідний сигнал на виході з мережі, загальна структура автоенкодера наведена на рис. 6.

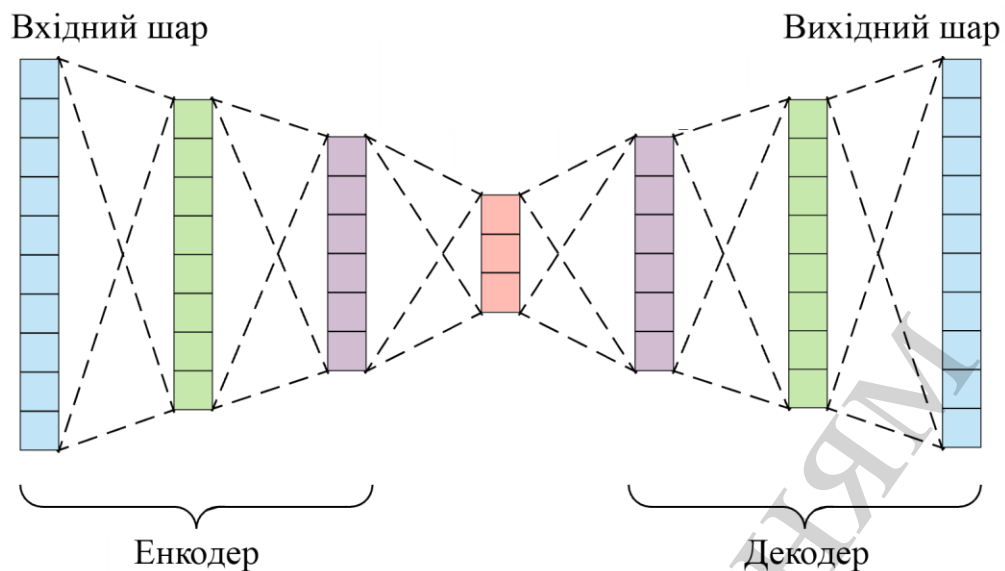


Рис. 6. Загальна структура автоенкодера

Навчання автоенкодера здійснюється за даними температурних полів, отриманих в результаті математичного моделювання, що дає в результаті готову для використання нейромержу з заданою кількістю нейронів в середньому шарі, а відтак дозволяє визначати властивості вуглецевих виробів, а значить і дефекти продукції.

При додаванні до навченого енкодера шару прогнозування дозволяє отримати нейромержу для визначення ймовірності браку з ненавченим лише одним шаром (рис. 7).

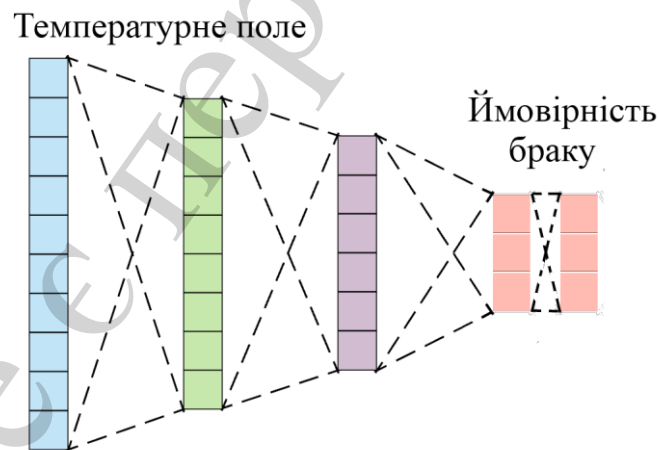


Рис. 7. Нейронна мережа для прогнозування дефекту на базі енкодера

Зрозуміло, що подальше навчання відбувається на обмеженій вибірці з цільовими значеннями ймовірності браку. Розробка нейронної мережі здійснювалось на базі нейромережевої бібліотеки Keras, написаній мовою Python, що здатна працювати поверх бібліотеки для машинного навчання TensorFlow. У якості середовища для навчання нейронної мережі використовувалась міжнародна платформа для змагань з аналітики та передбачувального моделювання Kaggle.

7. Загальна структура системи керування процесу випалювання вуглецевих виробів з мінімізацією ймовірності дефекту

Загальна структура системи керування процесом випалювання на базі штучних нейронних мереж з мінімізацією ймовірності браку наведена на рис. 8.

Роботу даної системи можна умовно поділити на 4 етапи.

1. Прогнозування температурних полів з поточного стану об'єкту на заданий оператором час для всього діапазону можливих або заданих керувань на базі математичної моделі.

Прогнозування проводилося на 40 ітерацій (120 годин) при діапазоні можливих витрат палива 0,22 – 0,36 м/с.

2. Розрахунок ентропії для кожного з прогнозованих варіантів ведення кампанії випалювання, формування поверхні ентропії, пошук на поверхні ентропії межі завершення кампанії випалювання відповідно до описано вище критерію готовності продукції.

З отриманих в результаті прогнозування температурних полів було побудовано площину ентропії для однієї заготовки, що наведена на рис. 9. З рисунка видно «гребінь», що характеризує завершення процесу випалювання відповідно до ентропії як критерію готовності. Очевидно, що досягнення цього рубежу можливе різними шляхами, що залежать від керування та часу обробки.

3. Визначення початкової точки спуску шляхом визначення ймовірності браку у всіх заготовках для всіх точок з межі завершення кампанії та обрання точки з мінімального значення ймовірності дефекту.

Для отримання вектору оптимального керування необхідно для всіх можливих значень готовності продукції за ентропією знайти ймовірність дефекту. Точка з мінімальним значення ймовірності і буде кінцевою точкою, яку необхідно досягти.

В результаті отримано, що мінімальна ймовірність браку готової продукції прослідковується в точці при керуванні з індексом керування – 1 та з індексом часу – 23.

4. Формування поверхні ймовірності дефекту усіх можливих варіантів керування, що забезпечують досягання початкової точки спуску. Оптимальний спуск з початкової точки по поверхні ймовірності дефекту з збереженням маршруту, тобто формуванням значення керування в кожен момент часу.

Результати пошуку першої точки наведені в табл. 1.

Отримані ймовірності наявності дефектів у всіх заготовках були порівняні та обране максимальне значення, яке і було використане для побудови площини максимальної ймовірності дефекту протягом ведення кампанії випалювання (рис. 10). Площина характеризує зміну максимальної ймовірності дефекту для усіх заготовок, тобто максимальну з прогнозованих в кожен момент прогнозу для кожної з заготовок.

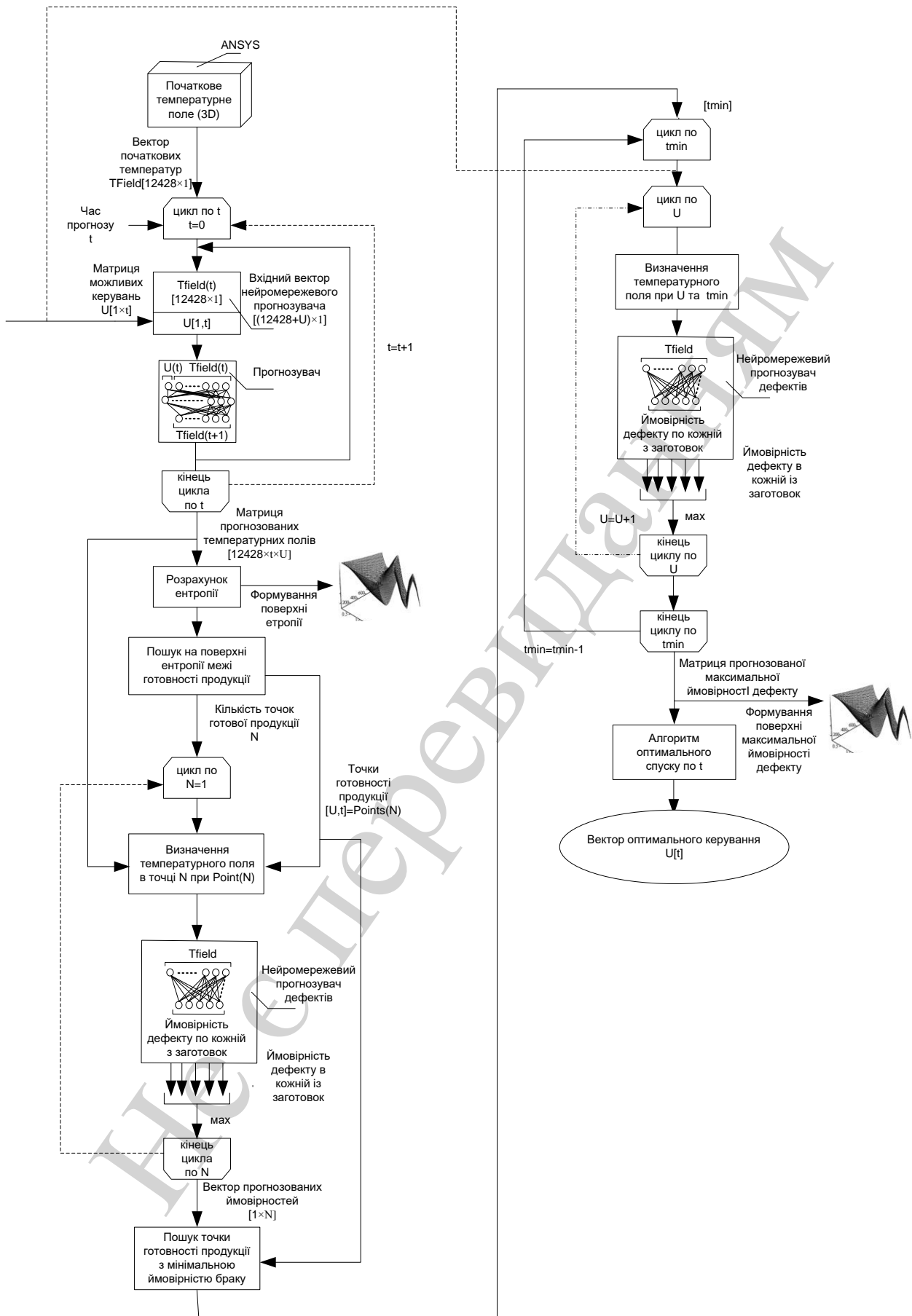


Рис. 8. Загальна структура системи керування процесом випалювання на базі штучних нейронних мереж

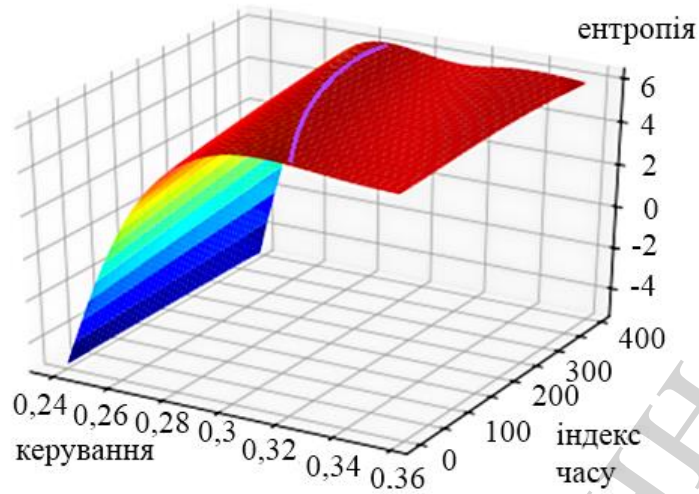


Рис. 9. Площина спрогнозованої ентропії для контрольної точки

Таблиця 1
Результати пошуку першої точки

Кількість кроків часу	Індекс керування	Ймовірність браку
23	1	1,8%
23	2	2,5%
23	3	2,8%
23	4	4%
22	5	5,3%
22	6	6,9%
22	7	8,4%
22	8	9,7%
21	9	10,7%
21	10	11,8%
***	***	***
16	40	28%

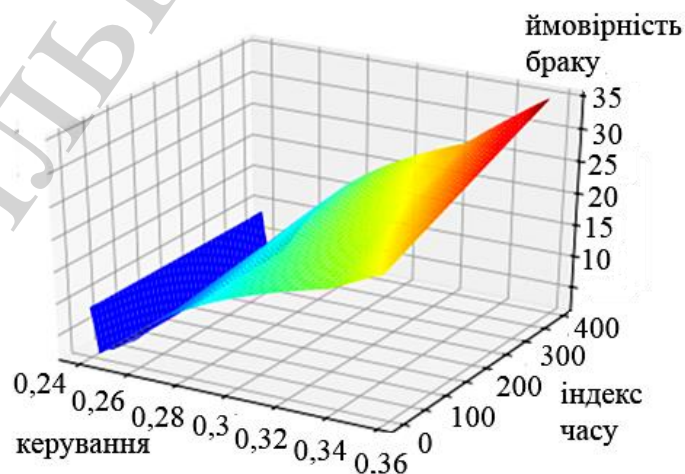


Рис. 10. Площина прогнозованої максимальної ймовірності дефекту

Результати розрахунків свідчать, що з точки 23,1 для забезпечення мінімальної ймовірності дефекту потрібно рухатись за траєкторією, що наведена у табл. 2.

Таблиця 2
Траєкторія оптимального керування

Індекс часу	Індекс керування
1	15
2	10
3	1
4	1
5	1
6	1
***	***
21	1
22	1

Індекс 1 по управлінні відповідає витраті палива 0,243 м/с, індекс 10 – 0,27 м/с, індекс 15 – 0,285 м/с, а індекс 23 за часом відповідає 69 год.

8. Дослідження системи керування процесу випалювання вуглецевих виробів з мінімізацією ймовірності дефекту

З метою дослідження ефективності запропонованої системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів доцільно провести порівняння її роботи з традиційною системою на базі ПД-регулятора. Як метод дослідження використовується імітаційне моделювання. Моделювання здійснювалось у середовищі Matlab з інтерактивним інструментом для моделювання, імітації та аналізу динамічних систем Simulink.

На рис. 11. наведено графік зміни керувань для обох регуляторів. З результатів видно, що при роботі запропонованої системи керування середнє значення витрати палива нижче.

На рис. 12 наведено графіки зміни температури по заготовкам №1 та №5 протягом всієї кампанії випалювання. Отримані результати свідчать, що кінцеві температури запропонованої системи керування нижчі, ніж при використанні системи з ПД-регулятором, що цілком відповідає середнім значенням витрат палива, проте достатнім для досягнення готовності продукції.

Графіки зміни температур в заготовках показані на рис. 13-14. З результатів видно, що значення приросту температури при підігріванні димовими газами становить $-2,5...2$ °С, що задовольняє рекомендаціям для досягнення цілісної структури заготовок. Максимальні значення перепаду прослідковуються в заготовці №1, мінімальні відповідно у заготовці №5, що пояснюється особливістю роботи печі. У той же час у запропонованій системі керування прослідковується значні перепади при переході між етапами роботи печі.

Максимальний приріст температури на етапі камера «під вогнем» становить близько 120 °С, а середній – відповідно 4–3 °С, причому для нейромереже-

вого регулятора графік приросту температур проходить нижче на діапазоні 20–40 годин, ніж для ПІД-регулятора, що позитивно характеризує запропоновану систему керування.

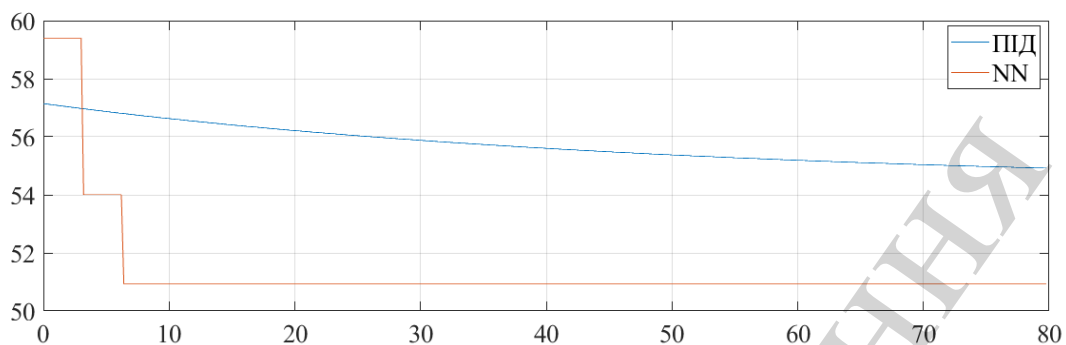


Рис. 11. Графік зміни керувань

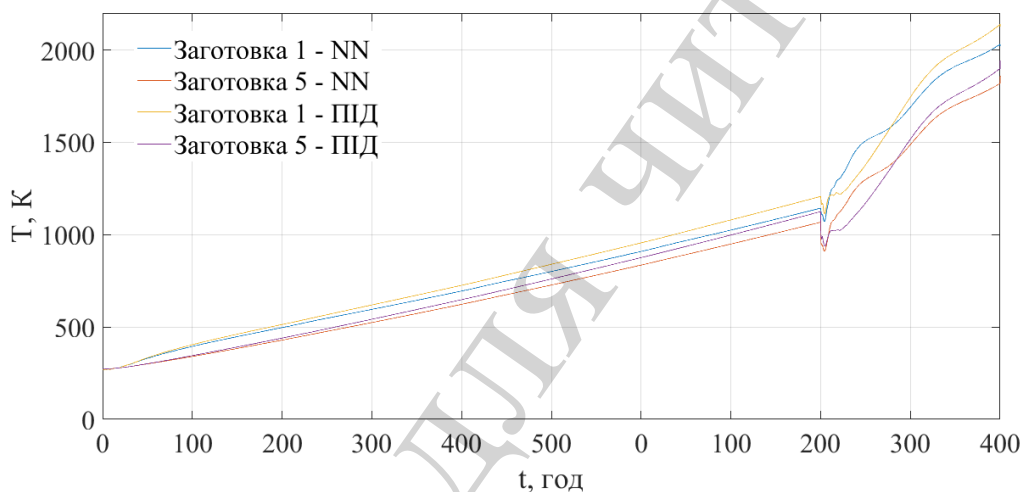


Рис. 12. Графік зміни температури в заготовках протягом кампанії випалювання вуглецевих виробів

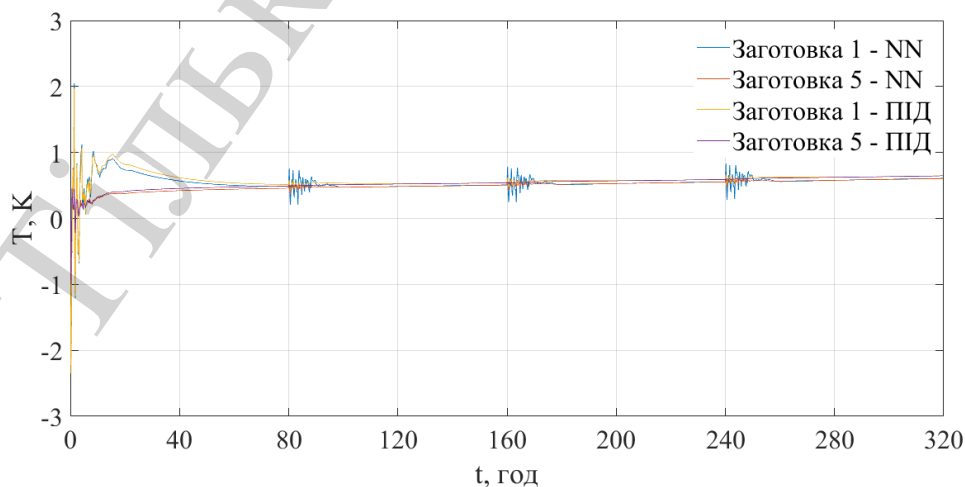


Рис. 13. Графік зміни приросту температур по заготовкам на етапі камери на підігріванні димовими газами

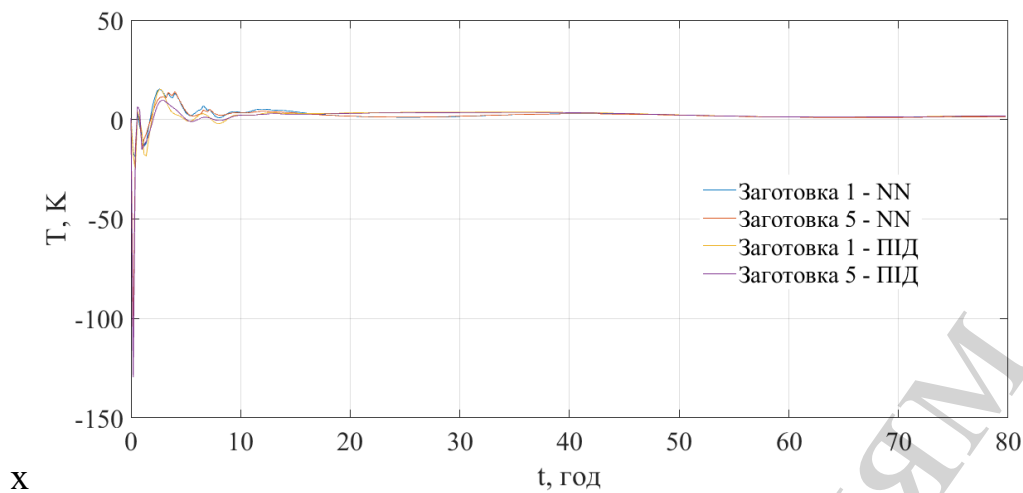


Рис. 14. Графік зміни приросту температур по заготовкам на етапі камера «під вогнем»

Експериментальне дослідження проводилось на одній камері багатокамерної печі випалювання закритого типу з засобами автоматизації, що використовуються на підприємстві в даний момент. Як контрольна розглядається точка під склепінням печі, де фізично можливо встановити вимірювальний прилад, а саме вольфрам-ренієва термопара. Вибір даної точки обумовлюється її здатністю у найбільшій мірі характеризувати кампанію випалювання, оскільки саме під склепінням печі зосереджується основний обсяг димових газів як єдиного теплоносія [9]. Результати експериментального дослідження розробленої системи наведені на рис. 15.

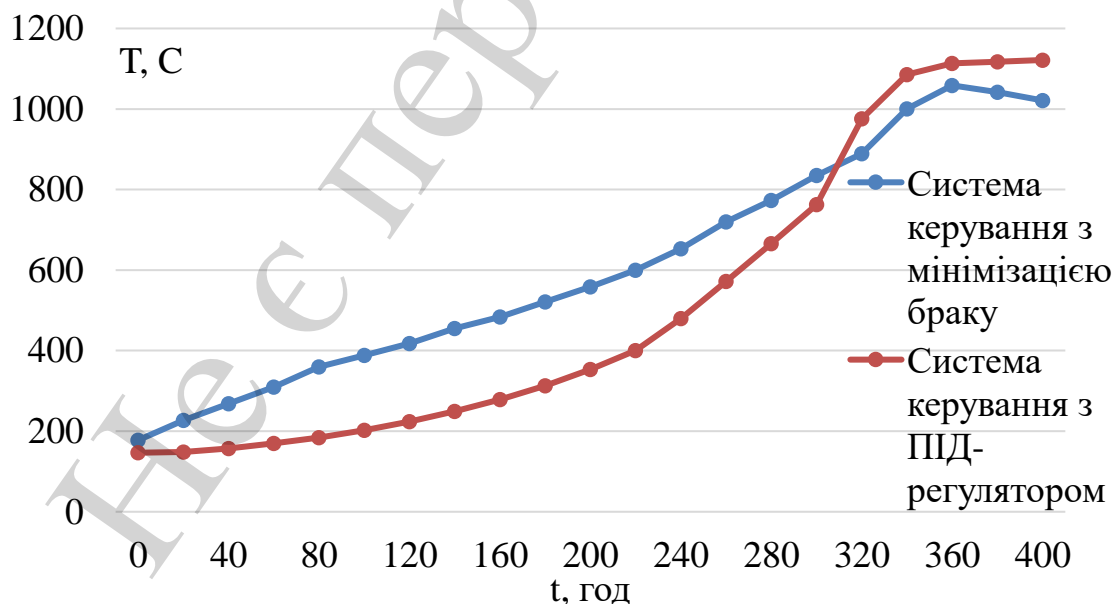


Рис. 15. Результати експериментального дослідження

Результати експериментального дослідження свідчать про значне відхилення за максимальним значенням температур протягом всіх етапів випалюван-

ня. На етапі підігрівання димовими газами запропонована система показує вищі значення температури в середньому на 150-200 °С, проте на етапі камера «під вогнем» отримано нижчі показання вимірювального приладу. Це позитивно характеризує розроблену систему, оскільки саме на етапі камера «під вогнем» через значні перепади температур в заготовках формуються тріщини.

При застосуванні запропонованої системи керування характер ведення процесу значно відрізняється та має більш агресивний характер, проте забезпечує отримання вуглецевих заготовок, які відповідають всім вимогам щодо якості кінцевої продукції та мають бездефектну структуру.

Зменшення температури на 370-ій годині характеризує завершення кампанії випалювання, відтак в порівнянні з аналогом тривалість кампанії випалювання зменшена на 30 годин.

8. Обговорення результатів синтезу системи керування процесом випалювання

Процес випалювання вуглецевих виробів характеризується значними енергозатратами на його проведення. У зв'язку з цим визначення доцільної тривалості даного процесу, яка б забезпечила потрібні показники якості продукції (теплоємність, електропровідність тощо), є важливою науково-практичною задачею. На сьогоднішній день тривалість процесу випалювання визначається емпірично, спираючись на досвід оперативного персоналу. Ніяких кількісних критеріїв не існує. Враховуючи, що всі якісні показники вуглецевої продукції визначаються режимами ведення процесу випалювання, як критерій готовності продукції на даному технологічному етапі пропонується ентропія виробів, характер зміни якої екстремальний (рис. 5). Прогнозуючи температурні поля у ході процесу за допомогою математичної моделі, можна визначити екстремальну точку процесу, яка і буде точкою доцільного завершення випалювання (рис. 9).

Робочий об'єм камери випалювання характеризується значною температурною розподіленістю, яка призводить до того, що, забезпечуючи потрібний температурний режим для однієї зони камери випалювання, в іншій зоні відбувається перегрівання заготовок і, як результат, дефекти продукції, відсоток якої може бути досить значним. Розв'язувати задачу зменшення браку пропонується, використовуючи ймовірністний підхід на основі аналізу «вдалих» і «невдалих» кампаній випалювання. Для моделювання такого процесу використані нейромережі. Проблема навчання нейромереж вирішується за допомогою автоенкодера (рис. 6). Розрахунок ймовірності браку ведеться по відношенню до заготовки, де цей брак найбільш ймовірний.

На основі запропонованих критерію готовності вуглецевої продукції та методу визначення максимальної ймовірності вироблення дефектної продукції розроблена загальна система керування процесом випалювання (рис. 8). Згідно запропонованої структури, розрахунок керування здійснюється у 4 етапи. Наведені приклади обчислень початкової точки руху системи (табл. 1) та оптимальної траєкторії руху (табл. 2) демонструють практичну спрямованість представлені загальної структури системи керування.

Проведене дослідження запропонованої системи керування у порівнянні з системою з ПД-регулятором показало, що прирости температур менші у запропонованій системі, що позитивно впливає на якість готової продукції. І хоча при використанні розробленої системи температури на етапі підігрівання димовими газами вищі на 150–200 °С, ніж у системі з ПД-регулятором (рис. 13), на наступному етапі – камера «під вогнем», вони нижчі (рис. 14). А це більш важливо, тому що саме на цьому етапі температурні режими найвищі, у зв'язку з чим ймовірність виникнення дефектів у вигляді тріщин найбільша. При цьому тривалість кампанії випалювання в умовах використання запропонованої системи керування на 30 годин менша (рис. 15).

При впровадженні системи керування процесом випалювання з мінімізацією ймовірності дефектів проблемою залишається навчання нейромережі, що в певній мірі ускладнює її застосування. Подальші дослідження мають бути направлені на розв'язання цієї проблеми.

9. Висновки

1. Як критерій готовності продукції в процесі випалювання вуглецевих виробів пропонується використовувати їх ентропію. Можливість використання даного критерію обумовлена екстремальним характером зміни ентропії вуглецевих виробів у процесі їх термічної обробки (рис. 5). Прогнозування точки екстремуму дозволяє заздалегідь визначити доцільну тривалість процесу випалювання, що, враховуючи енергоємність даного процесу, забезпечить підвищення його економічної ефективності.

2. Запропонований метод визначення ймовірності наявності дефекту вуглецевої продукції на основі штучних нейронних мереж передбачає зменшення бракованої продукції при умові виконання всіх вимог щодо якості готової продукції (теплоємність, електропровідність тощо). Задача обмеженості даних для навчання нейронної мережі вирішується шляхом переднавчання автоенкодера (рис. 6).

3. Розроблена загальна структура системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів (рис. 8), яка передбачає 4 етапи її роботи. На відміну від існуючих систем керування дана система дозволяє комплексно розв'язувати задачу керування процесом, розраховуючи доцільну тривалість кампанії випалювання, забезпечуючи мінімізацію ймовірності вироблення дефектної продукції при збереженні заданих показників її якості.

4. Результати імітаційного моделювання роботи системи керування з ПД-регулятором та запропонованої системи керування свідчать, що середнє значення витрати палива при використанні останньої складає на 3–4 м³/год менше, а також спостерігається менший приріст температур на діапазоні 20–40 годин етапу камера «під вогнем» та етапу «підігрівання димовими газами» (рис. 13, 14), що сприяє підвищенню якості готової продукції; зменшується тривалість кампанії випалювання – на 30 годин для вибраного прикладу.

Література

1. Сошкин, С. В., Априамов, В. Н., Жуковецкий, О. В. и др. (1988). Импульсная система управления температурным режимом обжиговых печей. Цветная металлургия, 11, 36–37.

2. Пеккер, И. И., Савин, М. М., Васильева, В. Д. и др. (1976). Возможности автоматизации обжиговой печи. Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции. Челябинск, 77–87.
3. Сошкин, С., Антонян, А., Полтораки, Г., Сорокин, Н. (2006). Система управления процессом обжига электродных материалов. Системная интеграция. *Металлургия*, 3, 26–32.
4. Малахов, С. А. (2004). Совершенствование технологии обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа. Владикавказ.
5. Soshkin, G. S., Rutkovskii, A. L., Soshkin, S. V. (2011). Development of a control system for roasting carbon-graphite materials based on modeling quality characteristics of roasted products. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 52 (5), 457–461. doi: <https://doi.org/10.3103/s1067821211050117>
6. Leisenberg, W. (2002). Pat. No. US 6,436,335 B1. Method for controlling a carbon baking furnace. No. 09/547,492; declared: 12.04.2000; published: 20.08.2002.
7. Костиков, В. И., Крупенников, С. А., Шибалов, С. Н. (2003). Разработка рациональных режимов тепловой работы пламенной печи для обжига углеграфитовых заготовок. *Известия ВУЗов. Черная металлургия*, 11.
8. Ke, X., Luo, Z., Zhu, Y., Liu, Y. (2016). The Temperature Control System of Continuous Diffusion Furnace. *Proceedings of the 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. doi: <https://doi.org/10.5220/0005996402270233>
9. Карвацький, А. Я., Пулінець, І. В., Шилович, І. Л. (2012). Математична модель тепло-гідродинамічного стану багатоканальної печі при випалюванні електродних заготовок. *Всхідно-Європейський журнал передових технологій*, 1 (4 (55)), 33–37. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/3316/3117>
10. Шулепов, С. В. (1972). Физика углеграфитовых материалов. М.: Металлургия, 256.
11. Bengio, Y. (2009). Learning Deep Architectures for AI. *Foundations and Trends® in Machine Learning*, 2 (1), 1–127. doi: <https://doi.org/10.1561/22000000006>
12. Bengio, Y., Couville, A., Vincent, P. (2012). Unsupervised Feature Learning and Deep Learning: A Review and New Perspectives. URL: <https://docs.huihoo.com/deep-learning/Representation-Learning-A-Review-and-New-Perspectives-v1.pdf>
13. Deng, L. (2014). A tutorial survey of architectures, algorithms, and applications for deep learning. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 3. doi: <https://doi.org/10.1017/atsip.2013.9>
14. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J. (1986). Learning Internal Representations by Propagation Parallel Distributed Processing. Vol. 1. *Foundations Cambridge*. MIT Press, 318–362.
15. Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J. (1988). Learning Representations by Back-propagating Errors. *Neurocomputing: Foundations of Research*. MIT Press, 696–699.