

І. В. Гурін¹, к. техн. н., І. Ш. Невлюдов², д. техн. н., професор,
В. Є. Овчаренко², д. техн. н., професор, О. В. Токарева², к. техн. н., професор

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВВКМ

¹ Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

² Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

Ключові слова: система управління, регулятор, якість, технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка.

Виробництво вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ) зазвичай передбачає використання вуглецевих складових, таких як вуглецеві волокна. Вуглецеві волокна, які містять у собі від 90 до 99 % вуглецю. Ці матеріали характеризуються високою міцністю, стійкістю до термічних впливів та іншими унікальними властивостями, що робить їх корисними у різних галузях, таких як авіаційна, автомобільна, ядерна енергетика та інші [1].

Враховуючи високі вимоги до виробів з просторово-армованих вуглець-вуглецевих композитних матеріалів, особливу актуальність набувають питання контролю якості заготовок. Фізико-механічні та експлуатаційні характеристики виробів мають бути підтверджені результатами об'єктивного контролю. Для підтвердження відповідності характеристик виробів з композитних матеріалів вимогам технічної документації використовують методи неруйнівного контролю на готових виробах. Головними з них є методи ультразвукового виявлення дефектів, які виявляють наявність на поверхні або у самому матеріалі некоректних ділянок, які явно відрізняються від решти матеріалу та складаються з іншого матеріалу, а також інструментальні методи, що реалізують контроль механічних властивостей просторово-армованої структури ВВКМ [2].

Варто зазначити, що в реальних умовах технічні характеристики виробів у різних партіях можуть відрізнятися від заданих. Сучасні концепції якості продукції викладені в міжнародних стандартах ДСТУ ISO 9000-2015, ДСТУ ISO 10012-2005 [3, 4]. Основними рекомендаціями цих стандартів щодо забезпечення якості продукції є твердження, що якість - це результат якісних технологічних процесів, а не усунення вже виниклої вади (втрат якості продукції). Це, в свою чергу, неможливо без розробки стабільних технологічних процесів з урахуванням накопиченого досвіду та потенційних ризиків.

Досягнення заданих рівнів якості процесу виготовлення виробів значною мірою залежить від етапів технології виробництва ВВКМ, починаючи з вибору та підготовки сировини та закінчуючи графітизацією та обробкою поверхні для покращення необхідних спеціальних властивостей. Зміст та обсяг проекту робіт з розробки технологічного процесу виготовлення виробу з ВВКМ визначається технічним завданням та комплексною оцінкою майбутніх умов експлуатації. При оцінці умов експлуатації зазвичай враховують відповідні технічні вимоги на виріб. Показники якості вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів включають різні параметри, що залежать від конкретного застосування та властивостей матеріалу [5]. Основні характеристики, за якими можуть бути оцінені ВВКМ, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики композиційних матеріалів

№	Основні характеристики	Параметри
1	Механічні властивості	Міцність матеріалу; модуль пружності; твердість; стійкість до зношування; втомна міцність.
2	Термічні властивості	Температурна стабільність; теплопровідність; коефіцієнт теплового розширення.
3	Електричні властивості	Електропровідність; питомий опір; діелектрична міцність.
4	Структура та мікроструктура	Ступінь кристалічності; розмір та форма вуглецевих нанотрубок чи графену (якщо застосовуються); орієнтація вуглецевих волокон.
5	Хімічна стійкість	Стійкість до агресивних середовищ; стійкість до хімічних впливів.
6	Вагові та об'ємні характеристики	Щільність матеріалу; специфічна маса.
7	Виробничі параметри	Складність виробництва; вартість виробництва.
8	Екологічні аспекти	Можливість переробки; екологічна безпека.

Досягнення високої якості виробів з ВВКМ включає в себе ряд ключових етапів та заходів, спрямованих на забезпечення відповідності продукції встановленим стандартам і вимогам. Основні організаційні аспекти, які важливі для забезпечення якості у виробництві заготовок вуглець-вуглецевих композитів, та їх параметри наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Ключові фактори забезпечення якості при виробництві ВВКМ

№	Основні аспекти	Параметри
1	2	3
1	Вибір якісних матеріалів	Вибір високоякісних вихідних матеріалів, таких як вуглецеві волокна, які повинні відповідати встановленим стандартам і технічним вимогам.
2	Контроль виробничого процесу	Строгий контроль кожного етапу виробничого процесу, починаючи від підготовки сировини та закінчуючи отриманням матриці, контроль технологічних режимів (температури, тиску, часу) на кожній фазі виробництва.
3	Тестування матеріалів	Проведення різних видів тестування матеріалів, таких як механічні випробування, термічна стійкість, електропровідність та інші, щоб впевнитись в їх відповідності стандартам і вимогам.
4	Контроль якості виробів	Регулярне тестування виготовлених виробів на відповідність вимогам. Це може включати в себе перевірку розмірів, ваги, механічних властивостей та інших характеристик.

1	2	3
5	Система управління якістю	Впровадження ефективної системи управління якістю, яка включає процедури контролю, навчання персоналу, аналіз невідповідностей та їх причин.
6	Сертифікація	Отримання відповідних сертифікатів для ВВКМ.

Виробництво ВВКМ проводять за різними технологічними схемами. Для термонавантажених конструкцій використовують ВВКМ, у якому отримання вуглецевої матриці забезпечують осадженням з газу піролітичного вуглецю (ПУ) у пористий об'єм вуглецеволокнистої каркаса з застосуванням термоградієнтного методу в спеціальній термовакуумній печі. В якості вуглецевмісного газу зазвичай використовують мережевий газ [6], що містить не менше 95 % CH_4 . Вуглецева матриця являє собою монолітне тверде тіло, яке повторює геометричну форму тієї поверхні, на якій вона утворюється. Цей метод характеризується значною тривалістю проведення процесу ущільнення (до кількох діб) залежно від габаритних розмірів заготовки. Підтримка стабільності технологічних режимів на цьому етапі забезпечить якість майбутньої продукції.

Процес формування заготовок ВВКМ шляхом ущільнення пористого каркаса газозфазним методом можна віднести до типу «дифузних» систем. У таких систем не завжди можна чітко виділити вплив окремих факторів процесу на кінцевий результат. Дослідження «дифузних» систем за допомогою багатофакторного експерименту є складним завданням. Для побудови математичної моделі таких процесів використовують евристичні методи багатовимірної статистики та аналізу, які базуються на генерації рішень за принципами теорії кореляції, що потребує використання сучасних інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем управління.

Актуальність використання інтелектуальних систем управління обумовлюється рядом причин: традиційні автоматизовані технології вже не забезпечують необхідної якості управління через недостатнє врахування всіх факторів невизначеності, що впливають на систему. Спроби вдосконалити відомі алгоритми адаптивного управління не завжди приносять очікуваний результат. Це пояснюється як складністю самих алгоритмів, так і складністю їх реалізації на цифровій техніці з урахуванням умов забезпечення стійкості дискретної системи управління [7].

В цьому контексті виникає необхідність використання інтелектуальних систем управління, які здатні обробляти певний обсяг інформації у конкретній сфері знань. Це також викликає потребу у спеціальному дослідженні багатьох питань, таких як визначення основних параметрів якості, ідентифікація основних змінних та параметрів, що впливають на якість процесу, формування функції якості, яка відображає ступінь відповідності вихідних параметрів процесу встановленим стандартам або вимогам, оптимальні обсяги знань, вибір форми їх представлення, способів формування тощо [8].

Установки, які використовуються для виготовлення заготовок з ВВКМ, включають різноманітні виконавчі механізми з різними принципами керування - пневмомеханічні, електромеханічні, керовані децентралізованими автоматизованими системами контролю та управління, а також у деяких випадках виконавчими елементами з ручним керуванням [9].

Для застосування термоградієнтних газозфазних технологій виробництва вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів потрібна спеціальна установка з можливістю її

використання як для виробництва невеликих, так і середніх виробів з вуглецевих композиційних матеріалів, а також для вирішення актуальних науково-технологічних завдань [10]. Структурна схема установки для газофазного термоградієнтного методу ущільнення піроуглеродом представлено на рис. 1.

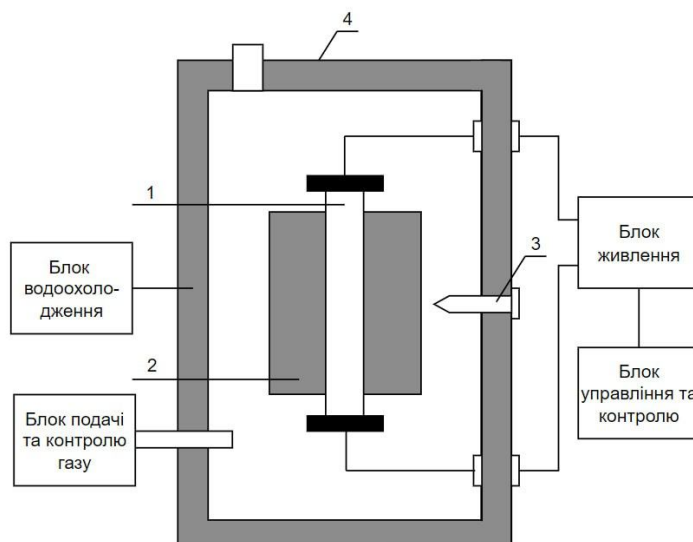


Рисунок 1 – Структурна схема установки для газофазного термоградієнтного методу ущільнення піроуглеродом:
1-нагрівач, 2-вуглецевий каркас, 3-термопари, 4- реактор

Основним елементом установки є вакуумний водоохолоджуванний циліндричний реактор з мідними водоохолоджуваними вісьово-симетричними токопроводами, розташованими у верхній та нижній кришках. Токопроводи виконані рухомими для компенсації термічного розширення виробів під час процесу. Крім цього, рухомість токопроводів полегшує завантаження установки. Установка має окремий блок живлення для нагріву виробів, включаючи регулятор напруги, трансформатори відповідної потужності.

Реактор обладнаний вакуумною системою та системою подачі природного газу. Під час проведення процесів ущільнення установка працює за атмосферного тиску CH_4 або за низького тиску, який може регулюватися від 5–10 мм рт.ст. до атмосферного. Установка оснащена системою водоохолодження та системою автоматичного управління та контролю параметрів процесу. Система управління забезпечує автоматичне підтримування заданої температури під час процесу з необхідною точністю (зазвичай з точністю 1–2 °C), програмоване збільшення та зниження температури установки та виробу, контроль температури охолоджувальної води, систему сигналізації при відхиленні параметрів.

Система управління побудована на регуляторах із запрограмованими законами управління, які, хоча і мають широкі можливості, але все ж таки обмежені в можливостях оптимізації, що звужує варіанти пошуку оптимальних керуючих впливів. Крім того, такі регулятори не здатні проводити багатопараметричне управління і слабо піддаються адаптації, оскільки налаштування кожного регулятора проводиться окремо від інших, тобто при коригуванні керуючих впливів не враховуються нелінійні взаємозв'язки між ними.

Існуючу систему управління необхідно постійно адаптувати до тих змін, які відбуваються в зовнішньому середовищі, шляхом модифікації та розвитку своїх внутрішніх

ієрархій управління. Проте це часто неможливо через наявність різноманітних факторів невизначеності в системі. У табл. 3 систематизовані такі фактори невизначеності, що характерні для технологічного процесу виготовлення заготовок з ВВКМ і можуть бути враховані при формуванні керуючих впливів.

Таблиця 3 – Типові фактори невизначеності

Фактори невизначеності	Характерні приклади
Зміни параметрів об'єкта в реакторі	Концентрація водню в газоподібних продуктах піролізу на виході з реактора
	Характер дифузійних потоків газового реагента
	Пористість каркасу
Температурні зміни	Дрейф нуля
	Зміна номіналів датчиків
	Вимірювання реальної температури поверхні заготовки
	Нерівномірність температурного поля вздовж заготовки
Зміни конструктивно-технологічних факторів виробів	Складність безпосереднього вимірювання будь-яких характеристик матриці в процесі виробництва
Невідповідність реальних умов виготовлення	Зміна вхідної електричної напруги, тиску газу
	Зміна концентрації зовнішньо подаваного реакційного газу

Одним з ключових технологічних процесів виробництва вуглецевої продукції є процес формування вуглецевих заготовок, під час якого формуються властивості вуглецевої сировини, що впливають як на хід технологічних процесів виробництва, так і на якість готової продукції. Тому для забезпечення якості заготовок із ВВКМ доцільно додати до структури існуючої системи управління та контролю установки «Агат» нові функції на основі інтелектуального управління, які б враховували невизначеності, що впливають на відповідний технологічний процес.

Головна архітектурна особливість, яка відрізнятиме інтелектуальну систему управління від існуючої, – це механізм отримання, зберігання та обробки знань, включення в модель факторів невизначеності, елементів несумісності реальних умов виробництва, відмов, шумів та інших чинників, які можуть вплинути на функціонування системи.

З практичної точки зору це потребуватиме ще одного рівня управління виконавчими та керуючими блоками. Як правило, це бази знань та механізми виводу знань, інтелектуальний класифікатор. Ці блоки можуть виконуватися як надбудови над існуючими регуляторами. Пропорційно-інтегро-диференційні (ПІД) регулятори можуть використовуватися для регулювання параметрів процесу, налаштовуючи належним чином його параметри, або безпосередньо включатися в замкнутий контур керування за допомогою використовуваного в системі інтерфейсу RS-485, що забезпечує шляхом програмного керування виконавчими пристроями реалізацію всіх існуючих і створюваних нових режимів, їх коригування та заміну за реакцією на показники спеціальних знань і виробничого досвіду за допомогою закладених у систему керування функцій.

У цьому контексті виникає необхідність вивчення багатьох питань, таких як оптимальний обсяг та склад знань, способи представлення інформації, методи формування даних, що є самостійним напрямком досліджень. Складність, а в деяких випадках і неможливість формалізації задач управління обумовлюють необхідність їх вирішення з використанням методів та технологій нейромережових адаптивних систем. Зрештою, такий підхід передбачає класичну багаторівневу організацію системи управління, яка має інтелектуальні можливості для аналізу ситуації, формування стратегії доцільної поведінки, планування послідовності дій, а також синтезу виконавчих законів, що відповідають заданим показникам якості [11–14].

В роботі розглянуто питання щодо забезпечення якості виробів з вуглецевого композитного матеріалу, яку можна підвищити завдяки застосуванню інтелектуальної системи управління технологічним процесом отримання заготовок з ВВКМ термоградієнтним методом з використанням радіально рухомої зони піролізу.

Удосконалено існуючу систему управління за допомогою введення додаткового блоку нейромережового адаптивного регулятора на базі ПД-регулятора. У такому регуляторі постійна частина виконується у вигляді налаштовуваної багатошарової нейронної мережі, з можливістю підключення та перебудови під конкретний канал управління системи вхідних значень шляхом ідентифікації параметрів, які можуть впливати на поведінку кожного компонента.

Це можуть бути параметри, пов'язані з температурою, тиском, швидкістю потоку тощо. Додавання інтелектуальних елементів допоможе зафіксувати та сформулювати детерміновані показники якості для кожного компонента або для всієї системи, які відображають необхідні характеристики якості [12].

У розробленій системі управління керуючий вплив формується з урахуванням реальної ситуації за допомогою закладених у систему управління спеціальних знань, статистичних даних і виробничого досвіду.

Запропонована інтелектуальна система автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів із ВВКМ з застосуванням нейромережових алгоритмів дозволить підвищити якість управління за рахунок підвищення адаптаційних можливостей системи. На рис. 2 представлена розроблена структурна схема інтелектуальної системи автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів із ВВКМ.

Структурна схема інтелектуальної системи автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів з ВВКМ є складною технічною системою для оптимізації та забезпечення високої якості виробництва продукції і складається з ряду основних компонентів:

- 1 – реакційна камера печі;
- 2 – реєстратор фізичних величин, який являє собою електронний пристрій з кольоровим TFT дисплеєм та клавіатурою для вимірювання, відображення та запису різних фізичних величин: температури, тиску, концентрації газів, витрати;
- 3 – інтелектуальний класифікатор розпізнавання, формування масивів і передачі даних;
- 4 – блок моделювання та управління, який здійснює оцінку стану об'єкта управління з точки зору зміни тактики та стратегії поведінки;
- 5 – блок формування робочих команд відповідно до масивів даних;
- 6 – блок регулювання та подачі води для охолодження печі, призначений для контролю та реєстрації параметрів води в контурах системи;
- 7 – електропривід запірно-регулюючого клапана подачі води;

8 – блок регулювання та подачі газу, який забезпечує управління виконавчими механізмами, передачу інформації через інтерфейс RS-485, перекриття трубопроводу подачі газу клапаном у випадку аварійної ситуації та інше;

9 – електропривід запірно-регулюючого клапана подачі газу;

10 – блок вибору режимів роботи;

11 – блок аварійної сигналізації, призначений для виявлення аварійної ситуації в контурі регулювання: контролює швидкість регульованої величини та видає сигнал, якщо при подачі максимального керуючого впливу вимірюване значення регульованої величини не змінюється протягом певного часу;

12 – блок реалізації алгоритмів ПІД-регулювання, основне завдання якого полягає у збереженні установки в допустимих межах, забезпечуючи енергоефективність системи управління потрібним технологічним режимом;

13 – сильноточне джерело живлення;

14 – контролер крокового приводу регулятора сильноточного джерела живлення;

15 – світлова і звукова сигналізація про відхилення від номінальних значень параметрів робочих середовищ основних і допоміжних систем;

16 – блок регулювання, контролю та реєстрації температури робочого середовища при проведенні експериментальних технологічних процесів піролітичного ущільнення деталей з ВВКМ;

17 – пульт управління установкою;

18 – блок нейромережевої адаптивної системи, який будується на основі типових ПІД-регуляторів: незмінна частина виконується у вигляді налаштовуваної багат шарової нейронної мережі, з можливістю підключення та перебудови під конкретний канал управління існуючої системи. Такі мережі створюються за моделлю «некерованого навчання» для навчання породжувальних моделей даних;

19 – програмне забезпечення Simatic WinCC для створення людино-машинного інтерфейсу;

20 – комп'ютерні шини і інтерфейси виконані в стандарті EIA/TIA-485 (RS-485). Прийом і передача відбуваються по двом окремим парам провідників. Інформація з приладу на комп'ютер або мобільний пристрій передається за протоколом ModbusRTU/ASCII. Це дозволяє організувати взаємодію між різними підсистемами обладнання для проведення автоматизованого оперативного контролю та управління.

21 – блок формування масивів робочих команд;

22 – блок датчиків: температури, тиску, розходу тощо.

В режимі навчання система адаптує параметри всіх блоків у відповідності з вимогами до вихідної інформації. По завершенні процедури навчання блоком вводу/виводу даних можна встановити режим процедури обробки даних (автоматичний або ручний). В автоматичному режимі система, використовуючи інтелектуальний класифікатор, визначає оптимальну стратегію управління або здійснює зміну режиму на основі коефіцієнта ефективності та параметрів якості роботи. В ручному режимі оператор приймає рішення про налаштування стратегії управління або зміну режиму, аналізуючи коефіцієнт ефективності, параметри якості роботи системи та інші показники.

Розроблена інтелектуальна система управління передбачає внесення в алгоритм управління додаткового ряду умов, що змінюють швидкість навчання нейрона, який формує коефіцієнт пропорційної складової нейромережевого регулятора, для впливу на якість перехідного процесу (уникнення перерегулювання та коливань). Цей тип регулятора поєднує методи нейронних мереж з адаптивними методами управління з метою забезпечення ефективного регулювання в змінних динамічних умовах.

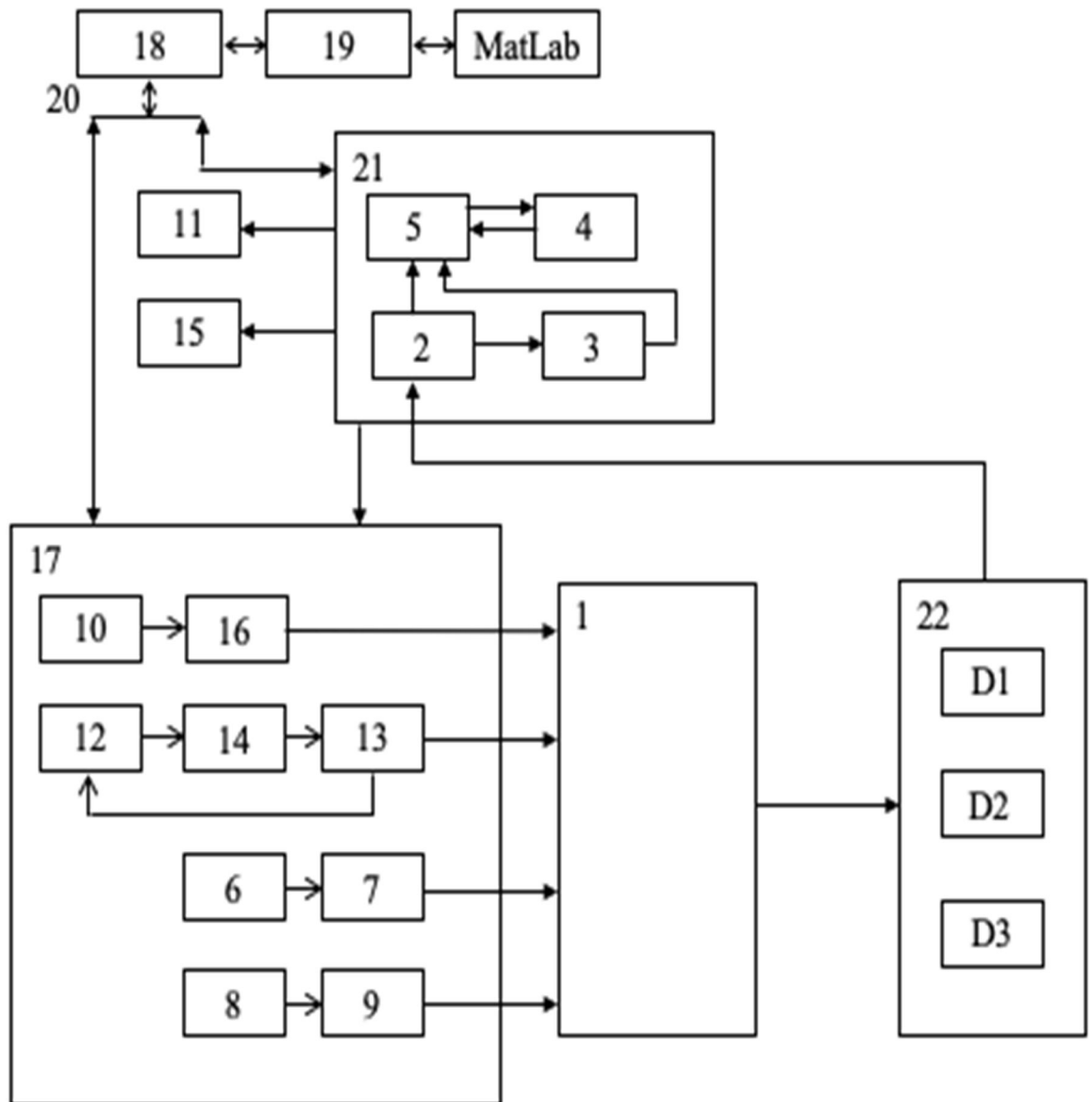


Рисунок 2 – Структурна схема інтелектуальної системи автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів з ВВКМ

Запропоновані покращення дозволять забезпечити стабільну роботу мережі, її здатність до навчання в контурі управління в реальному часі, що дозволить провести валідацію моделі на основі експериментальних даних та калібрування параметрів для більш точної відповідності моделі реальному процесу, підвищити якість продукції за рахунок здатності до навчання та зменшення факторів невизначеності

Таким чином, у роботі розглянуті основні організаційні аспекти, які відіграють ключову роль у забезпеченні якості виробництва вуглець-вуглецевих композитів. У рамках дослідження були виявлені та класифіковані фактори невизначеності інформації, що є характерними для технологічного процесу виготовлення заготовок з ВВКМ. Ці фактори включають, наприклад, зміни у властивостях початкових матеріалів, коливання в

навколишньому середовищі, а також варіації у процесах обробки та виготовлення. Розуміння та систематизація цих факторів відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності та якості виробництва ВВКМ.

Запропонована структурна схема інтелектуальної системи управління реакційною піччю, що дозволить підвищити якість заготовок ВВКМ за рахунок застосування нейромережових алгоритмів та адаптаційних можливостей системи, що ґрунтуються на використанні макроінформації про динамічний стан процесу, спрямованого на гарантовану якість формування матриці ВВКМ. Представлений матеріал розширює уявлення про процес та дозволяє з більшою надійністю моделювати нові технології отримання заготовок з ВВКМ.

Література

1. Дослідження особливостей термоградієнтного газофазного ущільнення піровуглецем пористих середовищ з використанням скраплених вуглеводневих газів / І.В. Гурін, В.В. Гуйда, О.Г. Капленко, В.В. Колосенко / Питання атомної науки та техніки, 2004, №3 (85), с. 124–127.
2. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133–137.
3. ДСТУ ISO 9000:2015 Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів.
4. ДСТУ ISO 10012:2005 Системи керування вимірюванням. Вимоги до процесів вимірювання та вимірювального обладнання.
5. ДСТУ EN 1159-3:2010 Кераміка технічна спеціальна. Теплофізичні характеристики керамічних композиційних матеріалів. Частина 3. Визначення питомої теплоємності.
6. ДСТУ ГОСТ 27577:2005 Газ природний паливний компримований для двигунів внутрішнього згорання. Технічні умови.
7. Нефедов Л.И., Овчаренко В.Е., Биньковская А.Б. Модели параметрического синтеза компьютерной сети и условиях нечеткой информации // Технология приборостроения. – Харьков, 2019, №2 с. 47–50.
8. Adaptive Control / Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, 2nd Edition. Dover publications, inc., 2008, 574 p.
9. Митропольський І.Є., Грицак Р.В. Вакуумна техніка: Навчальний посібник. - Ужгород: Вид-во УжНУ «Говерла», 2018. – 138 с.
10. О деяких можливостях газофазних методів для виготовлення вуглець-вуглецевих теплових вузлів для вирощування монокристалів / В.А. Гурін, І.В. Гурин, Ю.Е. Мушин, С.Г. Фурсов, В.В. Колосенко, А.А. Корнеев, А.В. Григорьев, А.Н. Буколов // Питання атомної науки і техніки, 1999, №4 (76), с. 46–55.
11. PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha, G. Lloyds Raja. Publisher: Intechopen. 2023, 118 p.
12. Lloyds Raja G, Ali A. New PI-PD controller design strategy for industrial unstable and integrating processes with dead time and inverse response. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2021; 32(2): 266–280.

13. PID Control for Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha. Publisher: Intechopen. 2018, 218 p. ISBN: 978-1-78923-700-9.

14. Ortega R., Astolfi A., Barabanov N.E. Nonlinear PI control of uncertain systems: an alternative to parameter adaptation // Systems & Control Letters. 2002. Vol. 47. Issue 3. P. 259–278.

Bibliography (transliterated)

1. Doslidzhennya osoblyvostey termohradiyentnoho hazofaznoho ushchilnennya pirovuhletsyem porystykh seredovyshch z vykorystannyam skraplenykh vuhlevodnevykh haziv / I.V. Hurin, V.V. Huyda, O.G. Kaplenko, V.V. Kolosenko / Pytannya atomnoyi nauky ta tekhniki, 2004, №3 (85), p. 124–127.

2. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system / V.E. Ovcharenko, E.V. Tokareva, I.V. Gurin // Problems of atomic science and technology. – 2018, № 2 (114), p.133–137.

3. DSTU ISO 9000:2015 Systemy upravlinnya yakystyu. Osnovni polozhennya ta slovnyk terminiv.

4. DSTU ISO 10012:2005 Systemy keruvannya vymiryuvanniam. Vymohy do protsesiv vymiryuvannya ta vymiryuvalnoho obladnannya.

5. DSTU EN 1159-3:2010 Keramika tekhnichna spetsialna. Teplofizychni kharakterystyky keramichnykh kompozytsiynykh materialiv. Chastyna 3. Vyznachennya pytomoji teplojemnosti.

6. DSTU HOST 27577:2005 Haz pryrodni palyvnyy komprimovanny dlya dyhuniv vnutrishnoho zhorjannya. Tekhnichni umovy.

7. Nefedov L.I., Ovcharenko V.E., Byn'kovskaia A.B. Modeli parametrychnoho syntezy kompiuternoї merezhi i umovakh nechitkoї informatsii // Tekhnolohiia prystroistva. – Kharkiv, 2019, №2 p. 47–50.

8. Adaptive Control / Karl J. Astrom, Bjorn Wittenmark, 2nd Edition. Dover publications, inc., 2008, 574 p.

9. Mytropolskyi I.Ye., Hrytsak R.V. Vakuamna tekhnika: Navchalnyi posibnyk. - Uzhhorod: Vyd-vo UzhNU "Hoverla", 2018. – 138 p.

10. O deiakykh mozhlyvostyakh hazofaznykh metody dlya vyhotovlennya vuhlets'-vuhletsevykh teplovykh vuzliv dlya vyroshchuvannya monokrystaliv / V.A. Hurin, I.V. Huryn, Yu.E. Muryn, S.G. Fursov, V.V. Kolosenko, A.A. Korneev, A.V. Hryhoryev, A.N. Bukolov // Pytannia atomnoi nauky i tekhniki, 1999, №4 (76), p. 46–55.

11. PID Control for Linear and Nonlinear Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha, G. Lloyds Raja. Publisher: Intechopen. 2023, 118 p.

12. Lloyds Raja G, Ali A. New PI-PD controller design strategy for industrial unstable and integrating processes with dead time and inverse response. Journal of Control, Automation and Electrical Systems. 2021; 32(2): 266–280.

13. PID Control for Industrial Processes / Mohammad Shamsuzzoha. Publisher: Intechopen. 2018, 218 p. ISBN: 978-1-78923-700-9.

14. Ortega R., Astolfi A., Barabanov N.E. Nonlinear PI control of uncertain systems: an alternative to parameter adaptation // Systems & Control Letters. 2002. Vol. 47. Issue 3. P. 259–278.

УДК 621.365.4

І. В. Гурін, к. техн. н., І. Ш. Невлюдов, д. техн. н., професор,
В. Є. Овчаренко, д. техн. н., професор, О. В. Токарева, к. техн. н., професор

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ З НЕЙРОМЕРЕЖЕВИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВВКМ

В статті розглянуті питання забезпечення якості заготовок з вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів на етапі їх виробництва. Підкреслено, що досягнення заданих рівнів якості процесу виготовлення виробів значною мірою залежить від етапів технології виробництва ВВКМ, починаючи з вибору та підготовки сировини та закінчуючи графітизацією та обробкою поверхні для покращення необхідних спеціальних властивостей. Наведено основні характеристики композиційних матеріалів, за якими можуть бути оцінені ВВКМ, та ключові фактори забезпечення якості при їх виробництві.

Розглянуто основні організаційні аспекти, які відіграють ключову роль у забезпеченні якості виробництва вуглець-вуглецевих композитів. У рамках дослідження були виявлені та класифіковані фактори невизначеності інформації, що є характерними для технологічного процесу виготовлення заготовок з ВВКМ. Ці фактори включають зміни у властивостях початкових матеріалів, коливання в навколишньому середовищі, а також варіації у процесах обробки та виготовлення. Розглянуті питання щодо забезпечення якості виробів з вуглецевого композитного матеріалу, яку можна підвищити завдяки застосуванню запропонованої інтелектуальної системи управління технологічним процесом отримання заготовок з ВВКМ термоградієнтним методом з використанням радіально рухомої зони піролізу.

Удосконалено систему управління за допомогою введення додаткового блоку нейромережевого адаптивного регулятора на базі ПД-регулятора, в якому постійна частина виконується у вигляді налаштовуваної багатошарової нейронної мережі, з можливістю підключення та перебудови під конкретний канал управління системи вхідних значень шляхом ідентифікації параметрів, які можуть впливати на поведінку кожного компонента. Додавання інтелектуальних елементів допоможе зафіксувати та сформулювати детерміновані показники якості для кожного компонента або для всієї системи, які відображають необхідні характеристики якості.

Запропонована інтелектуальна система автоматичного управління та контролю параметрів технологічного процесу виробництва виробів із ВВКМ з застосуванням нейромережевих алгоритмів дозволить підвищити якість управління за рахунок підвищення адаптаційних можливостей системи, що ґрунтуються на використанні макроінформації про динамічний стан процесу, спрямованого на гарантовану якість формування матриці ВВКМ.

Запропоновані покращення дозволять забезпечити стабільну роботу мережі, її здатність до навчання в контурі управління в реальному часі, що дозволить провести валідацію моделі на основі експериментальних даних та калібрування параметрів для більш точної відповідності моделі реальному процесу, підвищити якість продукції за рахунок здатності до навчання та зменшення факторів невизначеності.

Ключові слова: система управління, регулятор, якість, технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка.

И. В. Гурин, И. Ш. Невлюдов, В. Е. Овчаренко, Е. В. Токарева

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С НЕЙРОСЕТЕВЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА УУКМ

В статье рассмотрены вопросы обеспечения качества заготовок из углерод-углеродных композиционных материалов на этапе их производства. Подчеркнуто, что достижение заданных уровней качества процесса изготовления изделий в значительной мере зависит от этапов технологии производства УУКМ, начиная с выбора и подготовки сырья и заканчивая графитизацией и обработкой поверхности для улучшения необходимых специальных свойств. Приведены основные характеристики композиционных материалов, по которым можно оценить УУКМ, и ключевые факторы обеспечения качества при их производстве.

Рассмотрены основные организационные аспекты, играющие ключевую роль в обеспечении качества производства углерод-углеродных композитов. В рамках исследования были выявлены и классифицированы факторы неопределенности информации, которые характерны для технологического процесса изготовления заготовок из УУКМ. Эти факторы включают изменения в свойствах исходных материалов, колебания в окружающей среде, а также вариации в процессах обработки и изготовления. Рассмотрены вопросы обеспечения качества продукции из углеродного композитного материала, которое можно повысить за счет применения предложенной интеллектуальной системы управления технологическим процессом получения заготовок из УУКМ термоградиентным методом с использованием радиально подвижной зоны пиролиза.

Усовершенствована система управления путем введения дополнительного блока нейросетевого адаптивного регулятора на основе ПИД-регулятора, в котором постоянная часть выполняется в виде настраиваемой многослойной нейронной сети с возможностью подключения и перестройки под конкретный канал управления системы входных значений путем идентификации параметров, которые могут влиять на поведение каждого компонента. Добавление интеллектуальных элементов поможет зафиксировать и сформулировать детерминированные показатели качества для каждого компонента или для всей системы, отражающие необходимые характеристики качества.

Предложенная интеллектуальная система автоматического управления и контроля параметров технологического процесса производства изделий из УУКМ с использованием нейросетевых алгоритмов позволит повысить качество управления за счет увеличения адаптационных возможностей системы, основанных на использовании макроинформации о динамическом состоянии процесса, направленного на гарантированное качество формирования матрицы УУКМ.

Предложенные улучшения позволят обеспечить стабильную работу сети, ее способность к обучению в контуре управления в реальном времени, что позволит провести валидацию модели на основе экспериментальных данных и калибровку параметров для более точного соответствия модели реальному процессу, повысить качество продукции за счет способности к обучению и уменьшения факторов неопределенности.

Ключевые слова: система управления, регулятор, качество, технологический процесс, углеродно-углеродный композитный материал, заготовка.

I. V. Hurin, I. Sh. Nevlyudov, V. E. Ovcharenko, O. V. Tokarieva

**AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH NEURAL NETWORK CONTROLLERS
FOR IMPROVING THE QUALITY OF CCCM**

The article discusses quality assurance issues of carbon-carbon composite materials during their production stage. It emphasizes that achieving the desired quality levels of the manufacturing process depends significantly on the stages of CCCM production technology, starting from the selection and preparation of raw materials and ending with graphitization and surface treatment to improve the necessary special properties. The main characteristics of composite materials, by which CCCM can be evaluated, and key factors ensuring quality in their production are provided.

The main organizational aspects playing a key role in ensuring the quality of carbon-carbon composites production are considered. Within the scope of the study, factors of uncertainty typical for the technological process of manufacturing blanks from CCCM were identified and classified. These factors include changes in the properties of initial materials, fluctuations in the surrounding environment, as well as variations in processing and manufacturing processes. The issues regarding the quality assurance of products made from carbon composite material are discussed, which can be improved through the application of the proposed intelligent management system for the technological process of obtaining blanks from CCCM using the thermogradient method with the use of a radially movable pyrolysis zone.

The control system has been improved by introducing an additional block of a neural network adaptive controller based on a PID controller, in which the integral part is implemented as a tunable multilayer neural network, with the ability to connect and reconfigure for specific control channel inputs through parameter identification that may affect the behavior of each component.

Adding intelligent elements will help capture and formulate deterministic quality indicators for each component or for the entire system, reflecting the necessary quality characteristics.

The proposed intelligent system for automatic control and monitoring of parameters in the technological process of manufacturing products from CCCM using neural network algorithms will improve control quality by increasing the system's adaptive capabilities based on the use of macro-information about the dynamic state of the process, aimed at guaranteed quality formation of the CCCM.

Keywords: control system, controller, quality, technological process, carbon-carbon composite material, workpiece.