

Жученко О. А.,
Бевзюк Л. Л.

СИНТЕЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ГРАФІТУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ

Запропонована система керування, яка передбачає керування піччю графітування у двох режимах її роботи — розігрівання та безпосередньо графітування. Представлена структура системи керування у режимі розігрівання, що базується на використанні нечіткого регулятора, входи якого розраховуються за спрощеною моделлю процесу графітування. Описано алгоритм керування у режимі графітування, який з метою завчасного визначення моменту відключення електроживлення печі використовує прогнозування ступеня графітування вуглецевих виробів.

Ключові слова: вуглецеві вироби, графітування, система керування, нечіткий регулятор.

1. Вступ

Сучасні світові тенденції розвитку чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інших галузей промисловості обумовлюють постійне нарощування обсягів виробництва графітованих вуглецевих виробів. Виробництво графітованої продукції складне, багатостадійне та дуже енергоємне. При цьому на заключну стадію — процес графітування — припадає до 80 % загальних енерговитрат [1, 2], що становить 8–10 МВт-годин на 1 тону продукції [3, 4]. Тому задача підвищення ефективності процесу графітування у виробництві вуглецевих виробів є актуальною науково-технічною задачею особливо в сучасних умовах постійного зростання вартості енергоносіїв.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єкт дослідження — електрична піч опору Ачесона. Графітування вуглецевих виробів, до яких відносяться електроди дугових сталеплавильних печей, подові блоки алюмінієвих електролізерів тощо, як правило, здійснюється в електричних печах опору по технології Ачесона [1, 3, 4]. Печі Ачесона характеризуються істотною нерівномірністю розподілу температурного поля та нестабільністю електро- та теплофізичних властивостей матеріалів завантаження. При швидкому нагріванні печі збільшується нерівномірність температурного поля і, як наслідок, зростає термонапруження у виробах, що може призвести до браку продукції. У виробничих умовах з метою запобігання випуску бракованої продукції здійснюється опосередковане оцінювання термопружного стану виробів, що призводить до перевитрат електроенергії, а значить, до зниження ефективності виробництва.

Ще одним чинником перевитрат енергоресурсів є неточне визначення тривалості кампанії графітування, яка для гарантованого забезпечення нормативної якості готової продукції триває довше, ніж потрібно.

Названі вище обставини викликають необхідність з метою підвищення ефективності процесу графітування вуглецевих виробів впровадження сучасної системи оптимального керування ним на основі аналізу поточного стану технологічного процесу.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної роботи є створення нової системи керування процесом графітування вуглецевих виробів, яка забезпечить заощадження енергоресурсів при збереженні потрібної якості готової продукції, для чого функціонування системи, на відміну від існуючих, повинно відбуватися не за наперед заданою програмою, а з урахуванням поточного стану об'єкта керування.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих систем керування процесом графітування вуглецевих з метою визначення необхідності створення системи керування.
2. Розробити структуру системи керування у режимі розігрівання, що базується на використанні нечіткого регулятора, входи якого розраховуються за спрощеною моделлю процесу графітування.

4. Аналіз літературних даних

Непродуктивні витрати теплоти у процесі графітування вуглецевих виробів тим менші, чим швидше відбувається розігрів керн печі (більша частка енергії витрачається на нагрівання виробів) [5]. Усі відомі способи керування піччю графітування у тій чи іншій формі реалізують ідею прискореного підведення потужності (а, отже, і розігріву керн печі) при гарантованому забезпеченні цілісності виробів.

Регламент графітування вуглецевої продукції кожного типу розробляють експериментально на основі тривалої практики або розраховують приблизно за допомогою математичної моделі температурного поля для кожної окремої конструкції печі графітування. При цьому береться до уваги той факт, що скорочення тривалості кампанії означає зменшення тепловтрат та підвищення ефективності процесу графітування, але пришвидшення розігріву керн збільшує нерівномірність температурного поля в об'ємі заготовок, що збільшує термонапруження [6].

Швидкість розігріву обмежують так, щоб за відсутності достовірної інформації про температурний стан керн, унеможливити руйнування виробів (внаслідок термонапружень) при будь-яких збурювальних впливах. Тому спосіб часто призводить к значним перевитратам

електроенергії, а при змушених простоях відсутні надійні рекомендації щодо продовження процесу.

Керування процесом графітизації шляхом зміни напруги печі в залежності від кількості підведеної енергії можна доповнювати зміною режиму охолодження футеровки — *керування за температурою футеровки*. Для цього необхідно організувати визначення температури футеровки впродовж кампанії [7].

У роботі [6] запропоновано змінювати швидкість підведення потужності по зонам, що характеризуються рівнем досягнутих температур. Процес графітування розділяють на зони: до 1000 °С, 1000...2000 °С та вище 2000 °С, причому в другій зоні швидкість розігріву доцільно зменшувати. Конкретні рекомендації щодо швидкості розігріву визначаються експериментально для кожного типу продукції.

Аналогічний розподіл на температурні зони запропонований у [8], де перша зона, яка знаходиться в області температур до 1000...1200 °С, дозволяє швидко підведення потужності без ризику утворення дефектів в заготовках. У другій зоні, що відповідає діапазону температур 1000...1700 °С, відбуваються значні зміни лінійних розмірів заготовок і швидкість треба істотно обмежити (до 22...25 °С/год.). В третій зоні, коли температури перевищують 1700 °С, через значне збільшення теплопровідності виробів, утворення критичних термонапружень малоімовірно і швидкість нагрівання можна знову підвищити.

Спосіб в промислових умовах не застосовується, оскільки визначення температури вище 1500 °С є серйозною технічною проблемою. Крім того, значна нерівномірність розподілу температурного поля в заготовках не дозволяє однозначно виділяти температурні зони, а використання усереднених температурних показників робить спосіб неефективним.

Автори [9] вважають, що крива активного опору пічного контуру повністю відображує основні процес в печі і її стала ділянка відповідає досягненню максимальних температур в керні, що дає змогу визначати час припинення підведення потужності до печі. На підставі цього у [10] запропоновано спосіб *керування* процесом графітування та визначення моменту закінчення кампанії *за характером зміни та досягнутим кінцевим значенням омичного опору печі*. Крім визначення моменту припинення кампанії графітування, тут пропонується визначати середню температуру керна як величину, обернено пропорційну омичному опору. Спосіб використовується в області високих температур (вище 1100 °С), де опір печі, на думку авторів, змінюється по логарифмічному закону.

Ці способи прості в застосуванні, але мають надзвичайно низьку точність, оскільки крива опору печі переважно характеризує процеси в пересипці (опір об'єму пересипки значно переважає опір вуглецевих заготовок). Крім того, використання узагальнених показників знижує якість керування і потенційно здатне призвести як до перевитрат електроенергії, так і до руйнування виробів.

У праці [11] запропонований алгоритм *керування* процесом графітування та закінчення кампанії *за величиною ступеня графітування* у характерній точці простору печі. Дана величина розраховується за математичною моделлю, яка являє собою систему диференціальних рівнянь у частинних похідних. Розв'язок такої системи потребує значного часу навіть для сучасних обчислювальних засобів. Ця обставина суттєво обмежує засто-

сування даного методу у системах керування реального часу. Крім того, визначення розташування характерної точки є суб'єктивним, що може позначитися на кінцевих результатах графітування.

Дослідження [1, 2] присвячені побудові, розрахунку та оптимізації систем електроживлення печей Ачесона з урахуванням особливостей і взаємозв'язків процесів електромагнітного та електротеплового перетворення електричної енергії. У даних дослідженнях не розглядається безпосередньо графітування як технологічний процес, призначений для виробництва вуглецевих виробів, не приділяється увага питанням якості готової продукції.

Із наведеного аналізу існуючих систем керування процесом графітування вуглецевих виробів, що керування даним процесом ведеться за наперед заданою програмою зміни потужності (напруги) електричного струму засобів електроживлення. Така програма формується як усереднена функція на основі аналізу результатів багаторазового проведення процесу графітування. Такий підхід безумовно має недоліки, основним з яких є та обставина, що кожна окремо взята кампанія графітування у загальному випадку відрізняється від узагальненого варіанту, наприклад, складом вуглецевих виробів, що обробляються, або складом та формою пересипки тощо. Крім того, у процесі графітування трапляються (особливо останнім часом) раптові відключення електроживлення, які ніяким чином не можуть бути передбачені наперед сформованою програмою.

На процес графітування впливає цілий ряд факторів, зокрема, індивідуальні властивості вуглецевих матеріалів, газове середовище, передісторія термічної обробки, тривалість процесу, температура тощо. Вплив декотрих із них на процес графітування наразі до кінця не досліджений. Однак, як показують численні дослідження [12, 13], головним чинником, який визначає якість графітування вуглецевої речовини є кінцева температура. Причому для отримання якісного штучного графіту кінцева температура обробки повинна бути не нижче 2200–2800 °С. Вимірювати такі температури в автоматичному режимі сучасними технічними засобами неможливо, а це означає, що нема перспективи побудувати класичну систему автоматичного керування на основі, скажімо, ПІД-регуляторів.

5. Матеріали та методи дослідження

Задача системи керування процесом графітування вуглецевих виробів формується таким чином: забезпечити мінімізацію витрат енергоресурсів при збереженні потрібної якості готової продукції. Енерговитрати формуються двома складовими — потужністю електричного струму, що подається на процес, та часом кампанії графітування.

Як відомо [11, 14], графітування вуглецевих виробів відбувається при температурах понад 2000 °С. Тому процес графітування умовно можна розділити на дві стадії — розігрівання та безпосередньо графітування.

Для мінімізації енерговитрат у режимі розігрівання треба забезпечити максимально допустиму швидкість підвищення температури до досягнення в усіх вуглецевих заготовках температури графітування [11]. При цьому швидкість підвищення температури обмежується механічною міцністю продукції, яка при значних градієнтах температур може бути пошкоджена у результаті

виникнення тріщин. Отже, задачею системи керування на стадії розігрівання є визначення та реалізація оптимальної функції зміни напруги електричного струму у часі.

Після досягнення потрібної температури графітування задачею системи керування є підтримання температури на заданому рівні за рахунок відповідної зміни напруги електричного струму до досягнення заданого значення ступеня графітування, який виступає як узагальнений показник готової вуглецевої продукції [11, 14, 15]. При цьому вирішальним моментом є тривалість процесу графітування, бо, враховуючи питомі витрати електроенергії (до 10 МВт-год. на 1 т продукції), визначення оптимального моменту зупинки подачі електроживлення є дуже важливим. Таким чином, у відповідності до розглянутих стадій технологічного процесу графітування потрібно розробити системи керування двома стадіями — розігрівання та графітування.

6. Результати дослідження

6.1. Система керування стадією розігрівання. Як вказувалось вище, технологічним режимом, який визначає ефективність ведення процесу графітування, є температурний режим. На жаль, відсутня технічна можливість вимірювати температуру вуглецевих заготовок у ході технологічного процесу. У цій ситуації доцільним видається застосування нечітких систем керування [16, 17], які використовують досвід експертів. Але і для такої системи потрібна інформація про «внутрішній» стан (температурний режим) процесу графітування.

Перш за все треба сформулювати температури, які у подальшому визначатимуть температурний режим процесу графітування. Як такі температури доцільно використати: мінімальну температуру в об'ємі заготовки (визначає закінчення розігрівання і початок графітування); середню температуру в об'ємі заготовки (відображає узагальнену картину температурного стану заготовки); максимальний перепад температур всередині заготовки (запобігання механічним пошкодженням).

Фактично єдиним джерелом отримання інформації про наведені вище температури є математична модель процесу. На рис. 1–3 показані графіки зміни мінімальної та середньої температур, а також максимальної різниці температур у різних рядах вуглецевих заготовок для однієї ординарної кампанії графітування (дані отримані за результатами розрахунків математичної моделі [11] з урахуванням реальних потужностей електроживлення для кампанії графітування, що розглядалася).

Як видно з представлених графіків (рис. 1–3), на протязі кожної

кампанії графітування наведені температури та максимальні різниці температур суттєво змінюються. Крім температурного режиму, у процесі розігрівання має бути врахований час, що пройшов від початку кампанії графітування. Структурна схема системи керування стадією розігрівання представлена на рис. 4.

Згідно даної схеми за вимірюваними значеннями напруги U та величини I електричного струму за допомогою математичної моделі розраховуються значення мінімальної T_{\min} та середньої T_{mid} температур, а також максимальні перепади температур T_{\max} по заготовках, що обробляються. Дані значення, а також час τ від початку кампанії графітування, є вхідними даними для нечіткого регулятора, виходом якого слугує напруга U електричного струму.

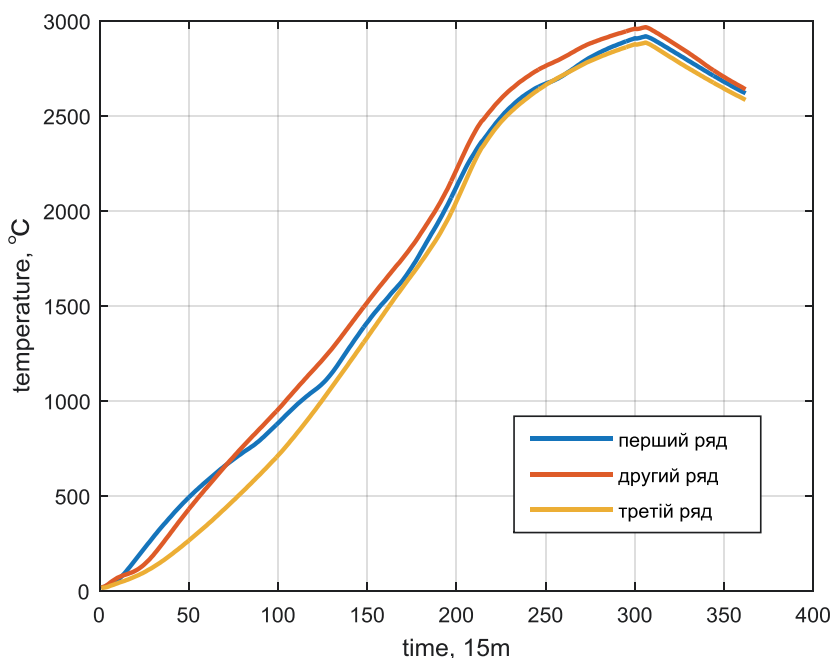


Рис. 1. Залежність середніх температур від часу по об'ємам заготовок у перших трьох рядах

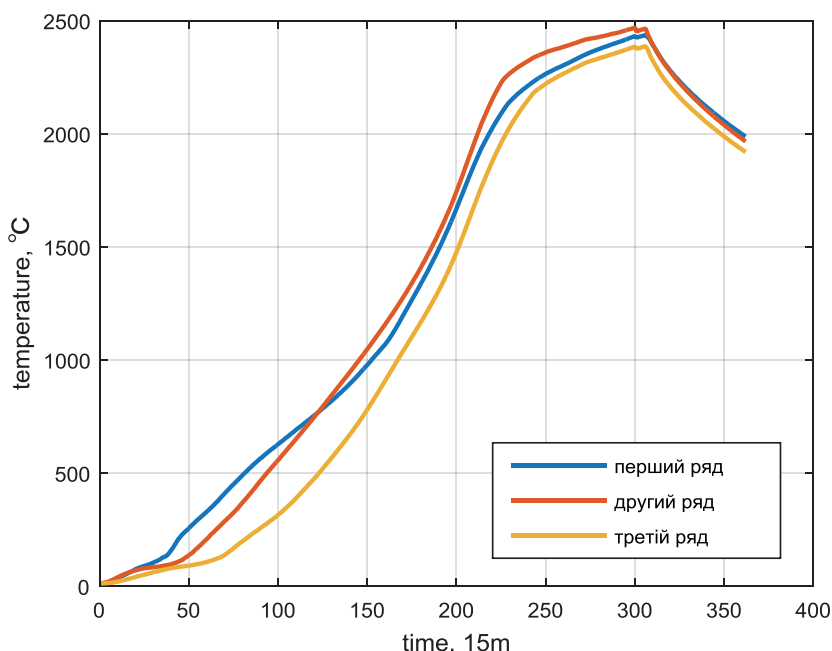


Рис. 2. Залежність мінімальних температур від часу по об'ємам заготовок у перших трьох рядах

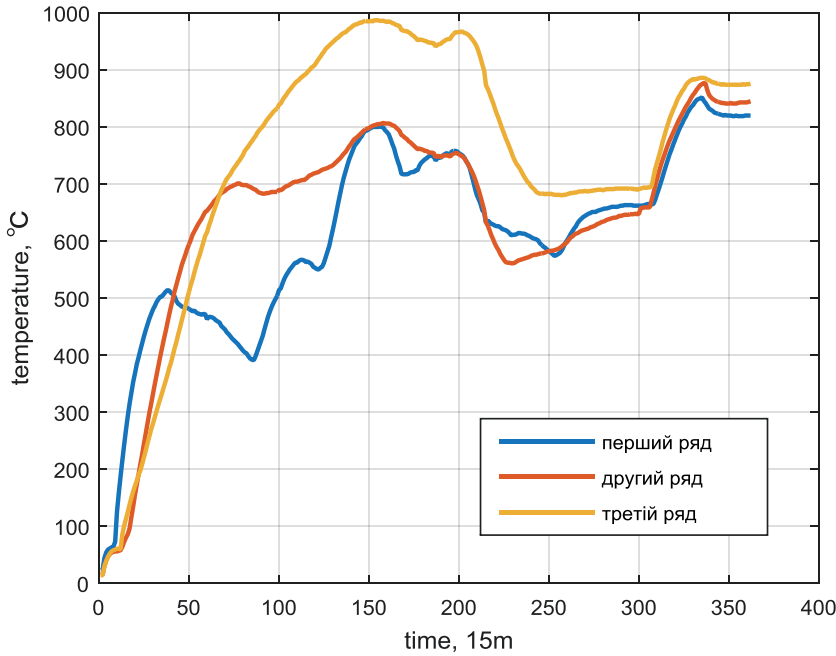


Рис. 3. Залежність максимального перепаду температур від часу по об'ємам заготовок у перших трьох рядах

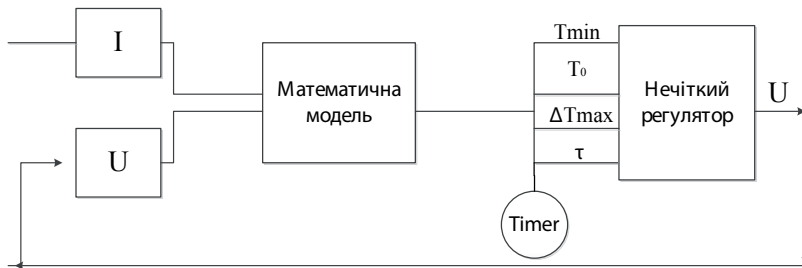


Рис. 4. Структурна схема системи керування стадією розігрівання

Піч графітування – складний технологічний об'єкт з розподіленими параметрами, який математично описується системою диференціальних рівнянь у частинних похідних [11, 18, 19]. Розв'язання такої системи вимагає значного часу навіть сучасними обчислювальними засобами, що робить неможливим використання таких

математичних моделей у системах керування реального часу, про які йдеться у даному дослідженні. Тому у системі керування, що розробляється, доцільно використати спрощену математичну модель процесу графітування [20], розрахунок якої не потребує скільки-небудь значного часу.

Структурна схема нечіткого регулятора, побудованого у пакеті Fuzzy Logic Toolbox [21], показана на рис. 5. На рис. 6–8 представлені структури нечітких входніх змінних «difference» (максимальний перепад температур T_{max}), «min» (мінімальні значення температур T_{min}) та «mean» (середня температура T_{mean}) заготовок. Дані нечіткі змінні містять три терми, а саме «S» (малий), «M» (середній) та «L» (великий), описані кривими нормального розподілу, параметри яких математичне сподівання та дисперсія наведені у табл. 1.

На рис. 9 зображена структура нечіткої входньої змінної «time» – час від початку кампанії графітування. Дана нечітка змінна містить три терми «beginning» (початок), «middle» (середина) та «end» (закінчення), описані кривими нормального розподілу параметри якого математичне сподівання та дисперсія становили відповідно для терму «beginning» – 0 та 45030 с, для терму «middle» – 153000 та 25100 с та для терму «end» – 306000 та 44350 с.

На рис. 10 показана структура нечіткої вихідної змінної «voltage» – напруга струму живлення. Дана нечітка змінна містить три терми – «small» (мала), «average» (середня) та «large» (висока), описані кривими нормального розподілу параметри якого математичне сподівання та дисперсія становили відповідно для терму «beginning» – 0 та 44,16, для терму «middle» – 104 та 44,16 та для терму «end» – 208 та 44,16.

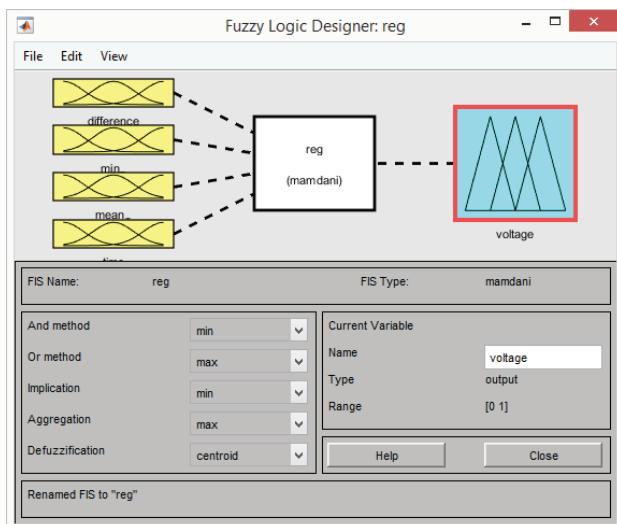


Рис. 5. Структурна схема нечіткого регулятора

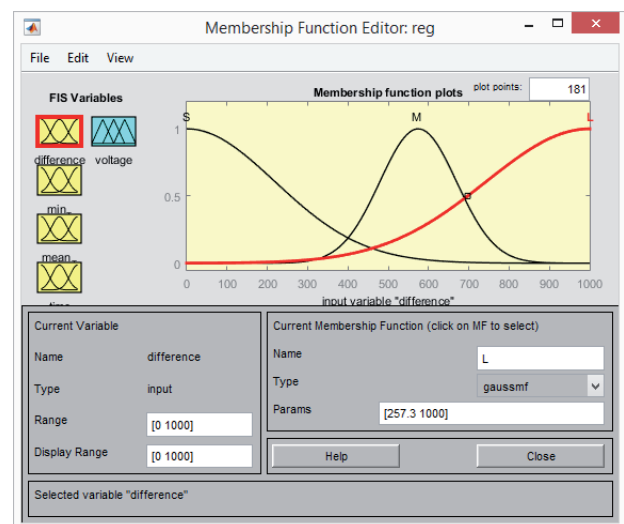


Рис. 6. Структура нечіткої змінної «difference»

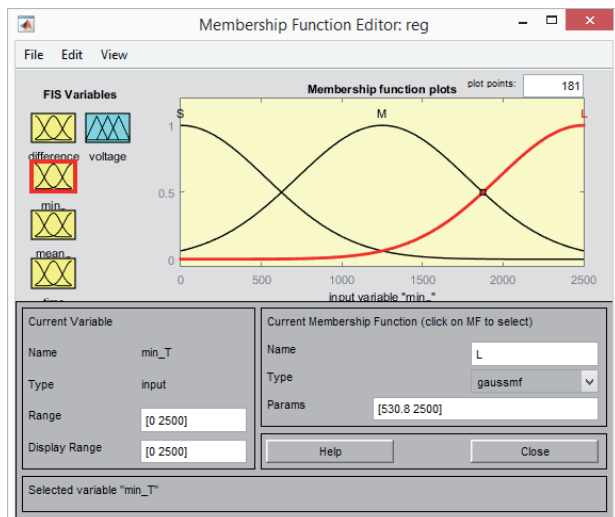


Рис. 7. Структура нечіткої змінної «min»

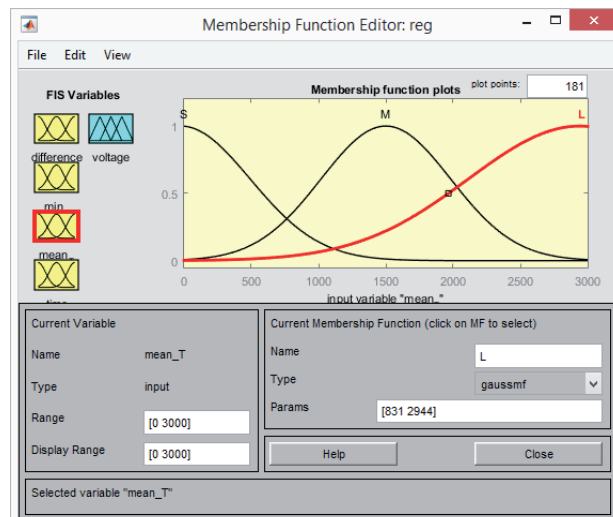


Рис. 8. Структура нечіткої змінної «mean»

Таблиця 1

Параметри нормального розподілу нечітких змінних

Змінна \ Значення	S		M		L	
	Математичне сподівання	Дисперсія	Математичне сподівання	Дисперсія	Математичне сподівання	Дисперсія
Difference	0	219,1	574,4	95,2	1000	257,3
Min	0	530,8	1250	530,8	2500	530,8
Mean	0	515,2	1500	482	2944	831

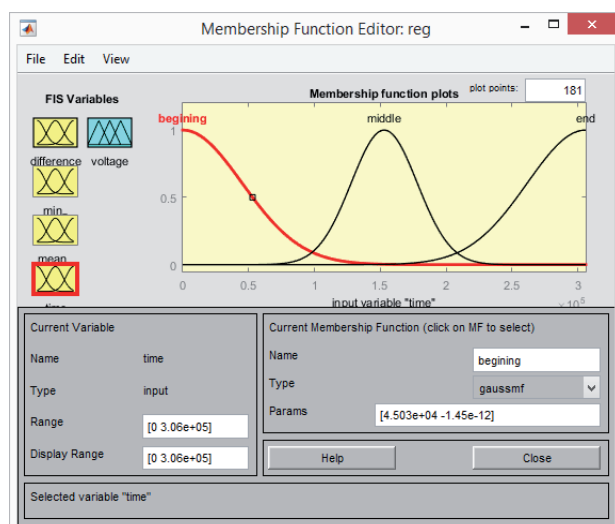


Рис. 9. Структура нечіткої вхідної змінної «time»

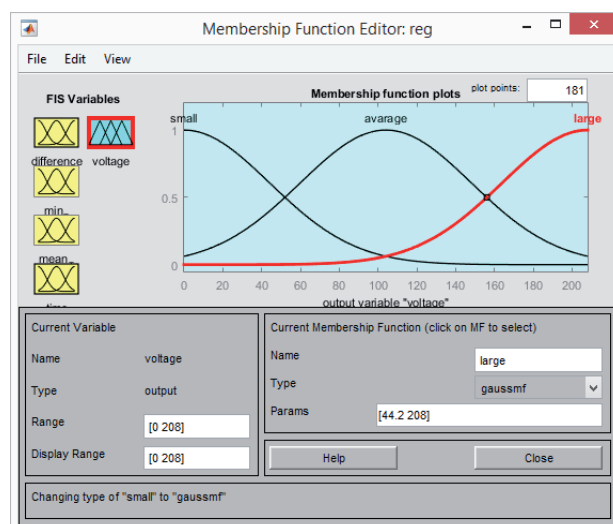


Рис. 10. Структура нечіткої вихідної змінної «voltage»

6.2. Система керування стадією графітування. Процес графітування вуглецевих виробів починається при температурі понад 2000 °С [1, 3] і має тривати до досягнення заданого ступеня графітування. При цьому з метою мінімізації енерговитрат важливим є своєчасне відключення печі графітування від електроживлення, бо процес графітування продовжується і після цього до моменту зниження температури до 2000 °С.

Залежність ступеня графітування від часу при веденні процесу в ізотермічному режимі описується формулою [11, 13]:

$$\beta = 1 - e^{-B(T_g)\tau}, \quad (1)$$

де β – ступінь графітування ($\beta = 1$ – відповідає цілковитому графітуванню); τ – час графітування, год; T_g – температура ізотермічного графітування в характеристичній точці, К; B – стала швидкості графітування, 1/год, яка залежить від температури та структури матеріалу, що графітується.

З формули (1) випливає, що час графітування залежить від його температури.

У праці [11] запропонований алгоритм керування стадією графітування, що передбачає розбиття всього процесу на часові інтервали, на кожному з яких визначається ступінь графітування, досягнута на даному інтервалі. При цьому вважається, що на кожному часовому інтервалі ступінь графітування змінюється за лінійним законом. Загальний ступінь графітування розраховується як сума інтервальних. Момент припинення електроживлення печі визначається завдяки прогнозуванню ступеня графітування з використанням математичної моделі процесу.

7. SWOT-аналіз результатів дослідження

У даній статті розв'язана задача побудови системи керування процесу графітування вуглецевих виробів, яка відрізняється від відомих систем керування врахуванням поточного стану об'єкта керування, що впливає на ефективність.

Розроблена система керування має бути перевірена на ефективність. Провести таке дослідження на діючому технологічному обладнанні практично неможливо, зважаючи на можливі економічні втрати виробництва, ймовірність створення аварійної ситуації тощо. Тому перевірка ефективності запропонованої системи керування та її коригування за отриманими результатами є завданням подальших досліджень.

8. Висновки

1. Проведений аналіз існуючих систем керування процесом графітування вуглецевих виробів показав, що дані системи є системами програмного керування, які не враховують поточний стан об'єкта керування, що позначається на їх ефективності.

2. Запропонована нова система керування, яка передбачає керування піччю графітування у двох режимах її роботи — розігрівання та безпосередньо графітування. Представлена структура системи керування у режимі розігрівання, що базується на використанні нечіткого регулятора, входи якого розраховуються за спрощеною моделлю процесу графітування. Описаний алгоритм керування у режимі графітування, який з метою завчасного визначення моменту відключення електроживлення печі використовує прогнозування ступеня графітування вуглецевих виробів.

Література

1. Знамеровский, В. Ю. Исследование режимов ввода энергии в печи графитации [Текст] / В. Ю. Знамеровский, В. В. Яшкина // Промышленная энергетика. — 1985. — № 11. — С. 40–42.
2. Ярымбаш, Д. С. Анализ электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах Ачесона [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Энергобережения. Энергетика. Энергоаудит. — 2014. — № 6. — С. 11–21.
3. Кузнецов, Д. М. Процесс графитации углеродных материалов. Современные методы исследования [Текст] / Д. М. Кузнецов, В. П. Фокин. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. — 132 с.
4. Кузнецов, Д. М. Графитация крупногабаритных электродов. Процесс Ачесона [Текст] / Д. М. Кузнецов. — Ростов н/Д: РГАСХМ ГОУ, 2003. — 168 с.
5. Соседов, В. П. Графитация углеродистых материалов [Текст] / В. П. Соседов, Е. Ф. Чалых. — М.: Металлургия, 1987. — 176 с.

6. Чичулин, Н. И. О режимах графитации электродных изделий [Текст]: сб. научн. тр. / Н. И. Чичулин, Б. И. Давыдович // Совершенствование технологии и улучшение качества электродной продукции. — 1973. — Вып. 5. — С. 114–121.
7. Самохин, И. Н. Опыт эксплуатации печей с принудительным охлаждением стен и подины при повышенной плотности тока в керне для производства конструкционного графита [Текст]: сб. научн. тр. / И. Н. Самохин, И. М. Розенман, В. Б. Сасс-Тисовский // Вопросы графитации углеродистых материалов. — 1968. — Ч. 1. — С. 70–78.
8. Соседов, В. П. О рациональном графике подъема мощности и температуры в процессе графитации [Текст] / В. П. Соседов, В. Б. Сасс-Тисовский, А. С. Карманов // Цветные металлы. — 1967. — № 2. — С. 62–63.
9. Знамеровский, В. Ю. Исследование режимов ввода энергии в печи графитации [Текст] / В. Ю. Знамеровский, В. В. Яшкина // Промышленная энергетика. — 1985. — № 11. — С. 40–42.
10. Способ контроля теплового режима процесса графитации [Текст]: а. с. 1089048 СССР, МКИЗ С01В 31/04, G05D 27/00 / Глушко И. Н. — № 3433981/23-26; заявл. 01.03.1982; опубл. 30.04.1984, Бюл. № 16. — 2 с.
11. Коржик, М. В. Математичне моделювання та автоматизоване керування процесом графітації в печах Ачесона [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07 [Текст] / М. В. Коржик; НТУУ «КПІ». — Київ, 2010. — 230 с.
12. Scheel, H. J. Crystal Growth Technology [Text] / by eds.: H. J. Scheel, T. Fukuda. — John Wiley & Sons, Ltd., 2003. — 668 p. doi:10.1002/0470871687
13. Шулепов, С. В. Физика углеграфитовых материалов [Текст] / С. В. Шулепов. — М.: Металлургия, 1972. — 256 с.
14. Санников, А. К. Производство электродной продукции [Текст] / А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др. — М.: Металлургия, 1985. — 129 с.
15. Ахметшин, Н. Ф. Влияние свойств междуэлектродной перемычки на электрические, тепловые показатели и качество электродов [Текст]: сб. научн. тр. / Н. Ф. Ахметшин, М. Н. Доржиев, Е. Н. Шабуров и др. // Вопросы технического прогресса в электродной промышленности. — 1971. — Вып. 3. — С. 205–213.
16. Passino, K. Fuzzy Control [Text] / K. Passino, S. Yurkovich // The Control Systems Handbook, Second Edition. — Informa UK Limited, 2010. — P. 55-1–55-27. doi:10.1201/b10384-64
17. Егунов, Н. Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления [Текст]: учебник / под ред. Н. Д. Егунова. — 2-ое изд., стереот. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 744 с.
18. Коржик, М. В. Модель температурного поля печи графитации [Текст] / М. В. Коржик, С. В. Кутузов // Наукові вісті НТУУ «КПІ». — 2007. — № 1. — С. 17–23.
19. Панов, Е. Н. Интенсификация процесса графитации электродных изделий в печах Ачесона постоянного тока [Текст]: доклады / Е. Н. Панов, М. В. Коржик, А. Я. Карвацкий // XIII международная конференция «Алюминий Сибири-2007», 11–13 сентября 2007. — Красноярск: Версо, 2007. — С. 331–337.
20. Жученко, О. А. Розробка спрощеної математичної моделі процесу формування вуглецевих виробів [Текст] / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // Технологічний аудит та резерви виробництва. — 2016. — № 5/3 (31). — С. 16–22. doi:10.15587/2312-8372.2016.81218
21. Gilat, A. MATLAB: An Introduction with Applications [Text] / A. Gilat. — Ed. 5. — John Wiley & Sons, Ltd., 2014. — 416 p.

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ГРАФИТАЦИИ УГЛЕРОДНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Предложена система управления, которая предусматривает управление печью графитации в двух режимах ее работы — разогрева и непосредственно графитации. Представлена структура системы управления в режиме разогрева, основанная на использовании нечеткого регулятора, входы которого рассчитываются по упрощенной модели процесса графитации.

Описан алгоритм управления в режиме графитации, который с целью заблаговременного определения момента отключения электропитания печи использует прогнозирование степени графитации углеродных изделий.

Ключевые слова: углеродные изделия, графитация, система управления, нечеткий регулятор.

Жученко Олексій Анатолійович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, e-mail: azhuch@ukr.net.
Бевзюк Леонід Леонідович, кафедра автоматизації хімічних виробництв, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Жученко Алексей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, кафедра автоматизации химических производств, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Бевзюк Леонид Леонидович, кафедра автоматизации химических производств, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Zhuchenko Oleksiï, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: azhuch@ukr.net.

Bevziuk Leonid, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine

УДК 691:517

DOI: 10.15587/2312-8372.2016.83814

**Саньков П. Н.,
Макарова В. Н.,
Ткач Н. А.,
Гваджаиа Б. Д.**

АНАЛИЗ ШУМОЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ СОСТАВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛИСТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

В результате проведенных исследований определены основные показатели звукоизоляции ограждающих конструкций в лабораторных условиях. Результаты работы можно использовать для разработки рекомендаций по проектированию внутренних и наружных стен для офисных помещений с целью обеспечения необходимой звукоизоляции для достижения нормативных уровней звука на рабочих местах промышленных предприятий, в офисах и жилых помещениях.

Ключевые слова: звукоизоляция, листовые материалы, рабочие места, жилые помещения, реверберационная камера, шумомер.

1. Введение

Наш век стал самым шумным. Трудно сейчас назвать места отдыха, производства и быта, где в звуковом спектре не присутствовал бы шум, то есть раздражающая смесь звуков, которая нам мешает качественно отдыхать, с максимальной отдачей работать и спокойно чувствовать себя в бытовых условиях. Звуки и шумы большой мощности поражают слуховой аппарат, нервные центры, могут вызвать болевые ощущения и шок [1–4].

Современные ученые и инженеры строительной отрасли уделяют много внимания одному из архитектурно-строительных средств борьбы с шумом — окнам, или как по-другому их называют — светопрозрачным фасадным конструкциям (СФК) [5, 6].

К современным СФК существует широкий спектр требований:

- 1) качественная прозрачность;
- 2) гигиеничность;
- 3) высокая теплоизоляционная эффективность;
- 4) высокая звукоизоляционная эффективность и ряд

чисто практических свойств при монтаже и при эксплуатации.

Результаты, представленные в данной работе, будут иметь большое практическое и познавательное значение для широкой аудитории: от инженера, изобретателя, ученого, до рядового гражданина, как базовый материал для более детального исследования акустических свойств

современных СФК, стеклопакеты которых технологически выполняются с листового материала — стекла.

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объектом данного исследования являются звукоизоляционные свойства составных конструкций из листовых материалов. В рамках практических задач, связанных с решением одной из важнейших задач строительной отрасли, — обеспечением безопасных условий труда на рабочих местах, — в помещениях офисных зданий и в жилых домах, проведены научно-практические исследования звукоизоляционных свойств конструкций из современных листовых материалов в действующей реверберационной камере в Государственном высшем учебном заведении «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры (ГВУЗ «ПГАСА», г. Днепр, Украина).

В основу рабочей гипотезы исследования положен тот факт, что при теоретических расчетах звукоизоляции двойной конструкции из листового материала особое значение имеет минимальный промежуток между слоями.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования — определение фактической звукоизоляции, то есть акустических свойств современных листовых материалов в лабораторных условиях для раз-