

АНОТАЦІЯ

Хібеба М. Г. Автоматизація процесу керування формуванням вуглецевих виробів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 “Автоматизація процесів керування” - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2020.

У сучасній промисловості виробництво вуглецевих виробів є важливим процесом, оскільки продукція даного виробництва широко використовується в різноманітних галузях промисловості, які нерозривно пов’язані з необхідністю використання електротермічних процесів. Зокрема, до таких виробництв відносяться підприємства чорної та кольорової металургії, машинобудування, хімічної промисловості та інші.

Виробництво вуглеграфітової продукції складається з ряду технологічних процесів та операцій і характеризується значною ресурсо- та енергоємністю. Окрім того, існує тенденція до постійного зростання вимог щодо якісних показників продукції та об’ємів виробництв, тому актуальною є задача підвищення ефективності даного виробництва шляхом впровадження оптимальних режимів роботи на ключових етапах виробництва.

В даній роботі був проведений аналіз технологічних особливостей процесу виробництва вуглецевих виробів, а також вимог до сировини, необхідної для виробництва та якісних показників кінцевої продукції. На основі аналізу отримано, що одним із визначальних технологічних процесів у виробництві виробів є процес формування вуглецевих виробів. Проаналізовано технологічні та конструкційні особливості даного процесу, виділено два основні етапи (підготовка та пресування).

На основі проведеного аналізу встановлено ключову роль етапу пресування процесу формування як основної стадії з точки зору параметрів якості готової продукції і потенціалу для підвищення ефективності ресурсо- та енергозбереження процесу виробництва вуглеграфітових виробів в цілому.

Підвищення ефективності даного процесу можливе лише при впровадженні нових, оптимальних технологічних режимів для забезпечення заданих якісних та техніко-економічних показників продукції. Дані показники в значній мірі залежать від температурних та швидкісних режимів пресування, а процеси завантаження електродної маси достатньо автоматизовані та мають низький вплив на якісні показники продукції. Тому доцільно в дослідженні приділити увагу саме тій частині пресового апарату, в якій забезпечуються температурні та швидкісні режими пресування, тобто мундштуку.

Для реалізації оптимальних режимів необхідно синтезувати ефективну систему керування процесом формування вуглецевих виробів, яка б враховувала технологічні вимоги до якості готової продукції, конструкційні особливості гідравлічного пресу з мундштуком та сучасні вимоги до ресурсо- та енергозбереження.

Обґрунтовано застосування методу математичного моделювання як фактично безальтернативного методу дослідження процесу формування вуглецевих виробів та сформульовані задачі даного дослідження.

У результаті проведеного аналізу відомих на сьогоднішній день математичних моделей процесу формування та аналогічних йому процесів екструзії в'язко-пластичних матеріалів визначена модель, на основі якої ґрунтується подальше дослідження режимів підготовки та пресування.

Розглянуто відповідну фізичну модель мундштука гідравлічного пресу, а для математичного моделювання формування вуглецевих виробів в середовищі ANSYS реалізована математична модель в розподілених параметрах на основі системи рівнянь, яка включає нестационарні, нелінійні рівняння неперервності, руху та енергії для ламінарного потоку нестискуваної рідини Bingham-Papanastasiou для пресмаси і рівняння енергії з внутрішнім джерелом тепла для елементів пресового інструмента.

Сформовано задачі дослідження впливу основних технологічних параметрів процесу формування вуглецевих виробів на фізичні поля робочого простору та корпусу мундштука гідравлічного пресу. Розроблено методикку та порядок

проведення досліджень. Основну увагу при дослідженнях процесу формування вуглецевих виробів приділяється визначенню: розподілу температур по об'єму робочого простору та корпусу мундштука; впливу на температурні поля таких технологічних параметрів, як потужність струму, що подається на індуктори формувальної та калібрувальної зони мундштука, потужність струму на свічки для додаткового нагрівання та швидкість пресування; зміни температурних полів в залежності від початкової температури завантаженої електродної маси; динаміки температури в контрольних точках при різних технологічних режимах; впливу роботи нагрівачів на температури в різних зонах мундштука; порівнянню динаміки температур в залежності від етапу процесу (етап підготовки та пресування).

В результаті досліджень, проведених за допомогою розробленої моделі, виявлено залежність температури в кожній зоні мундштука від зміни технологічних параметрів процесу, встановлено наявність значної інерційності деяких впливів. Визначено, що температура завантаженої маси має досить значний вплив на розподіл температур в усьому об'ємі робочого простору мундштука збільшення швидкості пресування негативно впливає на середню температуру електродної маси та збільшує градієнт температур від центральної частини робочого простору мундштука до його меж. Динаміка температури також сильно залежить від етапу технологічного процесу. Отримані результати дають можливість врахувати ці обставини при побудові системи керування процесом формування вуглецевих виробів.

Показано, що час розрахунку моделі об'єкту на сучасному стаціонарному комп'ютері складає декілька годин. Така тривалість розрахунку, суттєво ускладнює безпосередньо дослідження процесу формування вуглецевих виробів і робить неможливим використання такої моделі у системах керування реального часу. Саме тому нагальною була визнана задача спрощення початкової складної моделі.

Проведено аналіз методів спрощення математичних моделей, наведено переваги та недоліки їх застосування. На основі аналізу прийнято рішення використовувати метод розділення змінних Фур'є для побудови спрощеної

математичної моделі процесу формування вуглецевих виробів. Розроблені спрощені математичні моделі для етапу підготовки та пресування.

Визначені оптимальні структури спрощених моделей та проведена їх параметрична ідентифікація. Проведене дослідження відповідності результатів розрахунків за спрощеною математичною моделлю результатам, отриманим з початкової складної моделі продемонструвало високу ефективність запропонованих спрощених моделей. Для перевірки адекватності моделі були використані критерії Стюдента та Фішера. В результаті розрахунку даних критеріїв в усіх контрольних точках було зроблено висновок, що немає підстав, щоб відкидати гіпотезу про рівність математичних сподівань та дисперсій, а, отже, й гіпотезу про адекватність синтезованих моделей.

Проведений аналіз переваг та недоліків існуючих систем керування засвідчив їх неефективність як наслідок того, що жодна з них не враховує техніко-економічні показники процесу.

На основі проведеного аналізу техніко-економічних показників, що можуть бути використані як критерії оптимальності у системі керування процесом формування вуглецевих виробів, обґрунтовано вибір найбільш доцільного показника - питомої собівартості експлуатаційних витрат.

Сформульовано у математичному вигляді задачу керування даним процесом, яка включає у себе критерій оптимальності та обмеження, що накладаються на технологічні змінні процесу з урахуванням вимог до якості продукції, що виробляється. Запропоновано критерій для розрахунку якісних показників процесу формування вуглецевих виробів. Використання розробленого критерію дало можливість сформулювати загальну постановку задачі керування, розв'язання якої надає можливість мінімізувати питому собівартість продукції з дотриманням потрібних якісних показників готової продукції.

Обґрунтовано використання системи керування з використанням прогнозуючої моделі (Model predictive control, MPC) для розв'язку поставленої задачі. Проведено пошук оптимальних налаштувань MPC-регулятора. При моделюванні синтезованої з оптимальними параметрами системи керування отримано питому собівартість

продукції 5.77 грн/кг. Також виявлено зростання продуктивності процесу на 6% в порівнянні з продуктивністю пресу, що працює за діючим технологічним регламентом.

Для дослідження ефективності розробленої системи виконано порівняльний аналіз запропонованої системи керування та використання системи на основі ПІД-регуляторів,. Обґрунтовано трьохконтурну схему системи керування, проведено налаштування регуляторів за інтегральним квадратичним критерієм по відхиленню від завдання за допомогою методу Пауела. В результаті порівняльного дослідження виявлено, що питома вартість продукції для системи з ПІД-регуляторами складає 6.28 грн/кг, що на 0.51 більше, ніж в системи з МРС-регулятором, а, отже, використання системи з МРС-регулятором для керування процесом формування вуглецевих виробів є більш ефективним в порівнянні з класичними системами керування.

Ефективність усіх розроблених систем керування підтверджена результатами проведених імітаційних моделювань.

Ключові слова: формування вуглецевих виробів, гідравлічний прес, пресування через мундштук, математичне моделювання, спрощена математична модель, метод Фур'є, критерій керування, оптимальне керування, система керування з прогнозуючою моделлю, ефективність системи керування.

ABSTRACT

Khibeba MG Automation of the process of controlling the formation of carbon products. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining a Ph.D. scientific degree in specialty 151 "Automation of control processes" - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" MES of Ukraine, Kyiv, 2020.

In modern industry, the production of carbon products is an important process, because the products of this production are widely used in various industries, which are inextricably linked with the need to use electrothermal processes. In particular, such

industries include ferrous and nonferrous metallurgy, mechanical engineering, chemical industry and others.

The carbon graphite products production consists of a number of technological processes and operations and characterized by significant resource and energy consumption. In addition, there is a tendency to constantly increase the requirements for quality indicators of production and production volumes, so the urgent task is to increase the efficiency of this production by introducing optimal operation modes at key production stages.

This research analyzes the technological features of the carbon products production process, as well as the requirements for raw materials needed for production and quality indicators of the final product. Based on the analysis, it is obtained that one of the defining technological processes in this production is forming carbon products process. Technological and design features of this process were analyzed, two main stages (preparation and pressing) are allocated.

Based on the analysis, the key role of the molding process pressing stage as the main stage in terms of finished products quality parameters and the potential for resource efficiency and energy conservation of the carbon graphite products production in general was found.

Improving the efficiency of this process is possible only with the introduction of new, optimal technological regimes to ensure the specified quality and technical, economic products performance. These indicators largely depend on the temperature and speed of pressing, also electrode mass loading processes are quite automated and have a low impact on product quality. Therefore, it is advisable in the study to pay attention to the part of the press apparatus in which the pressing temperature and speed are provides, ie the mouthpiece.

To implement optimal modes, it is necessary to synthesize an effective control system for the carbon products formation, which would take into account the technological requirements for the finished products quality, design features of a hydraulic press with a mouthpiece and modern requirements for resource and energy saving.

The application of the mathematical modeling method as a virtually no alternative method of the carbon products formation process research was substantiated and the tasks of this research were formulated.

As a result of the existed formation process and similar viscoplastic materials extrusion processes mathematical models analysis, a model was determined, on the basis of which further research of preparation and pressing modes is based.

The corresponding hydraulic press mouthpiece physical model is considered, and for mathematical modeling of carbon products formation, in the ANSYS environment the mathematical model in the distributed parameters, based on the system of equations which includes nonstationary, nonlinear equations of continuity, motion and energy for a laminar flow and the energy equation with the internal heat source for the elements of the press tool was implemented.

The research tasks of the carbon products formation process basic technological parameters influence on hydraulic press working space and the case of a mouthpiece physical fields were formed. The methodology and procedure for conducting research have been developed. The main attention in the study of the forming carbon products process is paid to determining: the distribution of temperatures in the volume of the working space and the body of the mouthpiece; influence on temperature fields of such technological parameters as current power supplied to inductors of the forming and calibration zone of the mouthpiece, current power on spark plugs for additional heating and pressing speed; changes in temperature fields depending on the initial temperature of the loaded electrode mass; dynamics of temperature in control points at various technological modes; the influence of heaters on the temperature in different areas of the mouthpiece; comparison of temperature dynamics depending on the stage of the process (stage of preparation and pressing).

As a result of the researches carried out by means of the developed model, dependence of temperature in each zone of a mouthpiece on change of technological parameters of process is revealed, existence of considerable inertia of some influences was established.

It is determined that the temperature of the loaded mass has a significant effect on the temperature distribution in the entire working space of the mouthpiece. The dynamics of temperature also strongly depends on the stage of the technological process. The obtained results make it possible to take into account these circumstances when building a control system for the process of forming carbon products.

It is shown that the calculation of the object model on a modern desktop computer takes several hours. This duration of the calculation significantly complicates the direct study of the forming carbon products process and makes it impossible to use such a model in real-time control systems. That is why the task of simplifying the initial complex model was considered urgent.

The analysis of mathematical models simplification methods was carried out, the advantages and disadvantages of their application are resulted. Based on the analysis, it was decided to use the method of separation of Fourier variables to build a simplified mathematical model of the forming carbon products process. Simplified mathematical models for the stage of preparation and pressing have been developed.

The optimal structures of simplified models are determined and their parametric identification was carried out. The study of the calculations on the simplified mathematical model results to the results obtained from the initial complex model correspondence demonstrated the high efficiency of the proposed simplified models. Student's and Fisher's criteria were used to test the model adequacy. As a result of calculating these criteria at all control points, it was concluded that there is no reason to reject the hypothesis of mathematical expectations and variances equality, and, consequently, the hypothesis of the synthesized models adequacy.

The analysis of the advantages and disadvantages of existing control systems showed their inefficiency as a consequence of the fact that none of them takes into account the technical-economic indicators of the process.

Based on the analysis of technical-economic indicators that can be used as criteria for forming carbon products process control system optimality, the most appropriate indicator - the unit cost of operating costs, was chosen.

The problem of this process control is formulated in mathematical form, which includes the optimality criterion and limitations imposed on the technological variables of the process, taking into account the requirements for the products quality. The criterion for calculation of qualitative indicators carbon products formation process was offered. The use of the developed criterion made it possible to formulate a general statement of the control problem, the solution of which provides an opportunity to minimize the specific production cost in compliance with the required finished products quality indicators.

The use of a control system with predictive model (MPC) to solve the problem was justified. The search for the optimal settings of the MPC controller was performed. When the synthesized control system with optimal parameters was modeled, the specific cost of production was 5.77 UAH / kg. The productivity of the process was also increased by 6% in comparison with the productivity of the press operating according to the current technological regulations.

To study the developed system effectiveness, a comparative analysis of the proposed control system and the system based on PID controllers was made. The three-circuit control system scheme was substantiated, the regulators are adjusted according to the integrated quadratic criterion for deviation from the set point using the Powell method. As a result of a comparative study, it was found that the unit cost of the system with PID-regulators is 6.28 UAH / kg, which is 0.51 more than in systems with MPC-regulator, and, consequently, the use of the system with MPC-regulator to control the carbon products formation are more efficient compared to conventional control systems.

The efficiency of all developed control systems is confirmed by the results of simulations.

Key words: formation of carbon products, hydraulic press, pressing through the mouthpiece, mathematical modeling, simplified mathematical model, Fourier method, control criterion, optimal control, control system with predictive model, control system efficiency.

Список опублікованих праць за темою дисертації

Монографії

1. Жученко О.А., Коротинський А.П., Хібеба М.Г. Математичне моделювання енергоємних технологічних процесів вуглеграфітового виробництва [текст] : монографія. –К.:КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 344 с.:іл. – 300 прим. ISBN 978-617-7503-56-8. *(проведено системний аналіз процесу формування вуглецевих виробів, розроблені спрощені математичні моделі, проведені дослідження теплових режимів основних етапів процесу методом математичного моделювання)*

Статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до Організації економічного співробітництва та розвитку

2. Zhuchenko A., Khibeba M. Carbon product formation process optimal technological mode designing / A. Zhuchenko, M. Khibeba // Slovak international scientific journal. - 2020. - Vol.1, №37. – P. 35-41.).*(розроблено техніко-економічний критерій з врахуванням якісних показників продукції)*

Статті у наукових фахових виданнях України, які входять до наукометричної бази Scopus

3. Жученко О. А. Синтез та дослідження системи керування процесом формування вуглецевих виробів / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // м. Харків, Eastern-european journal of enterprise technologies, Vol 2, No 2 (104) (2020): Information technology. Industry control systems, 2020p. *(розроблено та досліджено систему керування процесом формування вуглецевих виробів)*

Статті у наукових фахових виданнях України, які входять до міжнародних наукометричних баз даних

4. Жученко О. А. Розробка спрощеної математичної моделі процесу формування вуглецевих виробів / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // Технологічний аудит та резерви виробництва. - 2016. - № 5(3). - С. 16-22. (включено до наукометричної бази даних Index Copernicus, WorldCat).*(розроблено спрощено математичну модель процесу формування)*

5. Жученко О. А. Дослідження температурних полів в процесі формування вуглецевих виробів в режимі пресування / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // Міжнародний науково-виробничий журнал «Автоматизація технологічних і бізнес-процесів». - 2019. - Vol. 11, Iss. 4. - С. 16-27. (включено до наукометричної бази даних WorldCat).*(проведене дослідження процесу формування методом математичного моделювання).*

Статті у наукових фахових виданнях України

6. Жученко О.А. Постановка задачі керування процесом формування у виробництві вуглецевих виробів / О.А. Жученко, М.Г. Хібеба // Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник "Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин". – 2017. - № 47, ч. 2. - Кропивницький: ЦНТУ. – С. 81-88. *(сформульована математична постановка задачі оптимального керування процесом формування).*

7. Жученко О.А. Модель формування вуглецевих виробів в режимах підготовки та пресування / О.А. Жученко, М.Г. Хібеба // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2018. Том 29 (68) Ч. 1 № 6. –С. 149- 156. *(розроблено спрощені математичні моделі процесу формування).*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Хібеба М. Г. Дослідження впливу швидкості пресування на температурне поле мундштука гідравлічного прессу / Жученко А. І., Хібеба М. Г. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей XI-ї науково-практичної конференції студентів. Київ, 06–07 грудня 2017 р. [Електронний ресурс] – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 91 с. С. 75. – Режим доступу: [http://ahv.kpi.ua/conferences/ACIT2017\(winter\).pdf](http://ahv.kpi.ua/conferences/ACIT2017(winter).pdf)

9. Хібеба М. Г. Спрощення моделі формування вуглецевих виробів у режимі підготовки / Жученко А. І., Хібеба М. Г. // Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Тези доповідей XIII-ї науково-практичної конференції студентів. Київ, 04–05 грудня 2019 р. [Електронний ресурс] – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 84 с. С. 75. – Режим доступу: <http://ahv.kpi.ua/wp->

content/uploads/2019/12/XIII-n-p-konferentsiya-stud-AHV_TEZY-dopovidej-z-PALITURKAMY-4-5-grud-2019-s-1-84.pdf

10. Хібеба М. Г. Постановка задачі оптимального керування процесом формування вуглецевих виробів / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // Science, society, education: topical issues and development prospects. Abstracts of the 1st International scientific and practical conference. SPC “Sci-conf.com.ua”. Kharkiv, Ukraine. 2019. Pp. 207-210. URL: <http://sci-conf.com.ua>.

11. Хібеба М. Г. Дослідження впливу швидкості пресування на температурне поле мундштука гідравлічного прессу / О. А. Жученко, М. Г. Хібеба // Комп'ютерні науки, інформаційні технології та системи управління [Текст]: Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених. Івано-Франківськ, 27–29 грудня 2019 р. [Електронний ресурс] – Івано-Франківськ: Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2019. – 153 с. С. 129-131.

– Режим доступу: https://drive.google.com/file/d/1y98z4d_gJMT3Yyh3YryJacetanpdUFXi/view