

АНОТАЦІЯ

Митрофанов О.В. Автоматизація процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині на основі методології нечіткої логіки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології». – Криворізький національний університет МОН України, Кривий Ріг, 2021.

Представлена робота присвячена вирішенню наукової задачі розроблення й дослідження на математичних моделях та у виробничому процесі системи автоматизованого керування режимними характеристиками процесу термічного оброблення залізородних окатишів на випалювальних машинах конвеєрного типу для підвищення його ефективності.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого керування термічним обробленням залізородних окатишів у взаємопов'язаних технологічних зонах випалювальної машини конвеєрного типу.

Для забезпечення підвищення товарної якості готових окатишів в умовах змін стану та параметрів технологічних зон випалювальної машини предметом дослідження визначено закони, моделі і методи керування процесами, які виникають при термічному обробленні окатишів.

При виконанні досліджень враховувались неповні й нечіткі характеристики технологічних зон, розподіл теплоносіїв газоповітряних потоків, фізико-хімічні властивості окатишів, параметри агрегатів машини тощо. При обмежених параметрах технологічного процесу розроблений комплекс науково-технічних рішень, який дозволяє забезпечити зниження витрат енергоносіїв, покращити якість і збільшити обсяг виготовлення придатних окатишів.

У *першому розділі* на основі огляду літературних та патентно-ліцензійних джерел проаналізовано процес оброблення окатишів на машині конвеєрного типу та стан автоматизації цього процесу, визначені невирішені питання в цій сфері.

Проаналізовано склад і зміст вимог до управління процесом термічного оброблення залізорудних окатишів на машинах конвеєрного типу та визначено фактори, які ускладнюють їх виконання на практиці. Виявлено параметри технологічного процесу, які впливають на регламентовані властивості придатних окатишів.

Розглянуто особливості та проблеми керування термічним процесом оброблення окатишів на машині конвеєрного типу. Встановлено, що існуючі теплові схеми випалювальних машин потребують цілеспрямованої подачі потоків теплоносіїв із необхідними параметрами в технологічні зони для забезпечення їхніх регламентованих характеристик. Відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень не завжди якісно та повно описують процес оброблення окатишів з урахуванням впливу параметрів сусідніх технологічних зон. Найбільш критичним щодо формування регульованих величин процесу керування термічним обробленням окатишів є неможливість чіткого і повного визначення параметрів технологічних зон з урахуванням впливу однієї з них на іншу. Вказані особливості суттєво впливають на перехідні режими, які виникають у технологічних зонах.

У *другому розділі* викладено методологічні та теоретичні положення процесу керування термічним обробленням окатишів у технологічних зонах випалювальних машини конвеєрного типу із застосуванням нечіткої логіки в умовах неконкретної та неповної інформації про її стан.

Виконано аналіз розподілу потоків теплоносіїв по технологічним зонам машини над шаром окатишів і на виході з нього при різних швидкостях переміщення візків конвеєрної стрічки. Представлені результати досліджень показали, що температура потоку теплоносія на виході високотемпературної зони машини визначається інтерпретацією формули Дарсі-Вейсбаха. Виявлено і формалізовано закономірності обпалення залізорудних окатишів у машинах конвеєрного типу, використання яких надає змогу підвищити ефективність керування цим процесом. Запропоновано вдосконалити математичні моделі керування процесами у технологічних зонах за рахунок введення до їхньої

структури регуляторів із нечіткою логікою Fuzzy Logic Controller, як головних регулюючих пристроїв. Це дозволило забезпечити регламентовані значення температури теплоносіїв газоповітряних потоків по зонах машини. При проведенні досліджень використано програмні математичні пакети Matlab/Simulink і Fuzzy Logic Toolbox. Виконано моделювання систем автоматизованого керування у Control System Toolbox. Запропоновані моделі враховують послідовно взаємопов'язані між собою технологічні зони і зворотні зв'язки між ними.

Встановлено закономірності для автоматизованого керування процесами обпалення окатишів на основі ідентифікації точок зміни температури газоповітряних потоків при визначенні параметрів об'єкта керування. Виявлено, що збільшення різниці температури теплоносія газоповітряного потоку до входу в шар окатишів і після нього відповідає більшій температурі теплоносія газоповітряних потоків. Зменшення температури теплоносія газоповітряних потоків на виході із високотемпературної зони відповідає експоненціальну закону. Встановлено, що швидкість переміщення візків конвеєрної стрічки впливає на температуру теплоносіїв газоповітряних потоків, що подаються і відходять із технологічних зон машини.

У *третьому розділі* на підставі проведеного аналізу термічного оброблення окатишів у технологічних зонах визначено вплив на їхню обробку параметрів сусідніх технологічних зон, потоків і температури теплоносіїв, що розподіляються по шару окатишів на візках конвеєрної стрічки. Для дослідження процесу обробки окатишів запропоновано комплексну математичну модель. Вона представлена блочно-послідовною структурою, що складається з окремих математичних моделей технологічних зон машини. Головною ідеєю комплексної математичної моделі є те, що вхідні нечіткі параметри технологічної зони є вихідними параметрами з попередніх зон і навпаки, вихідні параметри однієї зони є вхідними параметрами наступної зони. Розроблено теоретичні засади управління процесом обпалення залізородних окатишів на основі методології нечіткої логіки і практичні заходи щодо їх реалізації. Запропоновано використання в моделях керування регуляторів із нечіткою логікою Fuzzy Logic Controller. Це дає змогу підвищити

ефективність технологічного процесу, покращити енергетичні показники при термічному процесі оброблення окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу і виконати раціональний перерозподіл потоків теплоносіїв уздовж технологічних зон. При зниженні температур теплоносіїв газоповітряних потоків на виході із цих зон виникає необхідність управляти димотягами, змінюючи параметри потоків для низькотемпературних зон з метою стабілізації термічних процесів.

Виконано аналіз впливу параметрів потоків теплоносіїв на якість перехідних процесів у замкненій системі. Результати досліджень на запропонованих математичних моделях показали, що зміни нечітких технологічних параметрів взаємопов'язаних технологічних зон призводять до нерегламентних значень температури верхнього шару окатишів і нераціонального використання енергоносіїв.

На основі результатів досліджень перехідних процесів, отриманих на моделях і експериментальних даних виробничого процесу, виконано порівняльний аналіз енергетичних показників витрат газу і продуктивності димотягу. Внаслідок досліджень на моделі встановлено, що характеристика продуктивності димотягу змінюється ступінчасто в кожній технологічній зоні. У порівнянні з характеристикою, отриманою за експериментальними даними діючої випалювальної машини, вдалося підвищити ефективність роботи димотягу, що призводить до зниження енерговитрат на 5,78 % і природного палива на 1,1 м³ на тонну окатишів при підтриманні необхідного температурного режиму. Ці результати підтверджують енергетичну ефективність розробленої системи. Виконано аналіз отриманих даних на розроблених математичних моделях і експериментальних даних випалювальної машини типу LURG-278A на ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат», який показав за критерієм Фішера, що вони є адекватними.

Четвертий розділ присвячено практичній реалізації та експериментальним дослідженням запропонованої схеми автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу на основі

нечіткої і неповної логіки при неповних і нечітких параметрах технологічних зон. Розроблено функціональну і структурну схеми автоматизованої системи оптимального керування термічним процесом оброблення залізородних окатишів. Представлені схеми складаються з комплексу технічних засобів: датчиків висоти, маси, температури теплоносіїв газоповітряних потоків та інших вимірювальних перетворювачів, контролерів нечіткої логіки для кожної технологічної зони, центрального контролера, який з'єднується з персональною електронно-обчислювальною машиною і промисловим ноутбуком, що виконує функції програматора, регулюючих органів, перетворювачів частоти. Запропоновано встановлювати датчики обліку електроенергії, яка використовується вентиляторами та димотягами для транспортування потоків теплоносіїв і візків конвеєрної стрічки, та датчик витрати природнього газу для контролю температурного режиму у високотемпературних зонах машини. Розроблена схема автоматизації дозволяє раціонально використовувати енергетичні ресурси за рахунок регулювання швидкості подачі теплоносія газоповітряного потоку і забезпечити рівномірність температурних полів в технологічних зонах машини.

Представлено алгоритм керування процесом термічної обробки окатишів на конвеєрній машині, що базується на використанні нечітких контролерів, які управляють потоками теплоносіїв при регулюванні температурних режимів технологічних зон. Розроблені алгоритми керування і програмно-апаратне забезпечення запропоновано для використання у виробничих умовах.

В програмному середовищі LabVIEW розроблено віртуальну модель для дослідження процесу керування термічним обробленням окатишів на випалювальних машинах конвеєрного типу. Це дозволило спроектувати металургійний комплекс на базі сучасного алгоритму обробки інформації з використанням контролерів із нечіткою логікою. Отримані результати моделювання показали, що за рахунок оптимізації середньої швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки та досягнення близького до максимуму значення висоти шару окатишів можливе зниження використання електроенергії на 3,5 кВт·год/т.

Результати експериментальних досліджень, методологія застосування віртуальних пристроїв і рекомендації щодо їх використання на залізорудних комбінатах України упроваджено на виробництві, зокрема на фабриці огрудкування ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» у проектах, в яких використовується комплексна математична модель, що апроксимує динаміку термічного процесу оброблення окатишів у технологічних зонах випалювальної машини на основі вирішення систем нечітких логічних рівнянь та її параметричної ідентифікації (акт про використання результатів дисертаційної роботи від 10 жовтня 2019 року).

Аналіз результатів упровадження показав, що зменшення питомої витрати палива для підтримання режимних параметрів високотемпературних зон випалювальних машини конвеєрного типу можливе за умови дотримання визначених значень висоти окатишів, вмісту вологи в окатишах та середньої швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки.

Ключові слова: випалювальна машина конвеєрного типу, залізорудні окатиші, термічний процес, керування, комплексна модель, нечітка логіка.

ABSTRACT

Mytrofanov O.V. Automation of controlling thermal pellet treatment by using a fuzzy logic-based conveyor machine. – Qualifying research work (manuscript).

Thesis for a Doctor of Philosophy degree (Speciality 151 «Automation and Computer-Integrated Technologies»). – Kryvyi Rih National University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kryvyi Rih, 2021.

The presented research deals with solving the scientific problem of developing and studying the automated control system for mode characteristics of thermal treatment of iron ore pellets using conveyor-type kilns to improve efficiency of the process.

The process of automated control over thermal treatment of iron ore pellets in

interrelated technological areas of the conveyor-type kiln is the research object.

To provide better marketable quality of produced pellets under changeable conditions and parameters of technological areas of the kiln, regularities, models and methods of controlling processes occurring during thermal treatment of pellets make the research subject.

When conducting the research, incomplete and fuzzy characteristics of technological areas, distribution of heat-carriers of air-gas flows, physical and chemical properties of pellets, parameters of aggregates of the machine, etc. are taken into consideration. With limited parameters of the technological process, a set of engineering designs is developed to provide reduction of energy-carrier consumption, improve quality and increase output of applicable pellets.

Section 1 is based on reviewing literary and patent-licensed sources in order to analyze pellet treatment by using conveyor-type machines and automation of this process as well as detecting some issues unsolved in this field. The content of requirements to controlling thermal pellet treatment by using conveyor-type machines is analyzed and factors complicating their practical fulfillment are determined. There are specified parameters of the technological process that influence regulated properties of applicable pellets.

Specific features and problems of controlling thermal treatment of pellets by using conveyor-type machines are under consideration. It is ascertained that current thermal schemes of kilns call for heat-carrier flows with required parameters fed into technological areas to provide their regulated characteristics. The known results of theoretical and experimental investigations do not always provide qualitative and complete description of pellet treatment considering influence of parameters of adjacent technological areas. Failure to provide distinct and complete parameters of technological areas with their mutual influence is the most crucial point when forming regulated values of control over thermal pellet treatment. The peculiarities indicated influence transient modes occurring in technological areas.

Section 2 deals with methodological and theoretical principles of control over thermal pellet treatment in technological areas of fuzzy logic-based conveyor-type kilns

under ambiguous and incomplete data on the machine state.

Distribution of heat-carrier flows in technological areas of the machine over the layer of pellets and at its output with various speed of conveyor belt trolleys is analyzed. The presented research results reveal that the temperature of the heat-carrier flow at the output of the high-temperature area of the machine is determined by interpretation of the Darcy-Weisbach formula. Regularities of iron ore pellet roasting in conveyor-type machines are identified and formalized to increase efficiency of this process control. Improvement of mathematical models of controlling the process in technological areas by introducing Fuzzy Logic Controllers as their main controlling devices is suggested, this resulting in regulated values of temperature of heat-carriers in gas-air flows in machine areas. Software mathematical packages Matlab/Simulink and Fuzzy Logic Toolbox are used to conduct the research. Automated control systems are simulated in Control System Toolbox. The proposed models take account of consistently interrelated technological areas and the feedback between them.

Regularities for automated control over pellet roasting based on identifying temperature change points in gas-air flows when determining the control object's parameters are established. It is found that the increase in temperature difference of the heat-carrier of the gas-air flow at the input of the pellet layer and beyond corresponds to higher temperature of the heat-carrier of gas-air flows. The decrease in the heat-carrier's temperature in gas-air flows at the output of the high-temperature area corresponds to the exponential law. It is determined that the speed of conveyor belt trolleys affects the temperature of heat-carriers of gas-air flows supplied and departing from the technological areas of the machine.

Section 3 specifies the effect of parameters of adjacent technological areas, flows and heat-carriers' temperature distributed over the pellet layer on conveyor belt trolleys on pellet treatment. The integrated mathematical model is proposed to study the process of pellet treatment. The model is represented by a block-sequential structure consisting of separate mathematical models of technological areas of the machine. The main idea of the integrated mathematical model is that the input fuzzy parameters of the technological area are output parameters from the previous areas and vice versa, the output parameters

of one area are the input ones of the next area. Theoretical principles of controlling iron ore pellet roasting based on fuzzy logic methods and practical steps to implement them are elaborated. Fuzzy Logic Controllers are proposed for the models. This makes it possible to increase efficiency of the technological process, improve energy indices of thermal treatment of pellets in a conveyor-type roasting machine and perform efficient redistribution of heat-carrier flows along the technological areas. When reducing the temperature of heat-carriers of gas-air flows at the output of these areas, it is necessary to control fume-exhausts by changing flow parameters for low-temperature areas in order to stabilize thermal processes.

The influence of heat-carrier flows' parameters on quality of transient processes in a closed-loop system is analyzed. The research of the proposed mathematical models results in indicating some changes in fuzzy technological parameters of interrelated technological areas that lead to unregulated temperature values of the upper pellet layer and inefficiency of energy carriers' use.

The results of the research into transient processes received from models and experimental data of the production process enable a comparative analysis of energy indices of gas consumption and fume-exhaust performance. It is established that the performance characteristics of the fume-exhaust change gradually in each technological area. Compared to the characteristics obtained from experimental data of the operating roasting machine, it is possible to increase the efficiency of the fume-exhaust, this resulting in a decrease of energy consumption by 5.78% and natural fuel by 1.1m³ per t of pellets while maintaining the required temperature mode. These results confirm energy efficiency of the developed system. The data obtained from developed mathematical models and experimental data of the roasting machine of the LURG-278A type at the PJSC *Northern Mining and Beneficiation Plant* (SevGOK) are analyzed, their relevance confirmed by the Fisher criterion.

Section 4 is devoted to practical implementation of and experimental research into the proposed scheme of automation of controlling thermal treatment of pellets on a conveyor-type roasting machine based on fuzzy and incomplete logic with incomplete and fuzzy parameters of technological areas. The functional and structural schemes of the

automated system of optimal control of thermal iron ore pellet treatment are developed. The presented schemes include the following technical tools: sensors of height, mass, temperature of heat-carriers of gas-air flows and other measuring transformers, fuzzy logic controllers for each technological area, the central controller connected to a personal computer and an industrial portable computer that acts as a programming device and frequency convertors. It is suggested to install power metering sensors used for fans and fume-exhausts to transport heat-carrier flows and conveyor belt trolleys, and a natural gas flow sensor to control the temperature in high-temperature areas of the machine. The developed automation scheme allows efficient use of energy resources by regulating the supply speed of the heat-carrier of the gas-air flow and regular temperature fields in the technological areas of the machine.

The control algorithm of thermal treatment of pellets by using the conveyor machine is presented on the basis of fuzzy controllers for heat-carrier flows when regulating temperature modes of the technological areas. The developed control algorithms and software-hardware support are proposed for industrial conditions.

In the LabVIEW environment, a virtual model is developed to study control over thermal pellet treatment by using conveyor-type kilns. This enables designing a metallurgical complex based on a modern algorithm of data processing by fuzzy logic controllers. The obtained simulation results indicate that due to the optimized average speed of conveyor belt trolleys and the height of the pellets layer close to the maximum, it is possible to reduce power consumption by 3.5 kW*h/t.

The experiment results, methods of applying virtual devices and recommendations for their use at Ukraine's iron ore mining enterprises have been implemented in the industry, in particular, at the pelletizing plant of the PJSC *Northern Mining and Beneficiation Plant*. These are the projects based on the integrated mathematical model that approximates dynamics of the thermal pellet treatment in the technological areas of the kiln based on solving fuzzy logic equations and their parametric identification (the act for use of the dissertation results as of October 10, 2019).

Analysis of implementing the results reveals that reduction of specific fuel consumption to maintain mode parameters of high-temperature areas of conveyor-type

kilns is possible when observing specified values of pellet height, moisture content in pellets and the average speed of conveyor belt trolleys.

Key words: conveyor-type kiln, iron ore pellets, thermal process, control, integrated model, fuzzy logic.

Список публікацій здобувача:

Статті в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Лобов В. Й., Митрованов О.В. Аналіз енергетичних характеристик турбомеханізмів. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2017. Вип. 30. С. 146 – 152.

2. Lobov V., Lobova K., Mytrofanov A., Mytrofanov V. Simulation of a gas and air flow exhausted by production equipment. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. Vol. 2, No. 8 (92). P. 33 – 42.

3. Lobov V., Lobova K., Mytrofanov O. Determining the influence of parameters for gas-air flows on the thermal process of producing iron ore pellets. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 2, No. 2 (98). P. 43 – 54.

4. Митрофанов О.В. Автоматизоване керування газотеплоносійними потоками на конвеєрній випалювальній машині. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2019. Том 30 (69), Ч.1, № 2. С.149 – 154.

5. Митрофанов О.В. Комплексна математична модель для дослідження термічного оброблення обкотишів на конвеєрній випалювальній машині. *Вісник Криворізького національного університету*. 2019. Вип. 49. С. 84 – 89.

6. Mytrofanov O. Improvement of the control process of the heat treatment of iron ore pellets in the preheating area of the conveyor-type roasting machine. *Technology audit and production reserves*. 2020. № 6/1 (56). С. 34 – 39.

7. Митрофанов О.В. Математична модель для дослідження термічного оброблення залізорудних обкотишів на конвеєрній випалювальній машині. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2020. Вип. 41. С. 120 – 129.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

8. Митрофанов О.В. Керування процесом термічного оброблення залізорудних обкотишів у технологічній зоні охолодження у випалювальній машині конвеєрного типу. *Енергоефективність: наука, технології, застосування: матеріали V науково-практичної конференції*. 25 листопада 2020 р. Київ, 2020. С. 24 – 28.

9. Митрофанов О.В. Керування термічним процесом оброблення залізорудних обкотишів у зоні випалювання машини конвеєрного типу. *Научные исследования: парадигма инновационного развития: збірник тез доповідей Міжнародної наукової конференції*. 28 грудня 2020 р. Прага, Чехія, 2020. С. 102 – 108.

10. Митрофанов О.В. Моделювання роботи регулятора нечіткої логіки при керуванні процесом охолодження обкотишів на випалювальній машині конвеєрного типу. *Сучасний стан і перспективи розвитку науки: матеріали Міжнародної наукової студентської конференції*. 18 грудня 2020 р. Ужгород, 2020. С. 59 – 62.

11. Митрофанов О.В. Дослідження перехідного процесу в зонах попереднього нагрівання і випалювання при керуванні теплоносіями газоповітряних потоків. *Science and Technology: the 13th international scientific and practical conference*. December 21-22, 2020. Nika publishing, Manchester, Great Britain, 2020. P. 98 – 103.