

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МИТРОФАНОВ ОЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

УДК 681.51: [622.788.5]

ДИСЕРТАЦІЯ

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ
ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ НА КОНВЕЄРНІЙ МАШИНИ НА ОСНОВІ
МЕТОДОЛОГІЇ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ**

151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

15 – Автоматизація та приладобудування

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ О.В. Митрофанов

Науковий керівник – **Лобов Вячеслав Йосипович**, кандидат технічних наук, доцент

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 залізородних 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 залізородних 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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 залізородних 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.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ НА МАШИНАХ КОНВЕЄРНОГО ТИПУ.....	27
1.1. Огляд технологій для виробництва залізорудних окатишів на випалювальних машинах конвеєрного типу	27
1.2. Аналіз особливостей процесу керування термічним обробленням залізорудних окатишів на конвеєрних машинах.....	40
1.3. Аналіз математичних моделей для дослідження процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині.....	48
Висновки до розділу 1	68
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ ПРИ НЕПОВНИХ І НЕЧІТКИХ ЗНАЧЕННЯХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗОН.....	72
2.1. Структурна схема імітаційної комплексної моделі для процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині	72
2.2. Розробка математичних моделей керування процесом термічного оброблення окатишів на основі нечіткої логіки.....	78
2.3. Моделювання процесів сушіння окатишів із використанням регулятора нечіткої логіки	82
2.4. Моделювання процесів керування зонами попереднього нагрівання і випалювання окатишів із використанням регуляторів нечіткої логіки.....	96
2.5. Моделювання процесів керування зміцненням окатишів із використанням регулятора нечіткої логіки	108
2.6. Моделювання процесів керування процесом охолодження окатишів із використанням регулятора нечіткої логіки	113
Висновки до розділу 2	124

РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ І РОЗРОБКА МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ У ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗОНАХ. 128

3.1. Розробки комплексної математичної моделі керування процесом оброблення окатишів на конвеєрних машинах	128
3.2. Дослідження впливу значень неповних і нечітких технологічних параметрів на якість перехідних процесів	134
3.3. Аналіз впливу значень параметрів теплоносіїв газоповітряних потоків на якість перехідних процесів у замкненій системі.....	142
3.4. Дослідження енергетичних показників при керуванні процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині	147
3.5. Узагальнений аналіз адекватності моделей термічного оброблення окатишів на ВМКТ при нечіткому керуванні	150
Висновки до розділу 3	156

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ЗОНАМИ ВМКТ 159

4.1. Розробка функціональної схеми системи автоматизованого керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині	159
4.2. Алгоритм керування процесом термічного оброблення окатишів при нечітких і неповних параметрах технологічного процесу.....	165
4.3. Технічна реалізація автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу	167
4.4. Експериментальне дослідження процесу керування обробленням окатишів на віртуальній моделі	171

Висновки до розділу 4

ВИСНОВКИ 182

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 185

Додаток А..... 198

Додаток Б..... 200

Додаток В..... 204

Додаток Г	213
Додаток Д.....	214
Додаток Е	224
Додаток Ж.....	255
Додаток И.....	256
Додаток К.....	260

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ ВИМІРЮВАННЯ

- АСК – автоматизована система керування;
- БНЛ, БНП – відповідно блоки нечіткої логіки і налаштування параметрів;
- ВМКТ – випалювальна машина конвеєрного типу;
- ПрАТ «Північний ГЗК» – приватне акціонерне товариство «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»;
- ГЗК – гірничо-збагачувальний комбінат;
- ГПП – газоповітряний потік;
- ЗВ, ЗО, ЗР, ЗС, ЗПН – технологічні зони випалювання, охолодження, рекуперації, сушіння і попереднього нагрівання;
- НЛ – нечітка логіка;
- КНЛ, РНЛ – відповідно контролер і регулятор нечіткої логіки;
- КС – конвеєрна стрічка;
- ОК – об’єкт керування;
- ПЕОМ – персональна електронна обчислювальна машина;
- ПТО – пульт технолога-оператора;
- ПТК – програмно-технічний комплекс;
- САК – система автоматизованого керування;
- ТЗ, ТП – відповідно технологічна зона і процес;
- ФОГ – фабрика огрудкування;
- fuzz, dfz – операції фазифікації і дефазифікації;
- LabVIEW – Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench – програмне середовище графічного програмування;
- MSE – Mean Square Error (середньоквадратична похибка прогнозування);
- NNT – Neural Network Toolbox (MATLAB);
- SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition (засоби операторного або диспетчерського контролю й керування).

ВСТУП

Обґрунтування напряму досліджень. Проблема раціонального використання сировинних і паливно-енергетичних ресурсів особливо важлива для енергоємних промислових виробництв. В умовах постійного підвищення цін на паливо та електроенергію виникає ще більша проблема ефективного використання енергетичних ресурсів при високій якості готової продукції металургійної промисловості. Складність агрегатів і технологій у значній мірі утруднюють вирішення цих завдань. Одним із таких технологічних агрегатів є випалювальна машина конвеєрного типу (ВМКТ), яка використовується для термічного оброблення залізородних окатишів. Машина являє собою складну енергетичну систему, що забезпечує процес керування термічного оброблення залізородних окатишів, виконаних із дрібнодисперсних концентратів, і вони є одними з найбільш енерговитратних об'єктів аглодоменного переділу.

Існують різні технологічні та конструктивні рішення машин. Сучасні машини складаються з таких зон: сушіння – першої (ЗСІ) і другої (ЗСІІ), попереднього нагрівання (ЗПН), випалювання (ЗВ), рекуперації (ЗР) і охолодження – перша (ЗОІ) та друга (ЗОІІ). Через розкид параметрів у них виникають необґрунтовані витрати газу й електроенергії, а також не забезпечується нормована якість окатишів і продуктивність машини. Тому доцільно виконати наукові дослідження і забезпечити удосконалення виробництва окатишів шляхом керування процесом термічного оброблення окатишів, враховуючи особливості кожної технологічної зони під час технологічного процесу випалювання окатишів.

Дослідження показують, що питомі витрати енергоресурсів у вітчизняних ВМКТ фабрик огрудкування (ФОГ) значно вище, ніж цей же показник у західних країнах. При виробництві окатишів значні ресурсо- та енергоємність властиві процесам термічного оброблення окатишів впливають теплоносії газоповітряних потоків (ГПП) при переміщенні візків конвеєрної стрічки (КС) вздовж технологічних зон машини.

За такої умови забезпечується формування фізико-хімічних процесів унаслідок ефективного керування обпаленням окатишів із концентратів різного хімічного складу, ступеня окислення та добавками. У структурі собівартості виготовлених окатишів питому вагу займають операції їх термічного оброблення, що обумовлені високими енерговитратами. До основних факторів, що впливають на енерговитрати машини відносять гранулометричні характеристики, фізико-хімічні властивості сирих залізорудних окатишів і ефективне використання потоків теплоносіїв уздовж технологічних зон конвеєрної машини. Враховуючи, що термічні процеси обпалення окатишів проходять послідовно в різних технологічних зонах, підвищення ефективності термічного обпалення окатишів забезпечується шляхом раціонального використання теплоносіїв за технологічними зонами та повторного використання відпрацьованих потоків теплоносіїв перед викиданням їх в атмосферу.

При виробництві окатишів значна ресурсо- та енергоємність властива процесам термічного оброблення окатишів на ВМКТ, які включають використання теплоносіїв при переміщенні візків конвеєрної стрічки уздовж машини (для типу ОК-1-324/336 до 2,52 м/хв.) із забезпеченням нормованих виробничих процесів за рахунок ефективного керування обпаленням окатишів із концентратів різного хімічного складу. У структурі собівартості виготовлених окатишів питому вагу займають операції їх термічного оброблення, що обумовлені високими енерговитратами. Максимальна температура теплоносія над шаром окатишів, яка досягає до 400 мм, по зонах суттєво відрізняється. Так, для першої зони сушіння машини типу ОК-1-324 вона складає 80 °С, а для зони випалювання – 1330 °С. На інжекційні пальники димососом подається нагріте до температури 350 °С первинне повітря, яке необхідне для покращення спалювання газу, максимальні витрати якого досягають 350 м³/год. За технологією із першої зони охолодження машини в зону випалювання подається теплоносій з температурою 800–900 °С, що зменшує витрати природного палива. Цим забезпечується температура теплоносія над шаром у зоні випалювання температури до 1330 °С при розрядженні в горні від 10 до 70 Па.

Упровадження сучасних науково-технічних рішень, розробка та підвищення енергоефективності систем керування процесом термічного оброблення окатишів, ефективне використання енергетичних ресурсів, вирівнювання теплового режиму термічного виготовлення окатишів за технологічними зонами машини, що значною мірою зумовлює конкурентоспроможність виготовлених окатишів, підвищує рівень виробництва та відповідність світовим вимогам. Значну частину теплових витрат у конвеєрній машині становить фізична теплота відпрацьованих (відхідних) теплоносіїв, використання якої може бути відрегульовано на підвищення ефективності термічного процесу виробництва окатишів. Тому актуальними стають питання дослідження закономірностей і процесів, що протікають у ТЗ при зміні параметрів потоків теплоносіїв, розробки нових технічних рішень, що забезпечить їх ефективне використання та поліпшення газодинамічних характеристик зон конвеєрної машини.

Для ґрунтовного аналізу та з'ясування питань щодо ефективності роботи систем керування процесами термічного оброблення окатишів і автоматизації інших виробничих процесів уже традиційно вивчаються праці вітчизняних і зарубіжних вчених: А.А. Азаряна, В.М. Абзалова, В.О. Бабенко, Б.О. Блюсса, О.С. Бреннера, Т.О. Богданова, Л.А. Барського, А.П. Буткарева, М.М. Бережного, Т.Н. Базилевича, В.А. Воронова, В.І. Головка, Г.В. Губіна, Н.В. Глухової, Ю.Г. Качана, Є.В. Кочури, Б.Д. Кошарського, В.З. Козіна, В.І. Корнієнка, В.О. Кондратця, О.М. Марюти, В.С. Моркуна, М.В. Назаренка, Л.І. Мещерякова, В.П. Мешалкіна, Г.М. Майзеля, А.І. Купіна, О.М. Сербула, О.В. Садового, М.І. Сокура, О.Н. Тихонова, А.Є. Тропа, М.Т. Фісуна, А. Йоханссона, Ю.С. Юсфіна; Fukuyo H., Joseph T., Kast W., Krischer O., Miyashita T., Sakamoto N., Tigerschiold M.J. та інших.

Існуючі методи і системи автоматизованого керування (САК) процесом термічного оброблення окатишів не завжди враховують зміну параметрів сусідніх ТЗ, розподіл теплоносіїв газоповітряних потоків по технологічним зонам і тому не дозволяють повною мірою достатньо ефективно керувати цим процесом. Розробка і впровадження САК з урахуванням нечітких і неповних параметрів ТЗ

дозволить забезпечити якісні характеристики окатишів в умовах коливань властивостей сирих окатишів, зміни параметрів технологічного обладнання та наявності перешкод у каналах передачі даних.

Отже, дослідження і розробка законів, методів, моделей та інших сучасних науково-технічних рішень з автоматизації процесу керування технологічними системами, що взаємодіють при термічному обробленні залізородних окатишів на машинах конвеєрного типу, для запобігання відхилень від регламентних параметрів у взаємопов'язаних технологічних зонах і забезпечення високих якісних показників цього процесу та готових окатишів на основі ідентифікації перехідних режимів є актуальним науковим завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати дисертаційної роботи відповідають вирішенню головних завдань поставлених Кабінетом Міністрів України в розпорядженні від 15 березня 2006 р. №145 «Енергетична стратегія України на період до 2030 року». Дослідження виконані відповідно до тематики науково-дослідних робіт «Наукові основи створення сучасних інформаційних та телекомунікаційних технологій для автоматизованого інтелектуального керування технологічними процесами в умовах гірничого виробництва» (держреєстрація № 0116U001776), «Дослідження методів адаптивного прогнозуючого керування багатовимірними розподіленими технологічними процесами гірничо-збагачувального та металургійного виробництв» (держреєстрація № 0116U001797) і «Розробка новітніх способів отримання електроенергії» (держреєстрація № 0116U001839), у яких автор брав участь у проведенні наукових досліджень і виконував окремі розділи звітів, і господарської теми «Теплотехнічне обстеження стану обпалювальної машини ПрАТ «Північний ГЗК», де автор був виконавцем.

Мета і завдання дослідження. *Мета* дисертаційної роботи – підвищення ефективності процесу термічного оброблення залізородних окатишів на основі моделей нечіткої логіки з розробленням системи автоматизованого керування режимними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно розв'язати такі *завдання*:

– виконати аналіз літературних та патентно-ліцензійних джерел з питання автоматизації керування процесом термічного оброблення залізорудних окатишів і визначити невирішені питання в цій сфері та проаналізувати склад і зміст вимог до управління процесом термічного оброблення залізорудних окатишів на машинах конвеєрного типу й визначити фактори, які ускладнюють їх дотримання на практиці;

– виявити і формалізувати закономірності процесу обпалення залізорудних окатишів у машинах конвеєрного типу, використання яких надає змогу підвищити ефективність керування ходом цього процесу;

– розробити теоретичні засади управління процесом обпалення залізорудних окатишів на основі методології нечіткої логіки і практичні заходи із його реалізації;

– розробити автоматизовану систему ефективного керування процесом обпалення залізорудних окатишів на основі результатів виконаних досліджень і впровадити результати дисертаційної роботи в практику та розробити рекомендації з їх широкого використання на залізорудних гірничодобувних комбінатах України.

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

Предметом дослідження є закони, моделі і методи керування процесами, взаємодіючими при термічному обробленні окатишів у технологічних зонах конвеєрної машини з урахуванням впливу нечітких і неповних параметрів технологічних зон, що забезпечують підвищення товарної якості готових окатишів.

Методи досліджень. При проведенні дослідження використано методи математичного моделювання (для аналізу якості перехідних процесів і швидкодії розробленої системи керування процесом термічного оброблення з моделлю

нечіткої логіки), теорії системного аналізу (для структурної декомпозиції процесів термічного оброблення за функціональним призначенням), теорії ідентифікації систем (для вибору й обґрунтування структури математичної моделі об'єкта керування), статистичного аналізу (для обробки результатів обчислювальних експериментів з метою оцінки адекватності комплексної моделі), теорії автоматичного керування (для формалізації задачі багатомірного фізичного моделювання), методи математичної статистики та пасивного експерименту.

Обґрунтування і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується коректністю допущень щодо відповідності розроблених математичних моделей з регуляторами з нечіткою логікою процесам у технологічних зонах конвеєрної машини. Результати моделювання відповідають параметрам, які існують у реальному технологічному процесі термічного оброблення окатишів і узгоджуються результатами впровадження системи керування процесом термічного оброблення окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу LURGI 278A фабрики огрудкування ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат», що зменшує питомі енерговитрати на 5,73 % і природнього газу на 1,1 м³ на тонну готових окатишів. Аналіз адекватності моделі термічного оброблення окатишів на ВМКТ підтверджується за критерієм Фішера, який показав однорідність оцінок дисперсії відтворюваності, де розрахункове значення критерію Фішера $F_{розр} = 197,9 \cdot 10^3$ значно більше ніж табличне $F_{табл} = 6,95$ для температури верхнього шару, а також $F_{розр} = 54,54$ значно більше ніж $F_{табл} = 3,97$ для висоти шару окатишів, що свідчить про надійність обчислення кореляційної матриці, чисельного моделювання на ЕОМ і експериментальних випробувань на лабораторному апаратно-програмному комплексі при виконанні розрахунків і досліджень із використанням загальноновизнаних пакетів прикладних програм.

Наукова новизна отриманих результатів.

Наукові положення, що виносяться на захист:

- температура верхнього шару окатишів на виході зони випалювання

визначається сумою температури заданої для цієї зони, температури верхнього шару окатишів зони попереднього нагрівання і вихідної температури газоповітряного потоку першої зони охолодження;

– вихідна температура верхнього шару окатишів у першій частині зони охолодження прямо пропорційно залежить від вихідної температури верхнього шару окатишів зони рекуперації і по експоненціальному закону впливає на тиск атмосферного повітря, яке нагнітається вентилятором у цю зону.

Наукова новизна отриманих результатів:

– керування процесом термічного оброблення окатишів без урахування взаємодії з взаємопов'язаними технологічними зонами не забезпечує регламентні значення параметрів технологічних зон;

– маса окатишів із візками конвеєрної стрічки в зоні попереднього нагрівання не змінюється і не залежить від впливу температури газоповітряного потоку від взаємопов'язаної зони випалювання;

– уперше удосконалено метод керування температурою відпрацьованих теплоносіїв газоповітряних потоків у високотемпературних зонах, який заключається в тому, що виконують їх перерозподіл між взаємопов'язаними технологічними зонами у функції від значень параметрів регламентних значень параметрів технологічних зон зменшуючи питомі енерговитрати і природнього газу;

– набув подальшого розвитку підхід до автоматизованого керування теплоносіями газоповітряних потоків у взаємопов'язаних технологічних зонах машини який, на відміну від відомих підходів, застосовує технологію віртуальних пристроїв для керування кожною технологічною зоною безпосередньо під час виконання технологічного процесу стабілізуючи значення параметрів у технологічних зонах машини.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці алгоритму керування процесом термічного оброблення окатишів шляхом змін швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки та температури газоповітряного потоку у функції висоти шару, вологи окатишів і їх основності на візках випалювальної

машини, а також його апаратно-програмній реалізації з використанням регуляторів із нечіткою логікою.

Результати наукових і експериментальних досліджень впроваджені ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» у проектах, які використовують комплексну математичну модель, що апроксимує динаміку термічного процесу оброблення окатишів у технологічних зонах машини на основі вирішення систем нечітких функцій і принципу її параметричної ідентифікації. Результати експериментальних досліджень і новітня технологія віртуальних пристроїв використовуються у виробничих умовах. Це підтверджується актом про використання результатів дисертаційної роботи від 10 жовтня 2019 року із ФОГ ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат». Результати досліджень також впроваджені у проекті підприємства АТ «НВАО «ВНДІкомпресормаш» «Поставка комплексу обладнання компримування, підготовлення завантаження природного газу в автомобільний транспорт та розвантаження в газотранспортну систему» (договір № ЛГВ-701/11-18 від 07.08.2018 р.) і в навчальний процес Криворізького національного університету.

Особистий внесок здобувача. Усі сформульовані в дисертації ідеї, наукові положення та висновки є результатом особистих досліджень автора. Здобувачем самостійно здійснена структурна декомпозиція процесів термічного оброблення за функціональним призначенням, розроблені аналітична та комплексна моделі процесу термічного оброблення окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу, реалізовані алгоритми параметричної ідентифікації комплексної блочно-орієнтованої моделі, запропонований метод формування керувань у замкненій системі, виконано імітаційне моделювання адаптивної системи прогнозуючого керування, здійснена обробка та інтерпретація результатів обчислювальних експериментів, розроблена принципова схема мікроцифрового регулятора, з використанням контролера з нечіткою логікою, та здійснена його апаратна реалізація, проведені промислові випробування адаптивної системи

прогнозуючого керування, проаналізована якість перехідних процесів та швидкодія цифрового регулятора.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на засіданнях наукового семінару кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету (Кривий Ріг, 2016–2020 рр.), на міжвузівській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Новітні технології та інновації» (Кременчук, 2013 р.), V науково-практичній конференції «Енергоефективність: наука, технології, застосування» (Київ, 25 листопада 2020 р.), Міжнародній науковій студентській конференції «Сучасний стан і перспективи розвитку науки» (Ужгород, 18 грудня 2020 р.) і 13-й міжнародній науково-практичній конференції «Наука і техніка» (Манчестер, Великобританія, 21–22 грудня 2020 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 11 друкованих працях (зокрема 2 одноосібних), серед них: 5 статей – у наукових фахових виданнях України, 2 статті – в журналі, який входить до наукометричної бази SCOPUS, 5 статей – у журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз, 1 стаття – у закордонному періодичному виданні.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел зі 116 найменувань на 13 сторінках, 9 додатків на 68 сторінках. Загальний обсяг дисертації викладено на 264 сторінках друкованого тексту, з яких 165 сторінок – основний текст. Дисертація містить 66 рисунки, 4 таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ НА МАШИНАХ КОНВЕЄРНОГО ТИПУ

1.1. Огляд технологій для виробництва залізорудних окатишів на випалювальних машинах конвеєрного типу

На гірничо-збагачувальних комбінатах залізна руда переробляється, збагачується і закінчується спіканням концентрату на конвеєрних агломераційних агрегатах або випалюваних машинах конвеєрного типу фабрик огрудкування. На цих машинах відбувається термічна обробка сирих залізорудних окатишів. Працездатність машин впливає на продуктивність і якість виробництва окатишів. Конвеєрна машина є високопродуктивним і безперервно діючим агрегатом.

Останнім часом росте попит металургійної промисловості на залізорудні окатиші, що потребує розвитку нових технологій їх оброблення і вдосконалення процесу керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу. Потрібно врахувати сучасні умови, за якими окатиші є найбільш необхідною продукцією для доменного виробництва, обсяг випуску якої за останні роки зростає. До 2030 року обсяг сталевих виробництва досягне глобальної величини у 2,3–2,4 млрд т, відповідно розширюється необхідність у збільшенні виробництва придатних окатишів. Проте, виробництво агломерату буде зменшуватися, а виробництво окатишів із вмістом заліза на рівні 65 % і вище, і особливо кількість DR-окатишів, буде збільшуватися. Обсяг виробництва залізорудних окатишів буде зростати не тільки за рахунок пуску в експлуатацію нових фабрик огрудкування, а й удосконалення процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині [1–6]. Для аналізу технології термічного оброблення окатишів, з точки зору задач автоматизації, необхідно розглянути особливості технологічного процесу, конструкцію машини, визначити вхідні й вихідні параметри і встановити взаємозв'язок між ними. На ГЗК процес

виробництва залізорудних окатишів складається з трьох основних стадій. Це підготовка компонентів шихти для огрудкування на дільниці шихтопідготовки, отримання сирих окатишів на дільниці огрудкування та їх термічне випалювання на дільниці випалювання (рис. 1.1) [6, 7].

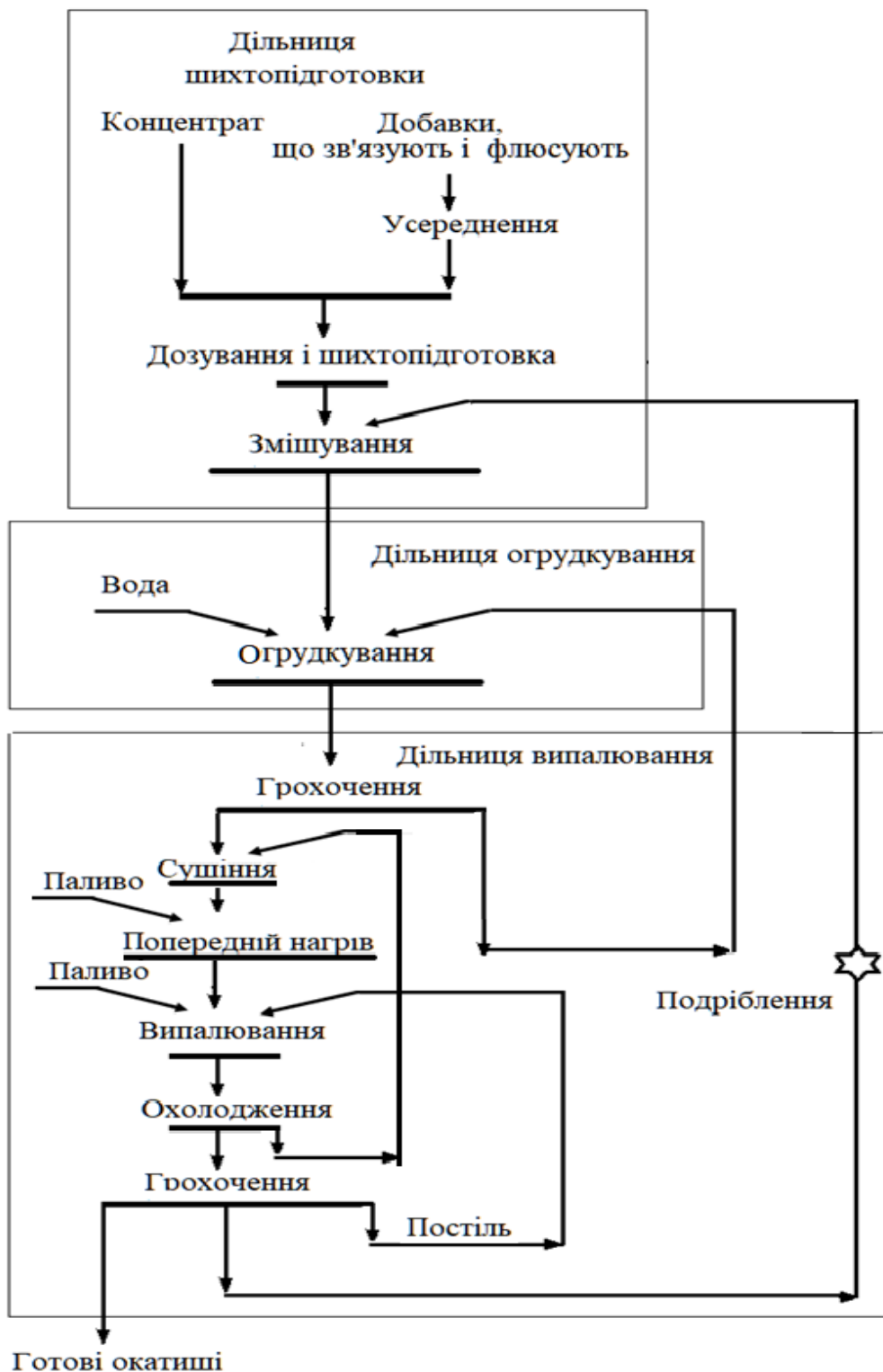


Рис. 1.1. Технологічна схема виробництва окатишів з термічним обробленням на ФОГ

На ФОГ в якості вихідних матеріалів використовують концентрат, вапняк, бентоніт, вода і газоподібне паливо [5–7]. Технологічний процес високотемпературного зміцнення окатишів здійснюється здебільшого на ВМКТ. При автоматизації процесів керування температурної обробки залізородних окатишів важливу роль відіграють особливості технології та конструкції цих машин. Так, як ВМКТ призначені для сушіння, підігріву, випалювання, рекуперації та охолодження залізородних окатишів, то вони мають розвинену систему газоповітряних потоків і безперервний процес завантаження, випалювання і розвантаження окатишів. Сирі окатиші з дільниці огрудкування подаються конвеєром на укладальник, який розподіляє їх за шириною роликового живильника і здійснює відсів дрібної фракції та завантажує на візки ВМКТ. Попередньо на ці візки укладені шари донного і бортового ліжок із випалених окатишів. У відповідності до технологічних процесів робоча площа машини поділена на взаємопов'язані зони: ЗС, ЗПН, ЗВ, ЗР і ЗО. Теплотехнічна частина ВМКТ містить горни з форсунками та горілками для спалювання газового палива, колектори для перетоку газів із ЗО в ЗС, ЗПН, ЗВ, ЗР, вакуумні камери та газоповітряні тракти.

Завантажені сирими окатишами, донним та бортовим ліжками візки КС надходять у першу ЗС, де шар окатишів підсушується гарячим повітрям з температурою 250–300° С, яке подається димотягом з вакуум-камер ЗВ і ЗР. Вологі гази відсмоктуються димотягом і після очищення в групових циклонах скидаються в трубу. В другій ЗС через шар окатишів просмоктується зверху вниз теплоносій з температурою 300–350° С, що подається із другої ЗО та, частково, з колектору першої ЗС. Через шар окатишів зверху вниз просмоктується теплоносій з температурою 600–700° С, що формується у форкамерах при змішуванні високотемпературного повітря, яке надходить через колектор прямого перетоку із першої ЗО і повітря горіння палива.

При встановленні температурного та газоповітряного режимів у ЗС необхідно, з одного боку, максимізувати швидкість фільтрації теплоносія через

шар окатишів, що дозволяє інтенсифікувати процес сушіння та підготувати верхні шари до дії високих температур в наступних взаємопов'язаних технологічних зонах. З іншого боку, для того, щоб виключити можливість руйнування та зниження міцності сирих окатишів необхідно не перевищувати критичну швидкість сушіння [6]. Задачею регулювання процесу сушіння є стабілізація витрати теплоносія, що проходить через шар, при поступовому збільшенні температури вздовж ЗС. Для цього використовують керуючі впливи температури теплоносія та швидкість його фільтрації, як функція різниці тисків над шаром та під ним. Однак задача керування процесом суттєво ускладнюється наявністю збурень, пов'язаних зі змінами характеристик на виході із технологічних зон шару окатишів: змінення їх вологості, висоти, гранулометричного складу, порушення рівномірності їх укладки, а також змінами температури теплоносія, що надходить із ЗВ, ЗР і ЗО та інші.

У ЗПН, яка розташована в горні ВМКТ із п'яти газоповітряних камер, відбувається попереднє нагрівання шару із заданими швидкостями, зміцнення окатишів за рахунок окислення та рекристалізації магнетиту в гематит. Теплоносієм є продукти згорання природного газу в потоці високотемпературного повітря, що надходить через колектор прямого перетоку із першої ЗО (вторинне повітря). З метою зменшення витрати газу для його спалювання використовується підігріте (первинне) повітря з температурою 360–400 °С, що надходить в пальники із другої ЗО. Процес горіння палива в ЗПН і ЗВ відбувається в спеціальних камерах (форкамерах). Температура теплоносія в горні змінюється від 800 до 1200° С [7].

У ЗВ під впливом високих температур відбуваються найскладніші фізико-хімічні та мінералогічні процеси. Тут у подальшому перетворюється магнетит в гематит, десульфурація, утворюється рідкі фази та ферити кальцію. Температура теплоносія встановлюється в межах 1250–1300° С. Особливості приготування теплоносія для ЗВ аналогічні ЗПН. У ЗР відбувається завершення процесу високотемпературного оброблення окатишів на нижніх ділянках шару шляхом перенесення тепла з верхніх ділянок у нижні. ЗР є неопалюваною, в якості

теплоносія використовується повітря перетоку із першої ЗО з температурою 800–900° С. Основною задачею регулювання режиму термічної обробки окатишів в ЗВ і ЗР є забезпечення бажаного розподілу температур в шарі вздовж ВМКТ. Підтримання заданого розподілу температур уздовж ВМКТ здійснюється шляхом стабілізації температурного режиму в кожній газоповітряній камері [5–7].

З метою досягнення найбільш ефективного режиму спалювання газу, а також забезпечення достатньої для реакцій окислення кількості кисню, підтримується задане співвідношення витрат газу та повітря для кожної пари пальників [5]. Для спалювання газу використовується підігріте повітря з другої ЗО. У ковпаку цієї зони, пов'язаних зі змінами аеродинамічного опору шару окатишів, відбуваються коливання тиску повітря, яке подається на пальники, що вносить високочастотні збурення в процес горіння палива. Тому, для мінімізації впливу цих збурень стабілізують тиск повітря горіння [6]. Для зменшення коливань газопроникності шару окатишів його висоту підтримують постійною шляхом регулювання швидкості візків ВМКТ, то при коливаннях продуктивності за сирими окатишами змінюється і швидкість руху візків. Це приводить до зміни часу перебування окатишів у зонах.

При значних коливаннях продуктивності живлення змінення швидкості візків КС призводить до зміни режиму термічного оброблення окатишів у кожній технологічній зоні машини, в яких порушується баланс між потребою шару окатишів в теплі та дійсною кількістю тепла, що надходить в шар. Отже, зміна термічного процесу оброблення окатишів у технологічній зоні приводить до недотримання регламентних режимів роботи зон. Подалі значення вихідних параметрів цих зон, такі як волога окатишів і їх основність, висота шара окатишів на візках КС, температура верхнього шару окатишів і теплоносії газоповітряного потоку й інші, суттєво впливають на параметри взаємопов'язаних по технології зон. При цьому немає безпосередньої можливості виміряти ці параметри і відповідно керувати цим процесом.

ЗО звичайно розділена на дві секції. В першій секції ЗО через шар окатишів продувається підігріте повітря з температурою 150–200° С, що відсмоктується

димососом із другої ЗО. Високотемпературне (вторинне) повітря прямим перетоком через колектор надходить в ЗС, ЗПН, ЗВ і ЗР. У другій ЗО через шар окатишів продувається холодне (атмосферне) повітря. Режим охолодження окатишів ведуть таким чином, щоб їх температура на виході була не більше 150–160 °С [2, 6]. Коливання аеродинамічного опору шару окатишів у ЗО, викликані змінами чистоти колосникового поля, гранулометричного складу та морозності шару, призводять до коливань кількості повітря, яке надходить у колектор прямого перетоку, і, таким чином, вносять суттєві збурення в роботу ЗС, ЗПН і ЗВ. Для усунення цього впливу та стабілізації температурного та газоповітряного режиму машини в цілому необхідно стабілізувати витрати повітря через шар окатишів в обох секціях ЗО.

Отже, процес керування термічним обробленням окатишів на ВМКТ полягає у забезпеченні регламентних і механічних властивостей окатишам, які залежать від теплотехнічних характеристик машини, що визначаються конструктивними й технологічними рішеннями. ВМКТ здійснює зміцнення сирих окатишів у щільному фільтруючому шарі з розвиненою системою газоповітряних потоків при безперервному процесі завантаження, термічного оброблення і розвантаження придатних окатишів у залізничні вагони.

Кожна сучасна ВМКТ конвеєрного типу (ОК-306, ОК-1-324/336, ОК-520, LURGI-278А або інші) залежно від технології термічного оброблення окатишів мають різну кількість технологічних зон і газоповітряних камер, а також використовує різні схеми подачі теплоносіїв [4, 5]. Перетічними колекторами оснащені машини другого покоління. У них організовано пряме перетікання високотемпературного (до 1000–1100 °С) теплоносія. Повітря, що відходить із зони охолодження, розділено на два потоки.

Високотемпературний потік подається в ЗПН за допомогою перетічного колектора. Більш холодне атмосферне повітря (до 400 °С) нагнітається вентилятором. Максимальна кількість технологічних зон машин досягає дев'яти, а максимальна кількість газоповітряних камер – 35 шт. Наприклад, машина конвеєрного типу ОК-324 має по дві зони сушіння, охолодження і випалювання,

та по одній зоні попереднього нагрівання і рекуперації.

Якісні показники випечених залізорудних окатишів визначаються не тільки складом шихтових матеріалів, а й температурно-часовим режимом термічної обробки, який формується тепловою схемою машини. Ці схеми забезпечують розподіл теплових потоків по робочій площі зони і машини загалом [6, 7]. Функціонування теплової схеми здійснюється шляхом переміщення теплових потоків по окремим газовим колекторам (трактам). Вона має таке обладнання: вентилятори та димотяги для подачі високотемпературного й атмосферного повітря, тракти для їх транспортування, пальники, газоочисне обладнання, газоходи, дросельні заслінки для регулювання витрат повітря та теплоносіїв, що подаються в зони машини або ділянку спеціальної газохідної системи. Основним завданням теплової схеми, і відповідно САК, є реалізація регламентного режиму для забезпечення ефективного термічного режиму, що дозволить отримати максимальну кількість придатних окатишів. Основні теплові схеми представлені на рис. 1.2 і рис. 1.3.

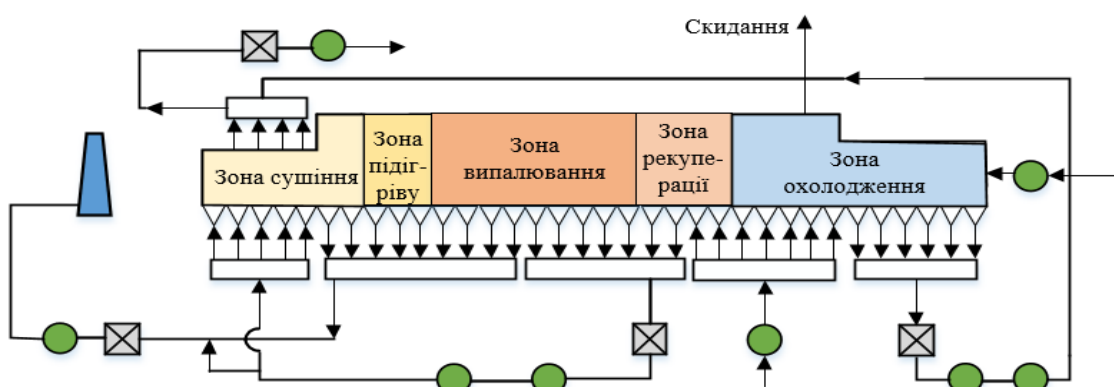


Рис. 1.2. Теплова схема машини типу ОК-306

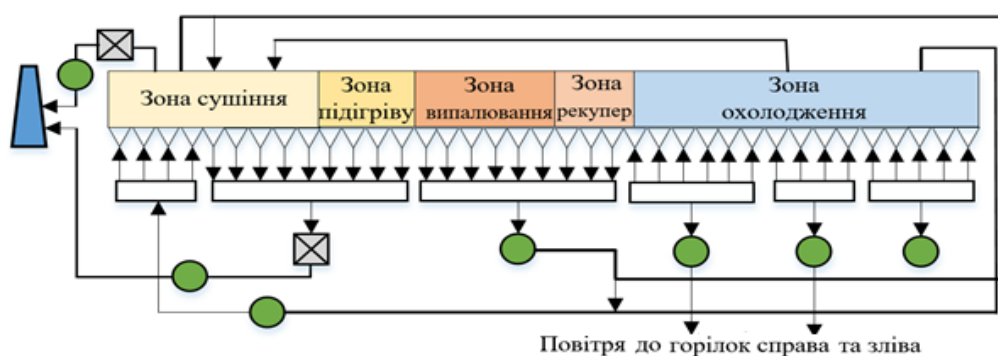


Рис. 1.3. Теплова схема машини типу ОК-520

Для ОК-306 характерна двохпоточна комбінована – поєднання безвентиляторної схеми з одним перетічними колектором і вентиляторної схеми з розведенням потоку. Процесу переробки відходів і перерозподілу тепла уздовж зон машини присвячено значну кількість робіт [4, 6–12 та ін.]. Потоки, що відходять із ЗОІ, транспортуються в зону попереднього нагрівання за допомогою перетічної системи. Це дозволило істотно знизити витрати палива при виробництві окатишів за рахунок удосконалення конструкції машин, що забезпечує повернення значної частини потоку тепла, яке відходить із зони охолодження в інші зони машини. Перші випалювальні машини типу ОК-108 оснащені зоною охолодження, що працює за усією довжиною з подачею охолоджуючого атмосферного повітря в шар окатишів від низу до верху. Водночас нагріте повітря, яке розбавляють атмосферним повітрям, подають у зону попереднього нагрівання за допомогою вентиляторів, які працюють до 400 °С. Перші машини не мали поділу повітря, що відходить із зони охолодження, на окремі потоки. Теплоносій у цих машинах розбавляється атмосферним повітрям для зниження його температури до величини, яка дозволяє його транспортування високотемпературними вентиляторами. Подальший пошук зниження питомої витрати палива призвів до поділу потоку теплоносія, що відходить із зони охолодження, на три потоки.

Конструктивно машина має теплову та механічні частини, які змонтовані на каркасі [4, 7, 12]. У їхню теплову частину входять: горн із форкамерами та інжекційними пальниковими пристроями, кожухи горна, переточний колектор, газоповітряні камери та ущільнення. Механічна частина складається з візків конвеєрної стрічки, замкнених направляючих, за якими рухаються ці візки, приводу з приводними зірочками, завантажувального та розвантажувального пристроїв. Відпрацьовані теплові потоки відсмоктуються через збірний колектор димотягів та викидаються вже очищеними у димову трубу, або використовуються іншими пристроями [13, 14].

Як показують результати досліджень, при керуванні термічним процесом оброблення окатишів на ВМКТ потрібно враховувати параметри потоків,

властивості окатишів, швидкість переміщення візків, висоту шару окатишів тощо. Зміну висоти шару окатишів на візках враховують, або на вході в технологічну зону, або на її виході. Шар залізородних окатишів на візках за висотою перебуває в межах від 250 до 400 мм. Висота шару окатишів залежить від швидкості переміщення візків, що рухаються зі швидкістю від 0,72 до 2,52 м/хв. через зони, у яких поступово виконуються процеси термічної дії над сирими окатишами. Після проходження візками останньої зони придатні окатиші розвантажуються в бункер прийому готової продукції.

У кожній температурній зоні підтримуються регламентні температурний і газоповітряний режими. Дві зони сушіння мають протилежні напрямки подачі теплоносіїв крізь шар окатишів. Це необхідно для забезпечення регламентних параметрів сушіння. У першу зону сушіння потік теплоносія із температурою 300–350 °С подається димотягом із зони охолодження і, проходячи крізь шар окатишів, нагріває і підсушує його знизу, а потім викидається в димову трубу. Іншим димососом у другу зону сушіння подається теплоносій із температурою 250–350 °С із колектора відпрацьованих газів зони випалювання. Вторинний теплоносій із зони охолодження через колектор прямого перетікання з температурою на рівні 700–800 °С нагнітається в другу зону сушіння, а відпрацьовані гази скидаються в димову трубу. Регулюючи подачу і відсмоктування теплоносія крізь шар окатишів, підтримують у другій зоні сушіння розрідження на рівні 10–50 Па, а горн цієї зони працює під розрядженням 30–100 Па.

Технологічні зони ЗПН і ЗВ обладнані парами інжекційних пальників, які призначені для спалювання природного газу. Кількість пар інжекційних пальників залежить від типу машини. Для отримання рівномірного розподілу температур над шаром окатишів у зоні випалювання, вони обладнані спеціальними камерами згоряння – форкамерами, які розташовуються з обох сторін горну. Із трубопроводу, що примикає, у форкамеру надходить теплоносій із колектора прямого перетікання. Для спалювання природного газу на інжекційні пальники ЗПН димотягом подається нагріте атмосферне повітря в межах від 250 до 350 °С.

При запуску машини подача первинного атмосферного повітря на пальники відбувається за допомогою вентилятора. Повітря інтенсивно перемішується з продуктами згоряння палива і надходить у робочий простір технологічної зони.

У попередньому нагріванні шар окатишів готується до високотемпературного випалювання. Температура верхнього шару окатишів перебуває в межах від 600 до 800 °С, а температура теплоносія газоповітряного потоку над шаром – 800 °С. Зневоднення нижніх горизонтів шару відбувається над вакуум-камерами, а розрідження в горні перебуває в межах від 10 до 70 Па. Теплоносій із ЗВ просмоктується через шар окатишів і подається в переточний колектор прямим перетіканням і далі в зони попереднього нагрівання випалювання й рекуперації. Процеси, які протікають у перших цих зонах, потребують високої стабілізації температур у горні для забезпечення отримання міцних окатишів і високого терміну служби вогнетривкої футеровки форкамери. Зона випалювання розташовується над вакуум-камерами. У горні підтримується розрядження в діапазоні від 10 до 70 Па. На даному етапі здійснюється формування регламентних параметрів міцності окатишів через випалювання. У цій зоні відбуваються інтенсивні хімічні реакції (окислення магнетиту, розкладання вапняку). У ЗР закінчуються процеси керування термічним обробленням окатишів і формування міцності в нижніх горизонтах шару окатишів за рахунок перенесення потоку тепла із верхніх ділянок шару. У рекуперації переточний теплоносій транспортується із ЗО при температурі від 800 до 920 °С.

Останньою зоною є зона охолодження, яка має декілька вакуум-камер. Застосовується нереверсивна схема подачі охолоджуючого повітря за довжиною зони. Такий поділ обумовлено споживанням одержуваного потоку теплоносія і забезпеченням достатніх швидкостей фільтрації повітря через шар окатишів. У першій зоні охолодження починається поступове охолодження окатишів холодним атмосферним повітрям. Теплоносій, що відходить із першої зони охолодження і нагрітий до температури 800–920 °С, використовується як теплоносій для розведення спалювання природного газу в зони попереднього нагрівання, випалювання і рекуперації. Відсутність вентиляторів із прямим

перетіканням газів дозволяє не розбавляти високотемпературний теплоносій потоку холодним атмосферним повітрям і ефективно знизити питомі витрати палива. Друга частина зони призначена для охолодження шару окатишів до температури 120 °С при подачі атмосферного повітря вентилятором.

Встановлено, що питомі витрати тепла палива і параметри максимальної температури над шаром окатишів у зонах випалювання, рекуперації і на виході з машини для типових машин суттєво змінюються. Для забезпечення максимальної продуктивності машини і отримання якісних окатишів необхідно витримувати в кожній зоні регламентні параметри температур і тиску / розрядження ГПП у горні та камері, час перебування окатишів, експериментальні дані яких наведено в табл. 1.1 [7].

Таблиця 1.1

Основні параметри машини типу ОК-520

Техно-логічна зона	Номер газопо-вітряних камер	Розрахунковий час перебування окатишів у ТЗ, хв.	Температура газоповітряного потоку, °С		Тиск (+) або розрядження (-), Па	
			у горні	у ГПП камері	у горні	у ГПП камері
ЗСІ	1А, 1–4	5,2	60–70	250–300	–(60–80)	+(4000–6000)
ЗСП	3–6	2,3	400–450	170–220	–(40–60)	–(2000–2500)
ЗПН	7–9	3,5	700–900	120–150	–(30–50)	–(3500–4000)
ЗВ	10–17	9,3	1000–1200	150–450	–(30–50)	–(4000–5000)
ЗР	18–19	2,3	800–900	450	+(30–60)	–(3000–4000)
ЗОІ	20–26	8,1	700–900	20	+(30–60)	+(4000–5000)
ЗОІІ	27–29	3,5	300–400	20	0±20	+(3500–4500)
ЗОІІІ	30–32	3,5	20	120	–100	–3500

Проте, як показують результати досліджень, при експлуатації машини характеристики температурного режиму в кожній технологічній зоні не завжди задовольняють регламентні норми [5, 8, 15]. Результати теоретичних та експериментальних досліджень не завжди якісно та повно описують процес термічного оброблення окатишів з урахуванням впливу параметрів сусідніх технологічних зон. Найбільш критичними щодо обмежень величин термічного процесу оброблення окатишів є неможливість чіткого і повного визначення параметрів технологічного процесу для кожної зони та впливу однієї на іншу. Указані особливості суттєво впливають на технологію термічного оброблення залізородних окатишів на конвеєрній машині, оскільки не забезпечуються потрібні перехідні режими процесу в окремій зоні та машини загалом. За тепловою схемою потоки розподілялися по зонам вентиляторами та димотягами при температурі до 500 °С. Розведення високотемпературних теплоносіїв атмосферним повітрям привело до того, що димотяги додатково завантажені. Водночас витрачається багато тепла з окатишів через незначну площу охолодження.

Починаючи з машин типу ОК-306, передбачається високий ступінь використання відхідного тепла з шару потоку і його транспортування по тракту з високою температурою до 800 °С з охолоджуючої у високотемпературні зони. При цьому зведені до мінімуму викиди гарячого потоку в атмосферу. На машині типу ОК-306 уперше реалізована схема реверсивних потоків у зоні охолодження, що дозволяє знизити максимальну температуру придатних окатишів.

Дослідження численних наукових робіт, які присвячені перевагам і недолікам теплових схем різних моделей машин, дозволили створити сучасну випалювальну машину типу МОК-1-592 [16, 17]. Проте, вона потребує більш повно та цілеспрямовано подавати теплоносії із регламентними параметрами в технологічні зони.

Отже, для забезпечення підвищення продуктивності випалювальних машин і якості придатних окатишів виникає необхідність в автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів шляхом регулювання інтенсивності

подачі теплоносіїв уздовж технологічних зон за допомогою тягодуттєвих машин і за спеціальним алгоритмом виконувати перерозподіл їх між технологічними зонами. Дане наукове дослідження дозволить забезпечувати гнучке автоматизоване керування процесом оброблення окатишів у кожній зоні з урахуванням взаємопов'язаних технологічних зон. Унаслідок аналізу технології термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині встановлено, що:

- навіть при спаді загального обсягу виробництва чавуну існує тенденція збільшення попиту на придатні залізородні окатиші, що поставляються з фабрик огрудкування;

- увесь простір об'єкта розподілено на технологічні зони із зосередженими нестационарними параметрами і це неповністю дозволяє отримувати технологічні дані по кожній зоні та видавати керуючі сигнали на її управління;

- готові залізородні окатиші не завжди відповідають регламентним показникам, які визначаються складом шихтових матеріалів і температурно-часовим режимом термічної обробки у кожній зоні, параметрами машини, її тепловою схемою;

- при керуванні технологічним процесом оброблення окатишів на машині конвеєрного типу не враховується структурна теплова схема й окремі її елементи, що приводить до зниження показників ефективності виробництва придатних окатишів: питома продуктивність, питома витрата енергоносіїв, склад і кількість теплоносіїв, що скидаються в атмосферу;

- за рахунок нестационарності параметрів процесів випалювання і транспортування у кожній технологічній зоні не завжди підтримуються регламентні температурний і газоповітряний режими, що знижує якісні параметри окатишів;

- не завжди враховуються витрати електроенергії і природного палива, кількість скидання нагрітого повітря в атмосферу, що збільшує собівартість виготовлення окатишів;

– результати теоретичних та експериментальних досліджень не завжди якісно та повно описують процес термічного оброблення окатишів з урахуванням параметрів сусідніх технологічних зон.

1.2. Аналіз особливостей процесу керування термічним обробленням залізородних окатишів на конвеєрних машинах

Параметри теплоносіїв впливають на структуру та міцність придатних окатишів, тому дотримання газодинамічних і температурних регламентних характеристик під час процесу керування термічним обробленням окатишів є необхідним складником процесу для отримання якісного продукту. Параметри залізородних окатишів пов'язані з комплексом їх перетворення у кожній зоні, які відбуваються в умовах впливу теплоносіїв. Розробка нових технологій процесу термічного оброблення окатишів і проектування для них нових конструкцій машин враховують вплив кожної технологічної зони на виробничий процес. Це вимагає проведення аналізу математичних закономірностей розвитку фізичних і хімічних процесів керування при впливі на них нагрітих й охолоджених газоповітряних потоків. Температури шару окатишів і потоку залежать від висоти шару окатишів і часу їх перебування в зоні, які відповідно визначаються математичними виразами:

$$\theta_{m,h} = e^{-Y} \int_0^z e^z I_0(2\sqrt{YZ}) dZ; \quad \theta_2 = e^{-Z} \int_0^Y (1 - e^Y I_0(2\sqrt{YZ})) dY, \quad (1.1)$$

де $I_0(2\sqrt{YZ})$ – модифікована функція Бесселя, а висота шару окатишів і час їх перебування в зоні для рівняння (1.1) визначаються виразами (1.2):

$$Y = \frac{K_v h}{c_s \omega \epsilon}; \quad Z = \frac{K_v t}{c_m (1 - \epsilon) \rho_m}, \quad (1.2)$$

де K_v – коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$;

t – тривалість взаємодії газу і матеріалу, год;

ρ_m – густина матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

C_g – об'ємна теплоємність газу, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$;

C_m – удавана теплоємність матеріалу, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

h – висота шарового сегменту, м;

w – волога обкотишів, частки од.

Температура окатишів у зоні випалювання визначається за формулою (1.3):

$$T = K \frac{P_g}{P_{obk}}, \quad (1.3)$$

де K – коефіцієнт, що характеризує технологічну зону, $^{\circ}\text{С т}/\text{м}^3$;

P_g – подача газу, $\text{м}^3/\text{год}$;

P_{obk} – подача окатишів, $\text{т}/\text{год}$.

При керуванні процесом термічного оброблення залізородних окатишів необхідно забезпечити їх регламентні параметри: вміст заліза, основність, вологість, діаметр, щільність, міцність тощо. При відомій вологості сирого окатиша визначається його щільність за формулою (1.4):

$$\rho_{ок} = \frac{\rho_m}{1-w} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1-w}{w} \cdot \frac{1}{\rho_m}} \right), \quad (1.4)$$

де ρ_m – щільність твердої фази, $\text{г}/\text{см}^3$.

Щільність твердої фази знаходимо як адитивну складову щільності фаз у вихідному окатиші (концентрат + бентоніт), $\text{г}/\text{см}^3$:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n m_i \rho_i, \quad (1.5)$$

де m_i , n – частка і кількість фаз;

ρ_i – щільність фази (компоненти шихти), г/см³.

Щільність концентрату знаходимо з урахуванням щільності фазових складових, г/см³:

$$\rho_k = 5,75 \cdot (FeO) + 5,24 \cdot (Fe_2O_3) + 2,3 \cdot (SiO_2) + 3,6 \cdot (MgO) + 1,0 \cdot (L), \quad (1.6)$$

де FeO , Fe_2O_3 , SiO_2 , MgO – частки од.;

L – летючі (вода).

За аналізами результатів промислових випробувань відомо, що існує вимога у зниженні питомої витрати електроенергії на роботу тягодуттьових пристроїв (димотягів) [18–20]. У загальному вигляді витрати електроенергії димососом за розрахунковий період визначаються за формулою (1.7), кВт·год:

$$W_{m\partial n} = P_{m\partial n} T, \quad (1.7)$$

де $P_{m\partial n}$ – середня споживна електродвигуном потужність димотяга, кВт;

T – термін роботи димотяга протягом розрахункового періоду, год.

У загальному вигляді залежність потужності, споживаної електродвигуном димососа, від його робочих характеристик виражається формулою [19]:

$$P = k \frac{LP}{k_H k_E k_M}, \quad (1.8)$$

де L – продуктивність димососа, м³/год;

P – тиск нагнітача, кг/м²;

k – коефіцієнт, який враховує одиниці виміру;

k_H , k_E , k_M – коефіцієнти корисної дії на валу димососа (60–84 %), електродвигуна (85–92 %), при навантаженні більше 60 %, механічної передачі (93–98 %).

У процесі експлуатації машини ефективні конструктивні та режимні параметри відрізняються від регламентних у зв'язку зі зміною характеристик шару окатишів і донного ліжка, вологості, діаметру, гранулометричного складу

окатишів та ін. Для забезпечення цих параметрів потрібно реалізувати відповідні алгоритми керування технологічним процесом, враховуючи розподіл температур на кожному горизонті шару окатишів. Так, наприклад, результати зміни температури нижнього горизонту шару окатишів, що представлені графіками (1, 2), і теплоносіїв, що відходять (3, 4) залежно від температури в зоні випалювання, показано на рис. 1.3, а. На цьому рисунку дана зона представлена I–III секціями, а швидкість руху візків складає 0,0225 м/с, яка визначається виразом (1.9):

$$V = \frac{Q_c}{60HBM_{c\text{об}}}, \quad (1.9)$$

де Q_c – продуктивність машини по сирим окатишах, т/год;

H, B – висота шару сирих окатишів, м і ширина візка конвеєрної стрічки, м;

$M_{c\text{об}}$ – насипна маса сирих окатишів, т/м³.

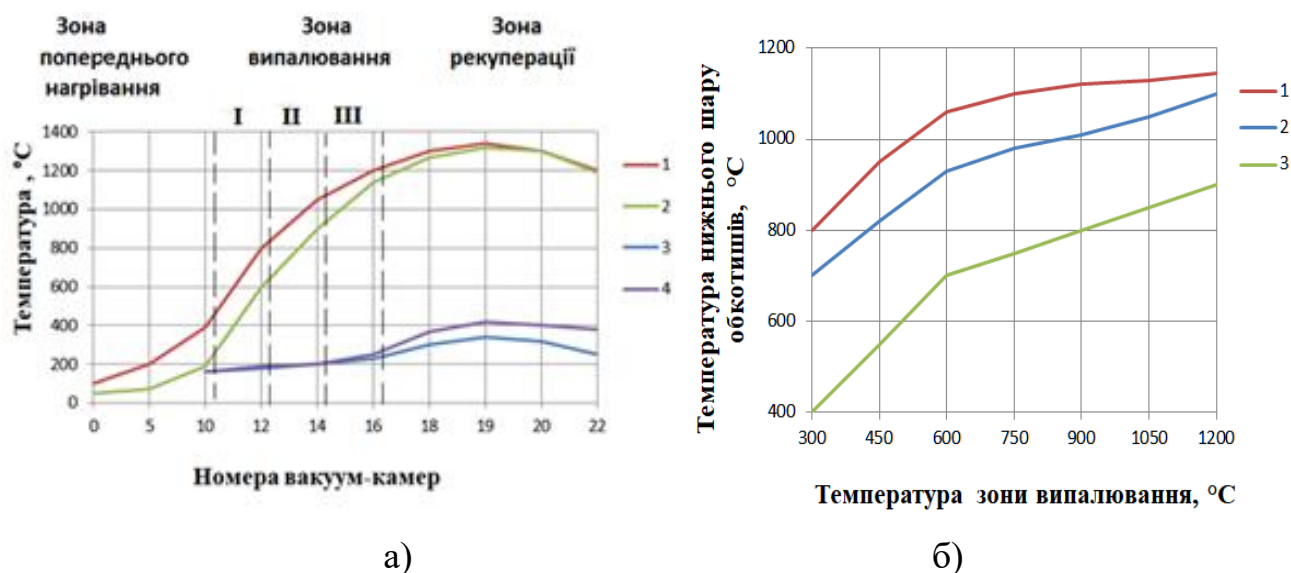


Рис. 1.4. Зміна температур у зоні випалювання:

а – нижнього горизонту шару окатишів (1, 2) і теплоносіїв потоку, що відходять (3, 4); б – нижнього горизонту шару окатишів залежно від часу перебування в технологічній зоні (розрахункова)

Графіки рис. 1.4, *a* представляють температуру нижнього шару окатишів на виході із першої секції зони випалювання на рівні 800 °С, а на виході з третьої секції вона вже складає 1200 °С. Очевидно, що значення на рівні 800 °С є межею, після якої не має сенсу витримувати шар окатишів при високих температурах, тобто у цей момент визначається час випалювання або довжина зони випалювання. Чим вища швидкість фільтрації теплоносія потоку в шарі, тим раніше настає зростання температурної кривої, що свідчить про більш швидку «теплонасиченість» шару окатишів.

Крутизна кривих зі збільшенням швидкості фільтрації зростає, що вказує про більш швидке прогрівання шару окатишів. Швидкість фільтрації газу в зоні машини розраховується через об'єм газу за формулою (1.10) [11]:

$$U_f = \frac{V_{ot}}{60L} \rho_H HV, \quad (1.10)$$

де L – довжина технологічної зони, м;

V_{ot} – об'єм газу, м³;

U_f – швидкість фільтрації газу, м/с;

ρ_H – щільність шару окатишів, г/см³.

Експериментальна перевірка показала (рис. 1.4), що збільшення швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки призводить до зниження рівня температур у шарі окатишів. При цьому кількість теплоти газів, що відходять із технологічної зони, визначається формулою (1.11):

$$Q_{ot} = 10^{-3} V_{ot} t_{ot} \bar{C}_{ot}, \quad (1.11)$$

де t_{ot} – температура, °С;

\bar{C}_{ot} – теплоємність газу, кДж/(м³·К).

Швидкості фільтрації потоку теплоносія, що дорівнює приблизно 0,36 м/с, впливає на температуру шару окатишів у зоні випалювання. Її залежність від

зміни швидкості руху візків представлена графіками на рис. 1.5. Аналітичні розрахунки показали, що при температурі теплоносіїв над шаром окатишів $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ час витримки їх у технологічній зоні складає 9–10 хв. Це дає можливість отримувати температуру нижнього горизонту близько $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, а в середньому по шару окатишів $1100\text{--}1150\text{ }^{\circ}\text{C}$. При підвищенні температури потоку над шаром окатишів подібну температуру на його виході отримуємо раніше. Отже, обрана довжина зони випалювання, що дорівнює 7 вакуум-камерам, при швидкості руху візків рівною $1,5\text{ м/хв.}$ має резерв.

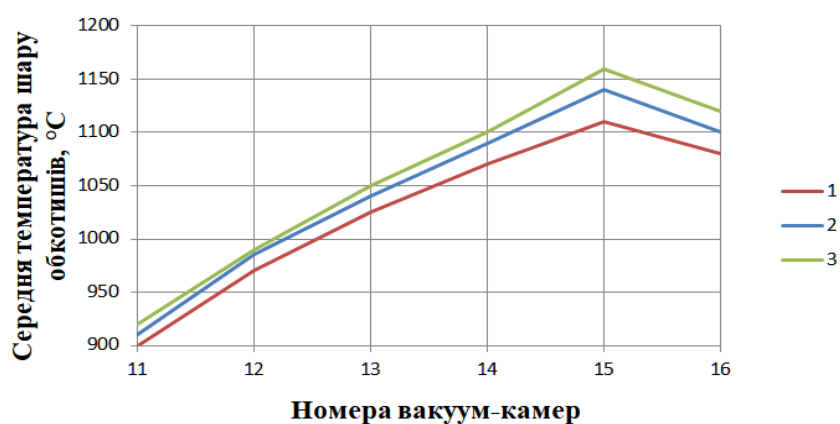


Рис. 1.5. Зміна температури окатишів у функції від швидкості руху візків конвеєрної стрічки в зоні випалювання: 1 – швидкість переміщення $0,0208\text{ м/с}$; 2 – теж, $0,0225\text{ м/с}$; 3 – теж, $0,0242\text{ м/с}$

Інтенсифікація теплообміну в шарі окатишів можлива за рахунок збільшення швидкості руху теплоносія потоку, яка залежить від параметрів окатишів, висоти шару й потужності тягодуттєвих засобів. Результати розрахунково-аналітичних досліджень показали, що при розрядженні у вакуум-камерах високотемпературних зон існує регламентна за продуктивністю висота шару окатишів. Так, при розрядженні близько $4,5\text{ кПа}$ регламентна висота сирих окатишів становить $0,45\text{--}0,48\text{ м}$, а разом з «постіллю» – $0,5\text{--}0,55\text{ м}$. Підвищення розрядження у вакуум-камерах дозволяє значно інтенсифікувати процеси теплообміну в шарі окатишів. Проте збільшується висота шару окатишів і питома

продуктивність випалювальної машини, яка по вихідним окатишах визначається виразом (1.12):

$$Q_{\text{випалювальної машини}} = qF, \quad (1.12)$$

де F – площа машини, м^2 ;

q – питома продуктивність машини, $\text{т}/\text{м}^2 \text{ год}$, яка визначається (1.13):

$$q = \frac{1}{\frac{1}{q_{3С}} + \frac{1}{q_{3В}} + \frac{1}{q_{3О}}}, \quad (1.13)$$

де $q_{3С}$, $q_{3В}$, $q_{3О}$ – відповідно питома продуктивність технологічних зон: сушіння, випалювання і охолодження.

Продуктивність машини за придатними окатишами визначається співвідношенням параметрів, $\text{т}/\text{год}$:

$$C_2 = 60 \cdot K1 \cdot K2 \cdot B0 \cdot H \cdot M_{\text{с об}} \cdot V,$$

де $K1$ – вихід придатних окатишів із сирих, т;

$K2$ – вихід придатних окатишів з оброблених, т;

$B0$ – ширина шару сирих окатишів на візку, м.

Впровадження режиму термічного оброблення окатишів у високому шарі дозволяє підвищити продуктивність машин за рахунок збільшення виходу продукції на 3,4 % і знизити витрату умовного палива на тонну придатних окатишів на 5,2 %. Питома продуктивність і питома витрата палива на тонну окатишів залежать від теплової схеми, яка визначає характер використання теплоти, що регенерується шаром. Економічність схеми термічного оброблення окатишів підвищується за рахунок скорочення втрат теплоти газоповітряного потоку, що складає 23,2 % і становить більше половини теплоти від горіння

палива. Залучення цієї теплоти в процес шляхом рециркуляції дозволяє заощадити паливо. Результати розрахунків показників роботи машини залежно від висоти шару окатишів показують, що спостерігається екстремальний характер зміни продуктивності з підвищенням висоти шару окатишів, а також безперервне зниження питомої витрати теплоти, що пов'язано з регенерацією теплоти в нижніх горизонтах шару. Різкий характер зміни продуктивності машини із ростом висоти шару окатишів пов'язаний з підвищенням його аеродинамічного опору. Внаслідок цього падає швидкість фільтрації і, відповідно, інтенсивність теплообміну в шарі, час нагріву окатишів до заданих температур починає збільшуватися. Зниження питомих теплових витрат вимагає ефективного вибору висоти шару окатишів залежно від потужності тягодуттьових засобів.

Отже, аналіз технологічних особливостей керування цим процесом показав:

- відомі технічні рішення з оброблення окатишів не завжди можуть забезпечити нормовані показники придатних окатишів, оскільки при керуванні термічним процесом існує вплив сусідніх зон, тому питання керування процесом термічного оброблення окатишів малодосліджені;

- на відміну від технологічних зон, де збурювання в контурі стабілізації параметрів теплоносіїв потоків зв'язані зі зміною температури верхнього шару окатишів, висоти і маси шару окатишів на візках конвеєрної стрічки, що надходять із сусідніх зон, носять відносно не визначений характер перехідного процесу, що не дозволяє використовувати відомі технічні рішення для забезпечення регламентних параметрів у зонах;

- у науково-технічній літературі слабо представлені питання погодженого керування процесом термічного оброблення окатишів у зонах машини;

- сформульовані основні вимоги до дотримання газодинамічних і температурних регламентних характеристик під час процесу керування термічним обробленням окатишів, які залежать від властивостей окатишів, висоти їхнього шару на візках конвеєрної стрічки і часу перебування в зоні;

- існує вимога в зниженні питомої витрати електроенергії на роботу тягодуттьових пристроїв (димотягів) і економію витрат природного газу, які

функціонально залежать від параметрів процесу при перерозподілі теплоносіїв між зонами конвеєрної машини і не враховується температура нижнього шару окатишів;

– існує вимога до визначення впливу параметрів сусідніх технологічних зон і потоків теплоносіїв на шар окатишів із метою вирівнювання температурно-часового режиму його обробки;

– для зменшення ймовірності незабезпечення регламентних параметрів придатних окатишів необхідно розробити модель, що описує керування процесу термічного оброблення окатишів, враховуючи основні параметри: окатишів, технологічних зон і обладнання, теплоносіїв газоповітряних потоків, швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки й обґрунтувати спосіб керування, враховуючи вплив кожної зони на іншу.

1.3. Аналіз математичних моделей для дослідження процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині

Керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрних машинах є однією з основних задач, що впливає на забезпечення регламентних параметрів у кожній зоні для отримання максимальної продуктивності та придатних окатишів для металургійного виробництва. Для вирішення цього завдання у теперішній час при експлуатації випалювальної машини конвеєрного типу використовуються окремі, не пов'язані між собою, наступні автоматизовані системи керування температурними режимами у кожній зоні, витратами природного газу і атмосферного повітря, газоповітряними потоками, швидкістю переміщення візків конвеєрної стрічки, тощо. Як правило, в сучасній структурній схемі для керування технологічним об'єктом використовуються наступні елементи: регулятори, виконуючі механізми і вимірюючі елементи. У функціональних і принципових схемах застосовують різну сучасну елементну базу програматори, контролери, мікро ЕОМ, цифрові задатчики і вимірюючі датчики, тощо. Удосконаленню і модернізації цих систем автоматизованого

керування присвячені наукові праці вчених [21–47]. Резюмуючи результати досліджень, виконаних відомими вченими, можна сказати, що запропоновані ними системи керування процесом термічного оброблення окатишів на випалювальній машині є нелінійними та нестационарними, не завжди відповідають сучасним вимогам і не забезпечують ефективного вирішення задач у реальних умовах цеху випалу фабрик огрудкування. На основі порівняльного аналізу технологічних аспектів задач керування процесом термічного оброблення окатишів зроблено висновок про актуальність проблеми автоматизованого керування при підвищенні енергоефективності технологічних процесів у режимі реального часу. Це дає можливість виконати аналіз динамічних моделей та методів оперативної ідентифікації процесу керування термічного оброблення окатишів.

Дотримання рівномірності нагріву шару окатишів, що не контролюється в сучасних випалювальних машинах, так само як і використання методу оптичного контролю температури нагріву, не дозволяють оперативно керувати процесом оброблення окатишів. У зв'язку з цим на сьогоднішній день виробники та дослідники створюють недостатньо ефективні методи та засоби автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів. Автори в роботі [48, 49] представили математичну модель, яка враховує розподіл температур у шарі залізородних окатишів і визначає вплив витрат природного газу кожного з пальників на рівномірність їх нагріву з урахуванням переміщення візків і початкового нагріву окатишів, що надходять у досліджувану зону машини. Для визначення зміни температури на кінець інтервалу часу кожного блоку шару окатишів, що знаходяться в зонах безпосереднього впливу лівого або правого пальників, вони запропонували використати формули (1.14) і (1.15):

$$\Delta T_L = \frac{Q_{KL}}{c_0 \cdot m_0 \cdot n_e} = \frac{K_e \cdot KКД_{II} \cdot N_L \cdot q_e \cdot dt}{c_0 \cdot m_0 \cdot n_e}; \quad (1.14)$$

$$\Delta T_R = \frac{Q_{KR}}{c_0 \cdot m_0 \cdot n_e} = \frac{K_e \cdot KKД_{II} \cdot N_R \cdot q_2 \cdot dt}{c_0 \cdot m_0 \cdot n_e}, \quad (1.15)$$

де c_0 – питома теплоємність газу, Дж/(кг*К);

m_0 – маса блока, кг;

q_2 – густина потоку газу, кг/м³;

N_L, N_R – витрати природного газу на лівому та правому пальниках м³/год.

Для визначення величини рівномірного нагріву ΔT_M усіх блоків окатишів на кінець інтервалу часу використовують формулу (1.16):

$$\Delta T_M = \frac{Q_{KM}}{c_0 \cdot m_0 \cdot a \cdot b \cdot h} = \frac{K_m \cdot KKД_{II} \cdot (N_L \cdot q_2 + N_R \cdot q_2) \cdot dt}{c_0 \cdot m_0 \cdot a \cdot b \cdot h}, \quad (1.16)$$

де a, b, h – розмірності масиву, що формуються відповідно до лінійних розмірів шару окатишів та елементарних складових, на які він розбивається.

За формулами (1.17) та (1.18) обчислюються кількості теплоти Q_{KL} і Q_{KR} , що уздовж інтервалу часу dt впливають на нагрів окатишів у зонах безпосереднього впливу лівого та правого пальників відповідно:

$$Q_{KL} = K_e \cdot KKД_{II} \cdot Q_L = K_e \cdot KKД_{II} \cdot N_L \cdot q_2 \cdot dt, \quad (1.17)$$

$$Q_{KR} = K_e \cdot KKД_{II} \cdot Q_R = K_e \cdot KKД_{II} \cdot N_R \cdot q_2 \cdot dt, \quad (1.18)$$

де Q_L і Q_R – кількості теплоти, що утворюються при згорянні природного газу уздовж інтервалу часу dt на лівому та правому пальниках, Дж/м³;

$KKД_{II}$ – коефіцієнт корисної дії пальника;

q_2 – густина потоку результуючого випромінювання.

Кількість теплоти Q_{KM} , що витрачається на загальний нагрів усіх окатишів уздовж інтервалу часу dt надано у формулі (1.19):

$$Q_{KM} = K_m \cdot KKД_{II} \cdot (Q_L + Q_R) = K_m \cdot KKД_{II} \cdot (N_L \cdot q_2 + N_R \cdot q_2) \cdot dt, \quad (1.19)$$

де K_g і K_m – коефіцієнти, значення яких знаходяться у межах від 0 до 1 та повинні задовольняти умову $K_g + K_m = 1$.

Для забезпечення максимальної кількості теплоти згоряння природного газу необхідно додатково постачати до пальників кисень у складі атмосферного повітря в обсягах, які визначаються за стехіометричним рівнянням спалювання окремих компонентів палива. Повітря одночасно надходить двома шляхами: безпосередньо до пальника та у форкамеру. Об'єм повітря V_0 , що забезпечує повне згоряння природного газу, обчислюється з урахуванням об'ємного процентного вмісту водню H_2 , сірководню H_2S вуглеводнів C_mH_n та кисню O_2 в природному газі та визначається за формулою (1.20):

$$V_0 = 0,0476 \cdot \left[0,5 \cdot CO_2 + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot C_mH_n - O_2 \right], \quad (1.20)$$

де H_2 , H_2S , C_mH_n , O_2 – об'ємний процентний вміст водню, сірководню, вуглеводнів та кисню в природному газі.

Запропонована математична модель дозволяє досліджувати процеси термічного оброблення окатишів у кожній зоні. Проте, ця модель не враховує впливи теплоносіїв потоку, зміну параметрів окатишів, їхню висоту шару на візках конвеєрної стрічки при переході з попередньої зони, не враховується їхній вплив на інші взаємопов'язані зони. Зокрема, інші дослідники пропонують використовувати математичні моделі для керування параметрами теплоносіїв потоку шляхом керування електроприводами ТДП [50]. У таких моделях застосовують алгоритми цифрового регулювання електроприводами, алгоритм роботи яких побудований за блоковим принципом і має блоки: формування завдання електромагнітного моменту і регулювання складових струму. Модель не враховує взаємодію технологічних зон, не визначає вплив одної зони на іншу. Не враховується у законі управління термічним процесом оброблення окатишів вплив зміни процесу газоповітряного потоку, зміну параметрів у

взаємопов'язаних технологічних зонах, переміщення візків конвеєрної стрічки з різною швидкістю.

Використання математичної моделі керування електроприводами ТДП потребує доповнення схемою автоматизованого управління, яка враховує технологічні параметри теплоносіїв потоку, таких як: тиск, температура, витрата тощо. Для доповнення автор роботи [51] пропонує враховувати газодинаміку шару окатишів, використовуючи рівняння Ергана (1.21):

$$\frac{\Delta p}{H} = 150 \cdot \mu \cdot V_0 \cdot a + 1,75 \cdot \rho v_0^2 \cdot b, \quad (1.21)$$

де Δp – перепад тиску за висотою шару окатишів, Па;

μ – динамічна в'язкість газу, Па·с;

V_0 – швидкість фільтрації газу через шар, м/с;

$$a = \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \cdot d^2}; \quad b = \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3 \cdot d}, \quad (1.22)$$

де ε – порозність шару, дол. од.;

d – еквівалентний діаметр окатишів, м;

ρ – щільність газу, кг/м³.

Динамічна в'язкість, щільність, теплоємність газів залежать від температури і меншою мірою від тиску. Температура впливає на теплоємність окатишів і повітря. Маючи залежності в'язкості, щільності, теплоємності газу, окатишів і повітря від температури можна визначити значення, що відповідають умовам кожної секції. Представлена математична модель дозволяє визначити ефективні керуючі впливи, які забезпечують зменшення питомої витрати енергоресурсів на випалювання окатишів та виконання технологічних вимог до окатишів. Недоліком математичної моделі є неврахування зміни значень діаметра окатишів через випаровування вологи з шару окатишів. Аналіз запропонованої автором

моделі враховує газодинаміку шару окатишів тільки в одній технологічній зоні, проте в роботі не приділяється достатньої уваги питанню впливу зміни параметрів сусідніх технологічних зон і потоків теплоносіїв на шар окатишів із метою вирівнювання температурно-часового режиму його обробки.

Автори Кривонос В. А. та Пірматов Д. С. пропонують на верхньому рівні періодично вирішувати завдання статичної оптимізації [52]. Суть її полягає в знаходженні такого режиму, в якому при заданих значеннях вектора швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки $V_{кв}$, середнього діаметра окатишів $d_{ср}$ і початкової вологості окатишів $w_{поч}$, тобто $X_{ex}=(V_{кв}, d_{ср}, w_{поч})$ характеристик потоку окатишів на вході машини, виконуються усі обмеження технологічного регламенту та досягається мінімальна питома витрата природного газу за розглянутий період часу T (1.23):

$$F = \int_0^t G_{гз}(t) dt / \int_0^t G_{ок}(t) dt, \quad (1.23)$$

де $G_{гз}$ – витрати природного газу, м³/год;

$G_{ок}$ – витрати окатишів, м³/год.

Автори досліджували окремі режими випалювальної роботи без врахування взаємного впливу окремих процесів розігріву, сушіння, опалювання, зміцнення і охолодження. Не розглядаються питання взаємодії закону управління термічним процесом оброблення окатишів і закону зміни швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки, що забезпечує регламентні технологічні параметри по зонам машини.

Інші дослідження базуються на нелінійних математичних моделях для різних зон і машин, що описують процеси газодинаміки, теплообміну між газовим середовищем і окатишами тощо [53–57]. Моделі дозволяють обчислювати значення середньої температури шару окатишів на виході із кожної зони, а також визначати вологості окатишів на виходах зон сушіння і попереднього нагрівання.

Аналіз конструктивного рішення з управління перерозподілу потоків показав, що деякі зони мають загальні керуючі впливи, що дозволило при вирішенні задачі ефективного використання витрат енергоносіїв об'єднати ці зони в групи. Для кожної групи сформовано локальний критерій якості, визначено підвищення енергоефективності, що забезпечує мінімізацію загального критерію ефективності режиму термічного оброблення окатишів. Це сприяє зниженню витрат теплоспоживання в зоні випалювання, а отже, знижується питома витрата природного газу.

Рішенням задачі верхнього рівня системи для ефективного режиму є таке значення U^0 вектора U управляючих впливів, при якому виконуються всі обмеження та досягається найменше значення функціонала (1.24):

$$F(U^0) = \min_{U \in U_{\text{дон}}} F(U) \quad (1.24)$$

де $U_{\text{дон}}$ – безліч допустимих значень вектора.

Складовими вектора є витрати природного газу та повітря на пальники зони випалювання, тиску та температури теплоносіїв у колекторах. Для визначення ефективного рішення використовуються пошукові процедури. Підвищення ефективності режиму термічного оброблення здійснюється раз у 5 хв. За вихідні параметри для запуску процедури ефективного управління використовуються усереднені значення швидкості $V_{\text{кв}}$ переміщення візків конвеєрної стрічки, середнього діаметра $d_{\text{ср}}$ гранул, вологості $w_{\text{ноч}}$. Час пошуку ефективного режиму не перевищує 18 с, як вказують автори робіт [53–57].

На нижньому рівні вирішуються завдання оперативної оцінки температури та вологості шару окатишів у контрольних точках усіх зон, а також стабілізації знайденого ефективного режиму в умовах дії збурень. Розробка подібних систем наведена в [10, 43, 44, 47]. Для забезпечення ефективного режиму випалу окатишів запропоновано використати систему автоматичного керування на основі модального регулятора. Загальна передавальна функція машини складається з

окремих передавальних функцій по кожному з параметрів і відповідно має вигляд діагональної матриці, завдяки цьому багатовимірна система складається з дванадцяти одновимірних підсистем. Унаслідок моделювання багатомірної системи автоматичного керування при використанні модального регулятора встановлено, що максимальна тривалість перехідного процесу складає 120 с, витрата повітря в зоні сушки мінімальна (одна секунда) при регулюванні висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки.

Удосконалення технологічного процесу керування обробленням окатишів можливе за допомогою визначення в режимі online кількості хімічних мікроелементів, що входять у склад не спечених окатишів і впливають на температурні поля шару окатишів та ГПП, змінюючи їхню вологість у технологічних зонах випалювальної машини. Задача, що розглядається, вирішується за рахунок того, що спосіб управління включає використання керуючих впливів математичної моделі процесу, алгоритмів адаптації математичної моделі на поточний процес й алгоритмів ефективного процесу термічного оброблення окатишів, у якому контролюють гранулометричний склад, насипну масу, хімічний склад і витрати не спечених окатишів і оперативно компенсують їх коливання. Так, авторами запропоновано проводити експрес-аналіз якості окатишів шляхом атомно-емісійної спектроскопії, за допомогою якої визначають кількість в окатишах хімічних мікроелементів *Fe, Ca, O, Si, S, C, H* тощо та їх співвідношення [58]. Для забезпечення регламентних величин при виконанні технологічних операцій, формуванні керуючих дій і передачі їх на виконавчі пристрої запропоновано включити ідентифікацію стану виконання технологічних операцій, таких як: швидкість переміщення візків КС, гранулометричний склад, насипну масу, витрату сирих і придатних окатишів, висоту шару окатишів і параметри ГПП. Для цього в математичній моделі [59] під час початкового запуску випалювальних машин для оброблення окатишів у режимі реального часу для одержання первинної інформації про зв'язки між керуючими та вихідними діями по черзі подають на виконавчі пристрої для кожної технологічної операції по три допустимих за величиною керуючих дій

відповідно: перша $U[n-3]$, друга $U[n-2]$ і третя $U[n-1]$. При подачі на виконавчий пристрій першої керуючої дії $U[n-3]$ реєструють на виході технологічної операції першу величину $X[n-2]$ тощо.

Враховуючи бажане значення вихідної величини технологічної операції $X^{\circ}[n+1]$ на наступний крок $[n+1]$ реєстрації, запропонований розрахунок для визначення кожного технологічного параметру керуючої дії $U[n]$ на поточному n -му інтервалі часу, який забезпечує задане значення вихідної величини $X^{\circ}[n+1]$ технологічної операції, за формулою (1.25):

$$U[n] = U[n-1] \frac{X^{\circ}[n+1]}{X[n]} - \frac{(U[n-2]X[n] - U[n-1]X[n-1])(X[n-1]X^{\circ}[n+1] - X^2[n])}{(X[n-2]X[n] - X^2[n-1])X[n]}, \quad (1.25)$$

де n – номер інтервалу часу;

$[n-1]$, $[n-2]$ – номери інтервалу часу, що передають;

$X^{\circ}[n+1]$ – бажане значення вихідної величини;

$U[n-3]$, $U[n-2]$, $U[n-1]$ – перша, друга і третя керуючі дії;

$X[n-2]$, $X[n-1]$, $X[n]$ – перша, друга і третя вихідні величини технологічної операції.

Запропонований підхід дозволяє зменшити до мінімуму кількість каналів контролю технологічних параметрів для автоматизованої системи управління за рахунок використання математичної моделі, що належить до класу непараметричних моделей та не потребує обчислення коефіцієнтів та знання фізики ТП, а також контролю в реальному часі збуджуючих впливів, які впливають на якість випалених окатишів. Проте, для реалізації математичної моделі потрібні дані виробничих процесів, які не завжди можливо отримати.

Математична модель термічного оброблення окатишів неякісно та неповно представляє процес термічної обробки окатишів з урахуванням температурного і газоповітряного режимів роботи технологічних зон сушіння, попереднього нагрівання, випалювання, рекуперації і охолодження. Не враховується в законі управління термічним процесом оброблення окатишів зміни висоти шару

окатишів, їх основності і вологи з урахуванням переміщення візків конвеєрної стрічки, що забезпечує регламентні технологічні параметри по зонам машини і покращує перерозподіл газоповітряних потоків між зонами машини.

Основним завданням іншої системи керування процесом обробки окатишів є забезпечення заданої точності нагріву (кінцева середньомасова температура) при мінімізації питомих витрат палива, тобто забезпечення підтримки ефективних теплових режимів. Унаслідок великої поширеності та технологічної значимості випалювальних машин з розподіленими параметрами створення таких систем є актуальним завданням. У роботах [60–64] сформульовані основні функції, які реалізуються імітаційно-оптимізуючим контуром управління об'єктами з розподіленими параметрами, запропонований варіант узагальненої переносної моделі технологічних процесів. Узагальнено наявний досвід застосування імітаційно-оптимізуючого контуру управління на прикладі ряду систем керування, зокрема, автоматизованої системи нагрівання матеріалу, як в статичній, так і в динамічній постановці. Зміна гранулометричного складу сирих окатишів, які надходять у випалювальну машину, впливає на ведення термічного оброблення окатишів, тому виникає необхідність у переналаштуванні параметрів технологічних режимів машини. Вирішення цього питання полягає у використанні АСК із безперервним веденням керуючих сигналів про хімічний склад окатишів при використанні атомно-емісійної термографії та визначенні фактичної маси візка конвеєрної стрічки з окатишами [58, 65]. Датчики ваги представлені у вигляді тензорезисторів та термокомпенсаторів, які з'єднані за мостовою схемою та встановлені на балках під колією. Прикладене вісью ролика візка механічне зусилля перетворюється на електричний сигнал (зміна напруги є функцією датчика ваги). На схемі (рис. 1.6) надані потоки інформації від відповідних датчиків, їх оброблення і контури регулювання, що необхідні для виконання керуючих впливів. Визначення ваги окатишів на візку встановлюється датчиками ваги в технологічних зонах випалювальних машин. Система керування дозволяє коригувати параметри термічної обробки та забезпечити ефективне

регулювання термічного процесу випалювання й газодинамічного режиму шару окатишів за довжиною машини.

Створена система керування процесом термічної обробки окатишів не враховує повною мірою вплив параметрів теплоносіїв потоку на параметри шару окатишів, оскільки надходження теплової енергії по висоті шару окатишів є нерівномірним і нестационарним при обробленні окатишів різного розміру, змінних висоти шару і швидкості руху газів у високотемпературних зонах випалювання і потребують різної кількості теплоти. Процес виробництва окатишів виконується без урахування взаємного впливу окремих процесів, сушіння, попереднього нагріву, випалювання, зміцнення і охолодження.

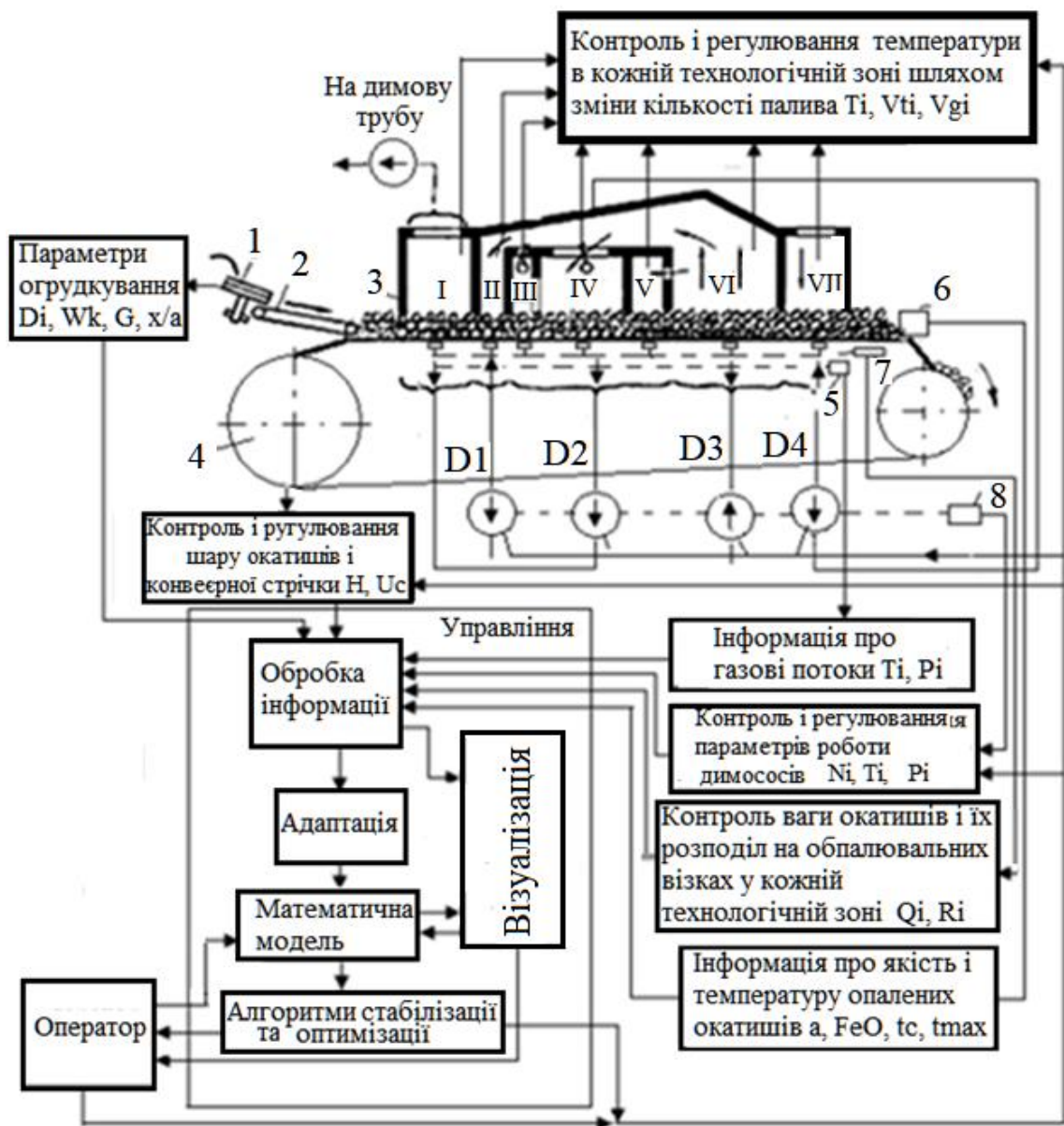


Рис. 1.6. Система керування термічним процесом машини конвеєрного типу

Існують системи управління випалювальних машин, які дозволяють контролювати та підтримувати на заданому рівні температури в різних технологічних зонах [66–73]. Автори враховують тільки більш важливий критерій дотримання рівномірності нагріву шару окатишів за його шириною, що не контролюється в сучасних машинах. Складність зняття реальних показників температурного режиму обпалення в шарі окатишів і інших параметрів не дозволяє отримати контрольовані дані, які необхідні для введення в систему керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині. Проте, математичне моделювання технології термічного оброблення окатишів не повно представляють технологічний процес термічної обробки окатишів, так як не враховуються вплив параметрів технологічного процесу взаємопов'язаних технологічних зон.

В роботі [49] запропонована система керування з використанням математичної моделі розподілу температур уздовж ширини шару окатишів. Структурна схема надана на рис. 1.7.

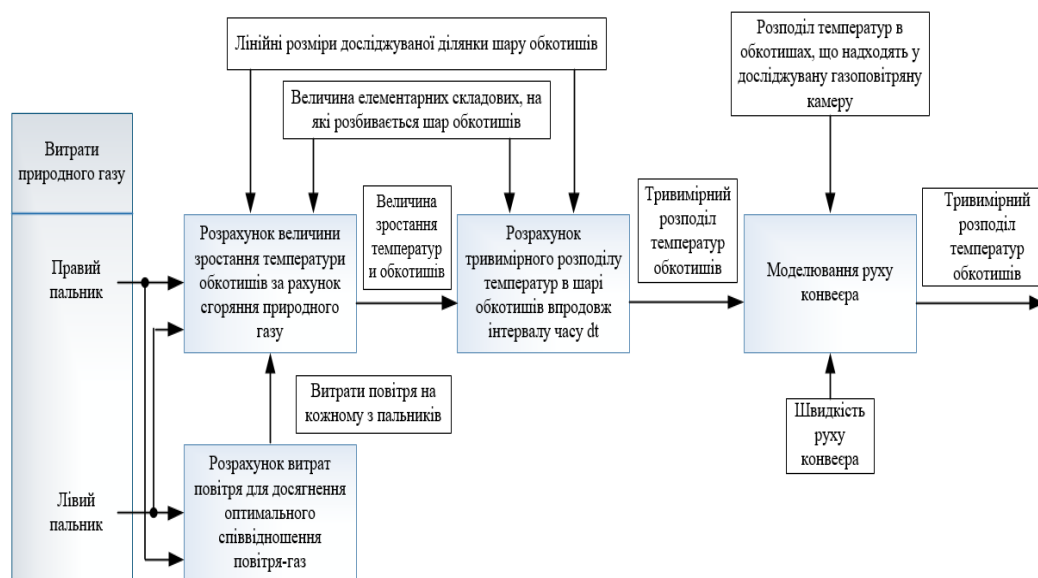


Рис. 1.7. Структурна схема моделі розподілу температур шару окатишів в окремії газоповітряній камері

Система, що розглядається, оперує не точковими значеннями температур

шару окатишів, виміряними у визначених позиціях, а розподілом температур по всьому об'єкту керування. Такий підхід до керування процесом оброблення окатишів дозволяє спрогнозувати зміни температури шару окатишів на основі значень поточних витрат природного газу на кожному із пальників, що дозволяє більш ефективно використовувати паливо. Проте, модель враховує тільки розподіл температур шару окатишів у окремій газоповітряній камері, не враховуючи повну і цілеспрямовану подачу теплоносіїв газоповітряного потоку від взаємопов'язаних технологічних зон із необхідними параметрами, що позначиться на витратах енергоносіїв.

Розвиток і застосування сучасної елементної бази дозволяє вивести на новий рівень функціонування систем керування процесом термічного оброблення окатишів, що включають експертні системи і системи штучного інтелекту [21,56, 74–76]. Розроблені дворівневі системи керування машинами типів: ОК-306, ОК-1-324/336 та інших. Для першого типу машини представлена система на рис. 1.8.

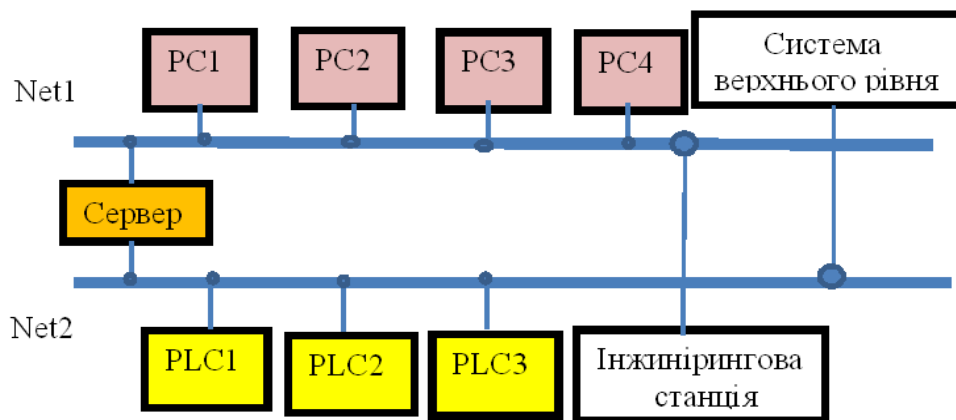


Рис. 1.8. Структура комплексу технічних засобів системи управління випалювальної машини типу ОК-306

Вона містить верхній і нижній рівні керування створені для підвищення продуктивності їхньої роботи, оперативності управління, підвищення якості окатишів, зниження питомих енерговитрат і захисту від неполадок обладнання машини. На рівні процесу впроваджені контролери Simatic S7-400 фірми Siemens (PLC1, ..., PLC3). Для програмування контролерів Simatic S7-400

використовувалися стандартні пакети програм Step 7, CFC, SCF. Система верхнього рівня реалізує спеціальне програмне забезпечення, побудоване на основі математичних моделей. Інжинірингова станція необхідна для обслуговування. Програмне забезпечення використовується для програмування контролерів і системи візуалізації. Розробка і впровадження на ГЗК й експлуатація автоматизованих систем керування забезпечили зниження питомих витрат природного газу на 9,57 % й електроенергії на 7,9 % при збільшенні продуктивності конвеєрної машини на 4,35 %. Керування процесом термічного оброблення окатишів з використанням такої моделі без урахування взаємодії з взаємопов'язаними технологічним зонами не забезпечує регламентну якість придатних окатишів.

Для врахування впливу висоти шару окатишів на температурний режим у технологічній камері конвеєрної машини розроблена інша система на основі регулятора стану [75]. Схема представлена на рис. 1.9. Система має контур регулювання для стабілізації температури окатишів і блок корекції завдання за температурою шару. Прогнозуюча модель змінює температури шару окатишів за висотою його нагрівання.

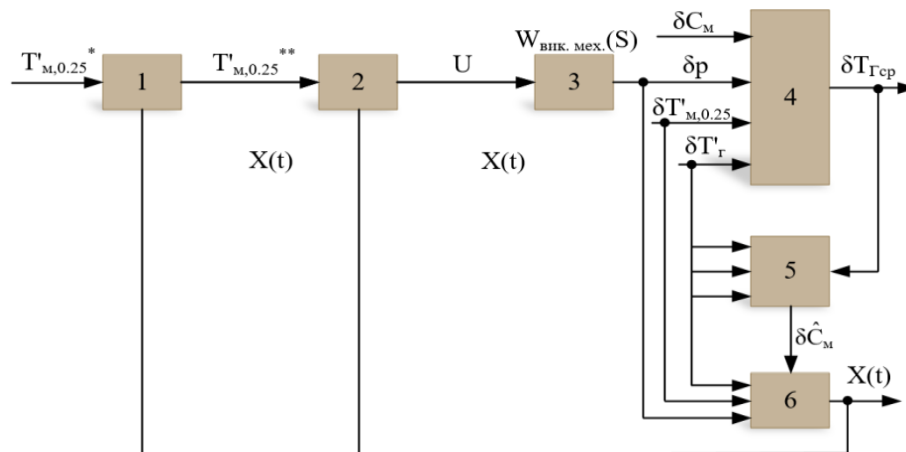


Рис. 1.9. Структурна схема системи автоматичного регулювання температури шару по висоті: 1 – блок алгоритму шифрування, 2 – регулятор стану, 3 – виконавчий механізм, 4 – модель теплоносія, 5 – спостерігач стану, 6 – модель шару окатишів

Входами для системи є сигнали δp і $\delta T'_2$, а виходом – модель шару попередньої зони $\delta T'_{m,0.2.5}$. ТП оцінюється спостерігачем значення δC_m . Координати стану, що отримані за моделлю, надходять на вхід регулятора стану для вироблення керуючого впливу, а також у блок корекції завдання за температурою шару. Стабілізація ефективного режиму оброблення окатишів у ВМКТ зменшує кількість витрат природного газу від 2 до 3,5 %.

Унаслідок аналізу існуючих систем автоматичного керування встановлено, що в роботах не приділяється достатньої уваги питанням впливу параметрів сусідніх технологічних зон і потоків теплоносіїв на шар окатишів із метою вирівнювання температурно-часового режиму його обробки. Виходячи з того, що надходження теплової енергії за висотою шару є нерівномірним і для термічного оброблення окатишів змінного розміру потрібна різна кількість теплоти, актуальними стають дослідження з визначення кількості теплоносія, необхідного для рівномірного оброблення окатишів заданої висоти шару на візках конвеєрної стрічки.

В роботі [10] розглянуті спосіб дії і математичний опис випалювальної печі, як об'єкта автоматичного управління змінним розрідженням газів. Розглядається загальна схема печі, що містить робочий канал, який умовно розділений на ЗС, ЗПН, ЗВ і ЗВ; вентилятор відбору теплоносія, встановлений в кінці ЗО; вентилятор подачі атмосферного повітря в ЗО, опалювальну систему. Система має вентилятори для відбору димових газів, розміщений перед ЗС, і відведення гарячого повітря із ЗО. Вентиляційна система має певну кількість блоків, послідовно розподілених по ЗС. Перед вентилятором відбору димових газів встановлений регулюючий клапан з редуктором і електричним двигуном, який входить в систему автоматичного регулювання розрідження і підтримує в ЗВ печі змінне значення розрідження. У систему автоматичного управління змінним розрідженням газів в печі (рис. 1.10) входять: датчик розрідження газів в печі, підсилювач сигналу постійного струму від датчика розрідження, керуюча обчислювальна машина, пристрій зв'язку з об'єктом управління, підсилювач сигналу постійного струму від КВМ, що підводиться до моторного електричному

виконавчого механізму, редуктор механічний, шибєрний регулюючий клапан, безперервно змінює розрідження газів у ЗВ і підготовки печі.

Функціональні елементи відповідають наступним елементам на рис. 1.10: ПП1 – вимірювальний перетворювач тиску типу Метран-22; П1, П2 – підсилювачі постійного струму; Зд – задає пристрій значення регульованого розрідження газів; Т – квантователь безперервного сигналу в дискретний сигнал; Р – цифровий регулятор; Ф – екстраполятор нульового порядку (фіксатор); ВМ – моторний електричний виконавчий механізм з механічним редуктором; РК – шибєрний регулюючий клапан; ОК – об'єкт керування, в який входять зони підготовки і випалу печі, розташовані в робочому каналі.

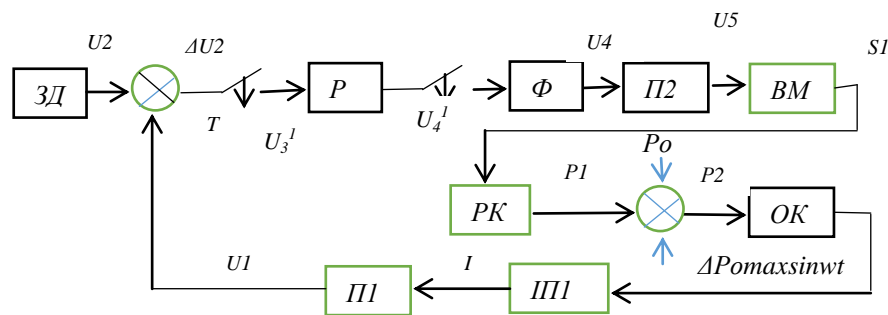


Рис. 1.10. Функціональна схема САУ змінним розрідженням газів в печі

Сигнали на функціональній схемі (рис. 1.10) мають наступні найменування: $P1$ – змінне розрідження газів ЗПН і ЗВ печі, Па; I – струм постійної напруги на виході вимірювального перетворювача ПП1, А; $U1$ – напруга постійного струму на виході підсилювача ПП1, В; $U2$ – напруга постійного струму на виході пристрою, що задає Зд, В; ΔU – різниця напруги постійного струму, що надходять від підсилювача постійного струму ПП1 і пристрою, що задає Зд, В; U_3^1 – вхідний дискретний сигнал по напрузі в цифровий регулятор Р, В; U_4^1 – вихідний дискретний сигнал по напрузі цифрового регулятора Р, В; $U4$ – напруга на виході екстраполятора нульового порядку Ф, В; $U5$ – напруга постійного струму на виході підсилювача ПП2, В; $S1$ – переміщення регулюючого шибєрного затвора клапана, м; $P1$ – розрідження газів на вході регулюючого клапана, Па; $P0$ –

статичний тиск, що підводиться в ЗПН і ЗВ печі, Па; $\Delta P_{omaxsinwt}$ – змінне розрідження газів, що створюється при періодичних збурень шибєрного регулюючого клапана, Па; $P2$ – статичне і змінне розрідження газів, що створюється при періодичних збуреннях шибєрного клапана, що регулює, Па.

На підставі теоретичного аналізу динамічних властивостей функціональних елементів функціональної схеми керованого процесу, на рис. 1.11 відображена структурна схема керованого процесу САК змінним розрідженням газів у печі.

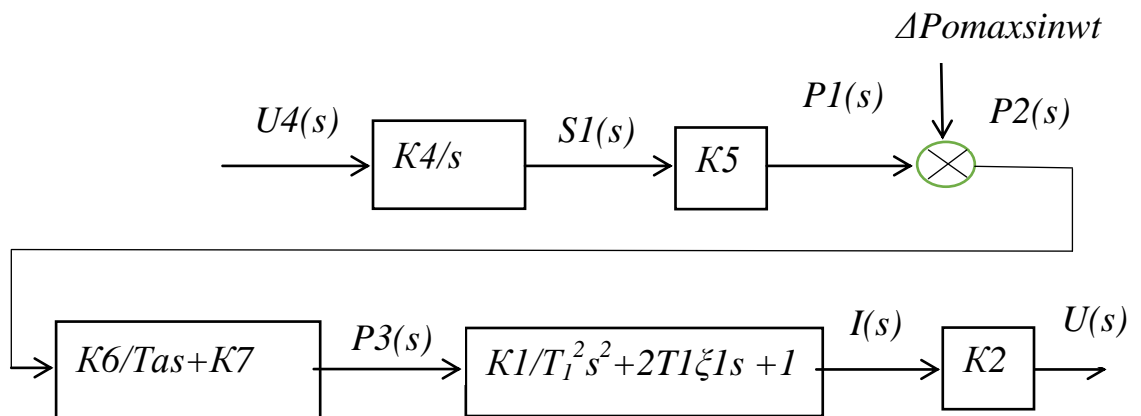


Рис. 1.11. Структурна схема керованого процесу САК змінним розрідженням газів у печі випалювання

Узагальнена структурна схема цифрової САУ змінним розрідженням газів у печі, наведена на рис. 1.12.

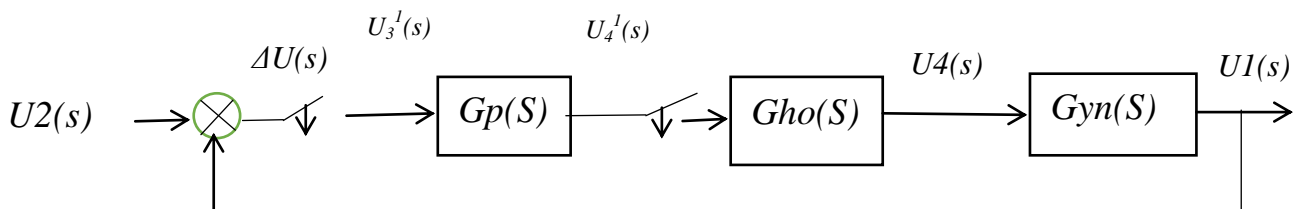


Рис. 1.12. Структурна схема цифрової САУ змінним розрідженням газів у печі

Позначення величин на рис. 1.12: $U2(s)$ – керуючий сигнал від пристрою, що задає, В; $U3^1(s)$ – дискретний сигнал на вході цифрового регулятора, В; $U4^1(s)$ – дискретний сигнал на виході цифрового регулятора, В; $U1(s)$ – вихідний сигнал

САУ змінним розрідженням газів в печі випалювання керамічних стінових виробів – напруга на виході підсилювача, підключеного до вимірювального перетворювача ШП1, В; $U4(s)$ – сигнал напруги на виході екстраполятор нульового порядку, В; $Gp(S)$, $Gho(S)$, $Gyn(S)$ – передавальні функції цифрового регулятора, екстраполятор нульового порядку і керованого процесу.

Відповідно до структурної схеми (рис. 1.12) САК змінним розрідженням газів у печі, передавальна функція керованого процесу $Gyn(S)$, згідно (рис. 1.11), має вигляд:

$$Gyn(S) = \frac{K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6}{(T_1^2 s^2 + 2\xi_1 T_1 s + 1) + (T_a + K_7)}. \quad (1.26)$$

Для керованого процесу САК змінним розрідженням газів в печі випалювання потрібно встановити чисельні значення параметрів передавальної функції для виразу (1.26).

Важливою перевагою, що додатково зумовлює перспективність використання цифрових систем і логічних систем з нечіткою логікою для реалізації моделей в схемі керування, є той факт, що нечіткі правила можуть бути представлені у вигляді сукупності лінійних динамічних моделей. Такі системи дозволяють використовувати логічні вирази, отримані для моделей систем в просторі станів, для розрахунку керуючих дій.

Отже, проведений аналіз стану математичного опису процесів керування температурної обробки окатишів показав, що напрямком рішення завдання синтезу математичної моделі технологічного процесу є перспективне використання сучасних методів оперативної ідентифікації, зокрема систем з нечіткою логікою. Для забезпечення термічного процесу оброблення окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу використовуються різні схеми автоматичного керування. Деякі з них представлені вище у цьому розділі. Більш детальний опис структурної і функціональної схем із визначенням вхідних і вихідних змінних і збурення надано у [25]. Один із варіантів структурної схеми досліджуваної моделі САК наведено на рис. 1.13.

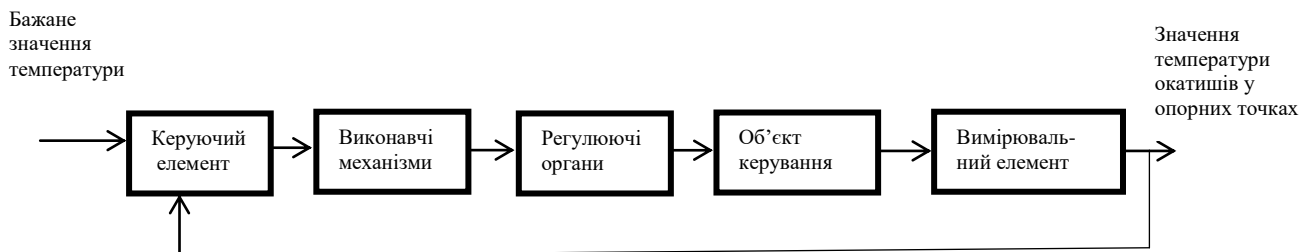


Рис. 1.13. Структурна схема САК рівномірності нагріву шару окатишів

На вхід САК подається бажане значення температури, що задовольняє технологічним умовам обпалювання окатишів. САК має два незалежні контури керування для лівого та правого пальників, у кожному з яких окремо регулюються витрати природного газу. Керуючий елемент, що формує управляючі сигнали витрат природного палива на праві та ліві пальники, порівнює отримані з вимірювального елемента в опорних точках значення температур із бажаним та формує керуючі сигнали, що несуть у собі інформацію стосовно змін витрат природного газу на лівому та правому пальниках. Виконавчі механізми змінюють положення регулюючих дросельних заслінок на кожному з пальників, що спричинює зміни витрат газу. Виконавчі механізми представлені синхронними сервоприводами.

В залежності від витрат природного газу регулюється надходження повітря до форкамер та безпосередньо до самих пальників. Це забезпечує ефективне співвідношення «повітря-газ». У результаті згоряння палива на виході об'єкту керування формується температурне поле, окремі значення якого фіксуються вимірювальним елементом (групою з чотирьох пірометрів). Результати вимірювання повторно надсилаються до керуючого елемента. Для забезпечення стійкості перехідних процесів у контурах керування використовуються ПІД-регулятори. На структурній схемі регулятори не винесені в окремі блоки, а вважаються складовими частинами загального керуючого елемента.

Функціональну схему САК рівномірності нагріву шару окатишів наведено на рис. 1.14 [25]. Керуючі сигнали в обох контурах керування формуються на основі значень температур опорних точок у контурах керування лівого і правого

пальників. Бажане значення температури поверхні шару окатишів задається на вході САК.

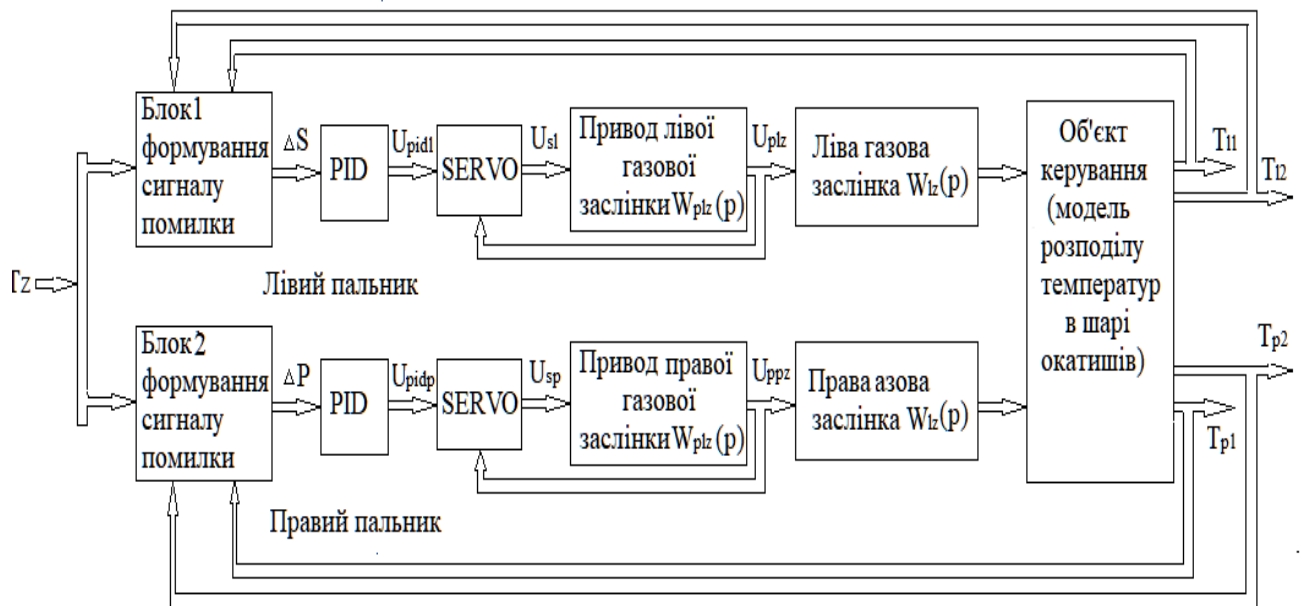


Рис. 1.14. Функціональна схема САК рівномірності нагріву шару окатишів

Для визначення помилки регулювання температури окатишів у зоні безпосереднього впливу лівого пальника необхідно обчислити різницю між бажаним та вимірним значеннями температури.

Аналіз існуючих систем автоматичного керування встановив, що в сучасних автоматизованих системах термічного оброблення окатишів на ВМКТ САК не тільки безперервно не контролює процес у керованій зоні, а й повністю автоматично не утримує ефективні тепловий і газоповітряний режими у кожній технологічній зоні, тому що не враховується вплив значень параметрів взаємопов'язаних зон і потоків теплоносіїв на шар окатишів із метою вирівнювання температурно-часового режиму його обробки. Не приділяється достатньої уваги питанням впливам швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки, основності, вологи і висоти шару окатишів, які змінюють свої значення параметрів від однієї зони до іншої.

Внаслідок аналізу існуючих систем автоматичного керування встановлено, що в роботах не приділяється достатньої уваги питанням впливу

параметрів взаємопов'язаних технологічних зон і потоків теплоносіїв на шар окатишів із метою вирівнювання температурно-часового режиму його обробки. Виходячи з того, що надходження теплової енергії за висотою шару є нерівномірним і для термічного оброблення окатишів змінного розміру потрібна різна кількість теплоти, актуальними стають дослідження з визначення кількості теплоносія, необхідного для рівномірного оброблення окатишів заданої висоти шару на візках конвеєрної стрічки.

Висновки до розділу 1

У даний час існує тенденція збільшення попиту на придатні залізородні окатиші, які використовують у чорній металургії для доменного плавлення або електрометалургійного перероблення, що дає змогу підвищити продуктивність металургійних агрегатів, аналіз яких показав, що їх відмінними рисами є висока енергоємність, різноманітність режимів роботи з різною динамікою і нестационарність параметрів. У світовій науці не припиняються роботи з пошуку технологічних заходів виробництва окатишів. Виконуються дослідження процесу термічної обробки сирих окатишів на машинах конвеєрного типу, що мають неперервний і енергоємний процес, які направлені на покращання техніко-економічних показників та якості продукту створення.

Метою створення сучасних автоматизованих систем термічного оброблення окатишів на ВМКТ є рішення задач ефективного управління технологічним режимом для поліпшення техніко-економічних показників процесу випалювання. Критерієм якості роботи відомих систем є забезпечення заданої точності управління, яка визначається величиною дисперсії коливання показників якості, і підтриманням їх на заданих умовах.

Відомі системи керування процесом термічного оброблення окатишів на ВМКТ забезпечують автоматичне управління і контроль технологічного процесу і вирішує наступні завдання: автоматизоване управління процесом з коригуванням контролерами завдань окремим контурам стабілізації; автоматичне керування

окремими технологічними параметрами; автоматичний збір, обробку та подання інформації на екрани монітора і пульти. Сучасні автоматизовані системи термічного оброблення окатишів на ВМКТ також реалізують інформаційні та керуючі функції з управління деякими окремими функціями технологічного процесу. До керуючих функцій відомих систем відносяться функції для вироблення і реалізація управляючих впливів на окремі частини технологічних об'єктів управління, наприклад, стабілізація основних технологічних параметрів (витрати дуттьового повітря і палива в форкамеру; витрати дуттьового повітря в трубопроводі; тиску (розрідження) газів у технологічних зонах; стабілізація швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки), тощо.

Проте, в сучасних автоматизованих системах термічного оброблення окатишів на ВМКТ обчислювальний комплекс не тільки безперервно не контролює процес у керованій зоні, а й повністю автоматично не утримує ефективний тепловий режим у кожній технологічній зоні, тому що не враховується вплив значень параметрів взаємопов'язаних зон. Перспективним напрямом для ефективного температурного режиму і мінімізації витрат енергоносіїв є керування процесами термічного оброблення окатишів у технологічних зонах конвеєрної машини на основі використання нечіткої і неповної інформації про стан технологічного об'єкта, що до теперішнього часу не вирішено, враховуючи як взаємодіють між собою і впливають одна на одну технологічні зони. Впровадження такої системи керування процесом термічного оброблення окатишів дозволить раціонально використовувати енергетичні витрати, що є актуальною науковою задачею.

В Україні і зарубіжних країнах знаходяться в експлуатації випалювальні машини конвеєрного типу різних типів. За продуктивністю тільки одна фабрика огрудкування ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат», має машини конвеєрного типу ОК-1-324/336 і зможе покрити потребу України і навіть експортувати придатні окатиші на світовий ринок. Аналіз вимог до придатних окатишів дозволив сформулювати основні вимоги до товарної продукції:

– необхідно забезпечити максимальну точність виробництва окатишів із такими технічними параметрами: основність – 1,2, вміст заліза – 62,5 % і 65 % (підвищеної якості), міцність – 160–180 кг на окатиш при мінімальних витратах енергоносіїв і мінімізації порушень технологічного процесу;

– необхідно забезпечити термодинаміку фізичних процесів у кожній взаємопов’язаній технологічній зоні шляхом раціонального використання газоповітряних потоків й усунення наявності некондиційних окатишів.

Внаслідок аналізу процесу термічного оброблення окатишів для кожної взаємопов’язаної технологічної зони встановлено:

– керування процесом термічного оброблення окатишів без урахування взаємодії його з взаємопов’язаними технологічними зонами не забезпечує регламентну якість придатних окатишів;

– існуючі теплові схеми машини потребують більш повної та цілеспрямованої подачі теплоносіїв газоповітряного потоку з необхідними параметрами у взаємопов’язані технологічні зони, що позначається на витратах енергоносіїв; можливим напрямом у підвищенні якості придатних окатишів є керування температурним режимом з урахуванням параметрів взаємопов’язаних технологічних зон;

– відомі результати теоретичних та експериментальних досліджень, аналіз наукової та патентної літератури, математичне моделювання термодинаміки і процесів у технології термічного оброблення окатишів не завжди якісно та повно представляють процес термічної обробки окатишів; для усунення цих недоліків перспективним є використання нечітких і неповних параметрів технологічного процесу;

– при створенні систем керування процесом термічної обробки окатишів не враховується повною мірою вплив параметрів теплоносіїв потоку на шар окатишів, оскільки надходження теплової енергії по висоті шару окатишів є нерівномірним і для оброблення окатишів різного розміру, висоти шару і швидкості руху газів у високотемпературних зонах випалювання потребують різної кількості теплоти.

Головним напрямом у підвищенні якості придатних окатишів є керування процесами їх термічного оброблення у технологічних зонах конвеєрної машини на основі використання нечіткої і неповної інформації про стан технологічного об'єкта, враховуючи як взаємодіють між собою і впливають одна на одну технологічні зони, стабілізуючи температурний режим і мінімізуючи витрату енергоносіїв.

Зроблені висновки дозволяють сформулювати наступні задачі досліджень по відношенню до процесів виробництва окатишів.

1. Створити комплексну імітаційну модель керування процесів виробництва окатишів.

2. Обґрунтувати режими роботи ВМКТ із виділенням режимів роботи, що визначають властиві параметри продукції (ефективність роботи агрегатів).

3. Обґрунтувати та визначити фізичні параметри, що є унікальним відображенням у фізичні площині певного режиму роботи ВМКТ.

4. На основі визначених закономірностей в інформаційних сигналах, що властиві лише певним режимам роботи ВМКТ визначити інформативні критерії протікання цих режимів роботи.

5. Створити інформативну компоненту ВМКТ на основі сукупності незалежно працюючих систем нечіткого автоматичного керування його режимами роботи, що забезпечують пошук та підтримку ефективних режимів роботи ВМКТ.

6. Розробити спосіб забезпечення злагодженої та сумісної роботи систем нечіткого автоматичного керування режимами роботи ВМКТ, що дозволяє кожній системі, незважаючи на їх перехресний вплив на режими роботи, якими вони керують, здійснювати ефективно й незалежно керування окремими режимами роботи ВМКТ.

7. Експериментально оцінити ефективність роботи створеної інформативної компоненти ВМКТ.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ ПРИ НЕПОВНИХ І НЕЧІТКИХ ЗНАЧЕННЯХ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗОН

2.1. Структурна схема імітаційної комплексної моделі для процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині

Більшість існуючих способів і методів автоматизованого керування термічним процесом оброблення окатишів на конвеєрних машинах в умовах фабрики огрудкування ГЗК розглядають незалежне керування окремими зонами, агрегатами або локальними процесами. Проте, дослідження складних технологічних процесів доцільно проводити з використанням комплексних математичних моделей для окремих зон і машин. Результати для багатьох виробничих процесів у різних галузях промисловості наведено в роботах [77–81]. Так, у роботі [77] автором запропонована комплексна математична модель електромеханічної температурної системи ділянки охолодження дровового стану гарячої прокатки. Інше дослідження [78] присвячене створенню критерію функціональної ефективності вантажопідіймального крана у формі комплексної математичної моделі. У монографії [79] представлені сучасні методи моделювання теплових об'єктів з розподіленими параметрами. Стаття [80] присвячена ефективному складу вуглеводневої сировини в процесі ізомеризації пентан-гексанової фракції з використанням комплексної математичної моделі. Інші автори пропонують проводити комплексний тепловий розрахунок турбіни [81]. Проте, результати цих робіт не можуть бути використані у повному обсязі. Тому нами запропонована структурна схема для розробки комплексної математично моделі для дослідження процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині. Вона має вигляд, представлений на рис. 2.1. Головною ідеєю імітаційної моделі є те, що вхідні параметри технологічних зон є

вихідними параметрами з попередньої зони і навпаки – вихідні параметри цієї зони є вхідними параметрами для наступної зони [116].

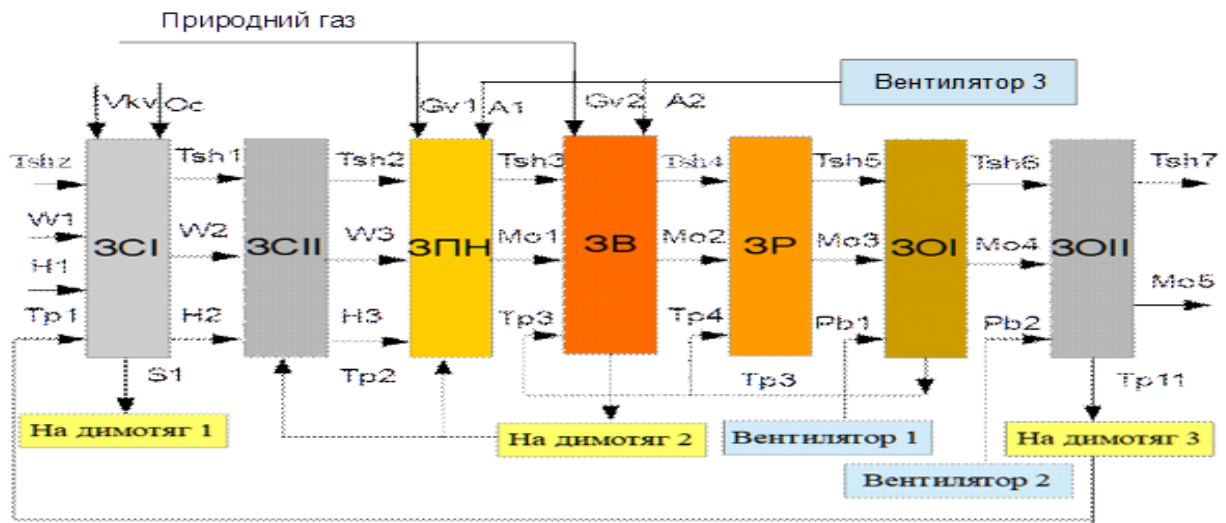


Рис. 2.1. Імітаційна комплексна модель для дослідження процесу керування термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині

Виходячи з результатів аналізу отриманих експериментальних даних технологічного процесу керування оброблення окатишів на ВМКТ ділянки випалювання фабрики огрудкування ГЗК визначені найбільш впливові параметри технологічного процесу, що дають можливість виконати синтез автоматичної системи, який визначає структуру й параметри системи за заданими показниками якості. При проектуванні системи подалі визначаємо алгоритмічну й функціональну структуру, тобто вирішити завдання повного синтезу. При цьому головною задачею є підвищення енергоефективності теплового процесу технологічної зони з урахуванням взаємопов'язаних технологічних зон. Для першої зони сушіння вхідними параметрами є: задана температура верхнього шару окатишів у зоні T_{shz} , висота шару окатишів H_1 , їхній вміст вологи W_1 та основність O_c , швидкість конвеєрних візків V_{kv} , температура газоповітряного потоку Tr_1 , що надходить із другої зони охолодження. До вихідних параметрів належать температура верхнього шару окатишів T_{sh1} , висота їхнього шару H_2 , вміст вологості окатишів W_2 , розрідження S_1 , яке надходить на димоцяг 1 і видаляється з цієї зони. T_{sh} – є важливим параметром для врахування

температурного розподілу шару окатишів у зонах високих температур і зонах охолодження, для врахування необхідної кількості палива та ефективного тиску потоку теплоносіїв для їх проходження через шар. Перелічені параметри є вхідними для другої технологічної зони сушіння. У цю зону і зону попереднього нагрівання додається ще один вхідний параметр – температура потоку T_{p2} , що відходить із зони випалювання та є основним теплоносієм для сушіння окатишів.

Для зони попереднього нагрівання відсутній параметр вмісту вологи, що обумовлюється остаточним видаленням вологи у попередніх зонах. Оскільки ця зона є попередньою для випалювання окатишів, то для неї враховуються питома витрата палива G_{v1} і атмосферного повітря $A1$. На інжекторні пальники подається регламентоване співвідношення газ-повітря у відношенні 1:10. Для зони випалювання надходить газ G_{v2} й атмосферне повітря $A2$ у тому ж відношенні, що для зони попереднього нагрівання. Такі параметри, як температури верхніх шарів окатишів T_{sh3} – T_{sh6} та маси окатишів на візках M_{o1} – M_{o5} є вхідними для наступних зон. Це обумовлюється складними фізико-хімічними реакціями, що впливають на параметри шару окатишів. Температура теплоносія потоку T_{p3} із першої зони охолодження подається до зон випалювання та рекуперації. Із зони випалювання транспортується відпрацьований теплоносієм димотягом 2 в другу зону сушіння й зону попереднього нагрівання. Нагнітання тиску атмосферного повітря P_{b1} і P_{b2} вентиляторами 1 і 2 використовується для охолодження шару окатишів у відповідних зонах. Димотяг 3 транспортує теплоносієм газоповітряного потоку в першу зону сушіння.

Для роботи імітаційної комплексної моделі для процесу керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу залишаються використовуватися локальні підсистеми керування температурами ГПП над верхніми шарами окатишів у технологічних зонах, швидкістю переміщення візків КС та інші, що існують при експлуатації сучасних ВМКТ, але надалі вони будуть удосконалюватися.

У кожній технологічній зоні окатиші знаходяться визначений проміжок часу. Відповідно процес термічного оброблення окатишів можна уявити ланкою,

представленою передавальною функцією. Параметри ланок визначаються відомими регламентними значеннями вхідних і вихідних параметрів. Проте, часто виникає така ситуація, коли ми не можемо зі стовідсотковою ймовірністю стверджувати, як протікає термічний процес оброблення окатишів на машині. У цьому випадку класична теорія управління дає збій і ми не можемо побудувати алгоритм на основі наших міркувань. Проте, оперуючи неповними і нечіткими множинами і вводячи лінгвістичні змінні, ми створимо алгоритм на базі неявної логіки. Цей алгоритм переводиться в програмний код. Природно, що подібні рішення на стику інформатики і безлічі інших наук отримали широке розповсюдження в програмуванні та з успіхом використовується при автоматизації процесу термічного оброблення окатишів на машині. У структурі нечіткої моделі управління машиною, крім її традиційної реалізації, пропонується застосувати оцінку і, за необхідністю, налаштування її параметрів, а також використовувати в системі автоматичного управління нечітких множин для кожної зони і представляти на базі блочно-послідовної структури систему з керованими регуляторами нечіткої логіки [82–87]. Структурна схема автоматизації термічного процесу оброблення окатишів на машині із пристроями нечіткої логіки показана на рис. 2.2.

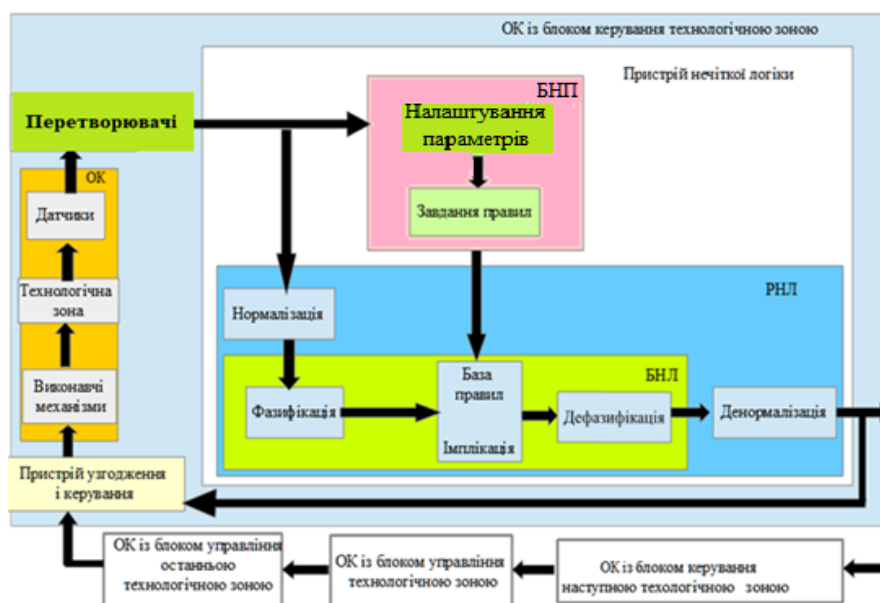


Рис. 2.2. Схема автоматизації термічного процесу оброблення окатишів на конвеєрній машині з пристроями нечіткої логіки

Автоматичне керування температурними режимами кожної технологічної зони виконується комбінованою системою регулювання високої точності, що поєднує в собі принципи керування із замкненими контурами за відхиленням і збуренням, яка має ланку компенсації помилки від впливу значень неповних і нечітких технологічних параметрів взаємопов'язаних зон машини. Ланка компенсації помилки предствляє собою пристрій нечіткої логіки. Вона корегує роботу існуючої на виробництві основної схеми керування технологічним процесом, наприклад, температури газоповітряного потоку, тиску атмосферного повітря, тощо.

Схема складається з блоків управління зоною, які включені послідовно і кількість яких залежить від типу машини. Кожен блок має об'єкт керування (ОК), пристрій нечіткої логіки, до складу якого входять: регулятор нечіткої логіки (РНЛ) і блок настройки параметрів (БНП). ОК представляє технологічну зону, яка зв'язана з датчиками і виконуючими механізмами, що взаємодіють з пристроєм узгодження і керування. Регулятор утворений з блоку нечіткої логіки (БНЛ), нормалізації та денормалізації. БНП має можливість налаштувати параметрів і формувати правила.

Блок нечіткої логіки містить в собі три головні блоки: блок фазифікації, блок формування логічного рішення, блок дефазифікації.

Датчики вимірюють поточні значення параметрів машини та здійснюють введення інформації через перетворювачі в регулятор. У ньому відбуваються процеси фазифікації і дефазифікації [88–90], після завершення останнього виконується моделювання, збираються статистичні дані з датчиків, що описують взаємозв'язок між вхідними та вихідними впливами нечіткої моделі управління машини. Головною задачею формування лінгвістичних правил є створення такого модуля управління, щоб при отриманні певних вхідних сигналів на виході був коректний вихідний сигнал. Вхідні та вихідні множини необхідно представити у вигляді діапазону значень, тому для параметра x_1 такий діапазон позначимо $[x_1^{min}, x_1^{max}]$, для x_2 відповідає має бути діапазон $[x_2^{min}, x_2^{max}]$, для очікуваного

вихідного сигналу d – діапазон $[d^{min}, d^{max}]$. Ступінь деталізації об'єкта залежить від кількості умов (розбиття на підмножини).

Декомпозиція дуже важлива і впливає на продуктивність контролера в реальних пристроях управління. Для опису автоматизованої роботи кожної зони за допомогою нечітких множин уявімо, що кожна з вхідних і вихідних змінних регулятора розглядається як лінгвістична змінна. При термічному процесі оброблення окатишів на ВМКТ сирі окатиші відповідної маси з вмістом залізорудного концентрату, добавок бентоніту тощо транспортуються вздовж технологічних зон на візках КС. За такої умови витримуються регламентні тепловий і газодинамічний режими [7, 52, 57]. З огляду на це слід визначити потенційно можливі критерії ефективності, формули (2.1) і (2.2):

$$Q = F(Gvi, EE) \Rightarrow \min; \quad (2.1)$$

$$Gvi \Rightarrow \min; EE \Rightarrow \min, \quad (2.2)$$

де Q – витрати дільниці ФОГ на виробництво однієї тонни окатишів, грн;

F – деяка встановлена функціональна залежність;

Gvi – загальні витрати природного палива, які залежать від кількості зон, м³;

EE – загальні витрати електричної енергії димотягами й вентиляторами.

Пристрій узгодження і керування забезпечує керуючий вплив на виконуючі механізми технологічних зон ОК. БНП дозволяє сформулювати процес керування як вибір одного з продукційних правил із загальної бази правил, при цьому застосовуються відомі алгоритми нечіткого логічного висновку [89–91].

Отже, представлена структурна схема нечіткої моделі термічного процесу оброблення окатишів на машині, яка складається з окремих блоків керування технологічними зонами, що взаємодіють між собою. Кожний блок керування має блоки налаштування параметрів і регулятор нечіткої логіки, зв'язаний входами з перетворювачами сигналів датчиків, які знімають необхідні параметри і керують виконавчими механізмами. Автоматизація керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині із використанням нечіткої логіки

дозволить розв'язати складні задачі, які не можуть бути вирішені класичними методами через високу складність і неможливість визначати деякі технологічні параметри.

2.2. Розробка математичних моделей керування процесом термічного оброблення окатишів на основі нечіткої логіки

Відповідно до імітаційної схеми комплексна математична модель для дослідження процесу керування термічним обробленням окатишів видається окремими взаємопов'язаними математичними моделями технологічних зон конвеєрної машини. Як показав аналіз промислових систем автоматичного керування температурного і інших режимів технологічного процесу, що в реальних умовах експлуатації неможливо врахувати всі та визначити в промислових умовах роботи машини необхідні для моделей технологічні параметри, наприклад, висоти і маси шару окатишів, температури верхнього шару окатишів, тощо. Проте, ці параметри враховуються в моделях з розкидом від мінімального значення до максимального із вибраною дискретністю у цьому діапазоні. Для цього випадку найкраще використовувати неповну і нечітку логіку.

Моделі використовують неповні й нечіткі параметри (множини) об'єкта. Враховуючи взаємодію нечітких параметрів, до структурної схеми моделі САК для технологічної зони входять регулятор нечіткої логіки РНЛ і мультиплексор (МР). Схема моделі наведена на рис. 2.3.

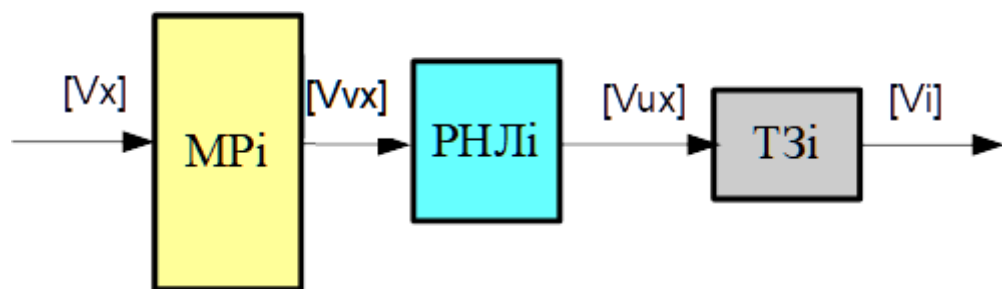


Рис. 2.3. Структурна схема моделі САК для технологічної зони із РНЛ

РНЛ складається з блоків: фазифікації і дефазифікації. У першому блоці якісно характеризуються терм-множини, формуються логічні рішення, призначені для виконання процедур з визначенням ступеня істинності умов по кожному з правил системи нечіткого виведення. Другий блок використовується для збирання вихідних лінгвістичних змінних і отримання звичайного кількісного значення вихідної змінної. Виходячи із зазначеної мети синтезу, керованими координатами доцільно призначити величини множин: $[V_x]$, $[V_{vx}]$, $[V_{ux}]$ і $[V_i]$ (рис. 2.6). Процес перетворення значень вхідних нечітких множин $[V_x]$, які є вхідними для MP_i , а його вихідні множини $[V_{vx}]$ подаються на вхід регулятора нечіткої логіки, який формує керуючий вплив $[V_{ux}]$ для технологічної зони ТЗі. До нечіткого логічного контролера надається база правил і функції приналежності. Вхідні нечіткі множини $[V_x]$ визначаються так:

$$[V_x]=F\{[W1], [H1], [Tp1], [Vkv], [Oc], \dots\}=F[Ki]. \quad (2.3)$$

У виразі (2.3) нечіткі множини $[W1]$, $[H1]$, $[Tp1]$, $[Vkv]$, $[Oc]$, \dots , і $[Ki]$ є переліком технологічних параметрів з визначенням їхнього діапазону експертною оцінкою. Множини $[Ki]$ – призначені для конкретної зони машини. За принципом дії вихідними координатами для регулятора нечіткої логіки виступають множини $[V_{ux}]$, які подаються на вхід блоку керування виконуючими механізмами i -тої зони конвеєрної машини. Вихідні множини визначаються виразом (2.4):

$$[V_{ux}]=F\{[Tsh2], [Tp2], [W2], [H2], \dots\}=F[Mi], \quad (2.4)$$

де $[Mi]$ – вхідні множини для ТЗі.

Множини $[V_i]$ враховують технологічні особливості керування технологічною зоною. Експертна база множин необхідна для визначення сигналів керування. У блоці оцінки результатів моделювання порівнюються емпіричні значення вихідних множин в базі заданих значень. Процес налаштування дозволяє коригувати множини нечіткої моделі управління. Використовується в керуючій

системі механізм нечітких висновків, який у своїй основі має базу знань, що формується фахівцями-технологами фабрики огрудкування у вигляді сукупності нечітких предикатних правил. Алгоритм функціонування блоку нечіткої логіки можливо уявити як модель у вигляді «вхід-вихід» [92, 93] і описати системою рівнянь (2.5):

$$R_t(TZi) = \begin{cases} \Pi_1 : \text{якщо } x \in A_1, \text{ тоді } B_1, \\ \Pi_2 : \text{якщо } x \in A_2, \text{ тоді } B_2, \\ \dots\dots\dots \\ \Pi_n : \text{якщо } x \in A_n, \text{ тоді } B_n, \end{cases} \quad (2.5)$$

де $R_t(TZi)$ – база правил для і-тої технологічної зони;

Π_n – правило;

x – вхідна змінна (ім'я для відомих значень даних);

A і B – функції приналежності, які визначаються на x і y .

Для опису автоматизованої роботи TZi за допомогою нечітких множин будемо вважати, що кожна з вхідних і вихідних множин регулятора розглядається як лінгвістична змінна, що приймає п'ять можливих значень (термів): велика негативна (Negative Large) – NL; мала негативна (Negative Small) – NS; близько нуля (Zero) – Z; мала позитивна (Positive Small) – PS і велика позитивна (Positive Large) – PL. Для рішення задачі керування процесом термічним обробленням окатишів у технологічній зоні використаємо математичний опис трикутної функцій приналежності [89–94]:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-b}{b-a}, & a \leq x \leq b; \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x \leq c; \\ 0, & x < a \text{ або } x > c, \end{cases} \quad (2.6)$$

де x – елемент чіткої безлічі;

a, b і c – підмножини нечіткої безлічі;

$\mu_A(x)$ – величина ступеня приналежності чітких вхідних і вихідних значень до кожної з терм нечіткої безлічі.

Оскільки функції приналежності обчислюються за методом Заде:

$$\mu_{B_i}(z) = \max \{ \mu_{A_i}(z), \min(\mu_{A_i}(x), \mu_{A_i}(y)) \}, \quad (2.7)$$

загальний вихід буде визначено таким виразом:

$$\mu_B(z) = \mu_{B_1}(z) + \mu_{B_2}(z) + \dots + \mu_{B_n}(z). \quad (2.8)$$

Перехід із простору фізичних змінних у нечіткі здійснюється за допомогою операції фазифікації (fuzz) і визначається типом завдання нечітких функцій приналежності (у вигляді трикутників, трапецій, дзвоноподібних тощо). Зворотний перехід до фізичних змінних виконується операцією дефазифікації (dfz) і проводиться методами центру ваги, центру області, середнього максимуму тощо. У БНЛ формувача логічного рішення відбувається обробка нечітких множин, вихідний сигнал блока визначається способами завдання нечіткої імплікації і композиції.

Агрегація виводу загальної вихідної множини для зони $[Vi]$ визначається за локальними параметрами вихідних множин $[Vvx]$ і $[Vux]$ та залежить від значень параметрів вхідних множин $[Tri]$. Кожний параметр вхідної множини $[Vx]$, як показує аналіз виробничих процесів, змінюється в широкому діапазоні. Основу синтезу нечітких алгоритмів керування становить база знань, яка формується у вигляді сукупності нечітких предикатних правил. Враховуючи (2.5) правило Ri , роботи будь-якої зони Z_i з використанням нечіткої логіки представляється логічним рівнянням у загальному вигляді:

$$R_i(Z_i): \text{ If } [P_{z6x} 1 := \epsilon M_i \wedge (\vee) P_{z6x} 2 := \epsilon M_i \wedge (\vee) \dots P_{z6x} N_{i6x} := \epsilon M_i] \text{ then} \\ [P_{z6ux} 1 := \epsilon M_i \wedge P_{z6ux} 2 := \epsilon M_i \wedge \dots P_{z6ux} N_{i6ux} := \epsilon M_i] \quad (2.9)$$

де $P_{z_{вх} 1}$, $P_{z_{вх} 2}$, $P_{z_{вх} N_{i_{вх}}}$ – вхідні параметри відповідно першої, другої і N -й зони;

Z_i – технологічної зони;

$P_{z_{вих} 1}$, $P_{z_{вих} 2}$, $P_{z_{вих} N_{i_{вих}}}$ – вихідні параметри відповідно першої, другої і N -й технологічної зони;

$ЄMi=[NL, NS, Z, PS, PL]$.

Для машини типу LURGI-278A виконаємо дослідження роботи процесу керування термічним обробленням окатишів із використанням регуляторів нечіткої логіки.

2.3. Моделювання процесів сушіння окатишів із використанням регулятора нечіткої логіки

Основу синтезу нечітких алгоритмів керування процесом початкового сушіння окатишів у першій і другій зонах машини становить база знань, яка формується у вигляді сукупності нечітких предикатних правил. Для керування термічним обробленням окатишів у першій зоні сушіння експертним шляхом вибрано такі вхідні і вихідні множини: $[W1]$ – значення вологи окатишів на візках конвеєрної стрічки, $[H1]$ – рівень висоти шару сирих окатишів на цих візках, $[Tr1]$ – температура теплоносія газоповітряного потоку, що приходить із другої зони сушіння, $[Vkv]$ – швидкість переміщення візків, $[Oc]$ – основність сирих окатишів; $[Tsh1]$ – температура верхнього шару окатишів, що виходить із зони; $[W2]$ і $[H2]$ – вологість і висота шару окатишів на виході із зони і $[Tshz]$ – задана температура верхнього шару окатишів у зоні сушіння [116]. Кожний керуючий вплив $[Tsh1]$, $[W2]$ і $[H2]$ на виході зони, як показують результати виробничих процесів, змінюється у широкому діапазоні і залежить від значень вхідних множин $[W1]$, $[H1]$, $[Tr1]$, $[Vkv]$ і $[Tshz]$. За оцінками експертів, що мають досвід експлуатації ВМКТ, мінімально і максимально допустимі граничні значення вхідних множин:

$$[W1]=[9-19] \%, [H1]=[250-400] \text{ мм}, [Tr1]=[300-350] \text{ }^\circ\text{C},$$

$$[Vkv]=[0,72-2,52] \text{ м/с}, [Oc]=[0,7-1,56] \text{ од. і } [Tshz]=[320-350] \text{ }^\circ\text{C}.$$

Одночасно цим значенням відповідають вихідні множини:

$$[Tsh1]=[300-350] \text{ }^\circ\text{C}, [W2]=[35-45] \%, [H2]=[245-392] \text{ мм.}$$

Аналогічним шляхом для другої зони сушіння встановлені експертами-технологами виробничих процесів мінімально і максимально допустимі граничні значення вхідних множин, вони є такими: $[Tsh1]=[310-370] \text{ }^\circ\text{C}$, $[W2]=[7-17] \%$, $[H2]=[350-410] \text{ мм}$ і $[Tp2]=[250-550] \text{ }^\circ\text{C}$. Одночасно цим значенням відповідають вихідні множини: $[Tsh2]=[400-700] \text{ }^\circ\text{C}$, $[W3]=[7-12] \%$ і $[H3]=[340-400] \text{ мм}$.

Для подальших оцінок роботи регуляторів, що керують у кожній зоні процесом сушіння окатишів, пропонується використовувати алгоритм нечіткої логіки [90–92], а саме алгоритм Мамдані. Відповідно до цього алгоритму, для оцінки ефективності температури верхнього шару окатишів та інших вихідних множин для цієї зони необхідно скласти нечіткі правила керування, використовуючи символічні ідентифікатори для короткого опису, що аналогічно логічним рівнянням (2.9). Тоді правила роботи регулятора для першої зони сушіння представляється в такому логічному вигляді:

$$\begin{aligned} R_1 (3CI): & \text{ If } (w1 \text{ is } Z) \square (Oc \text{ is } Z) \square (Vkv \text{ is } PS) \square (Tp1 \text{ is } PL) \square \\ & \square (H1 \text{ is } NL) \square (Tshz \text{ is } Z) \text{ then } (Tsh1 \text{ is } PL) \square (w2 \text{ is } PS) \square (H2 \text{ is } PL). \\ R_2 (3CI): & \text{ If } (w1 \text{ is } PL) \square (Oc \text{ is } Z) \square (Vkv \text{ is } Z) \square (Tp1 \text{ is } NS) \square \\ & \square (H1 \text{ is } NL) \square (Tshz \text{ is } Z) \text{ then } (Tsh1 \text{ is } Z) \square (w2 \text{ is } NS) \square (H2 \text{ is } PL). \\ R_3 (3CI): & \dots\dots\dots \\ R_t (3CI): & \text{ If } (w1 \text{ is } PS) \square (Oc \text{ is } PS) \square (Vkv \text{ is } NS) \square (Tp1 \text{ is } PL) \square (H1 \text{ is } NL) \square \\ & \square (Tshz \text{ is } Z) \text{ then } (Tsh1 \text{ is } Z) \square (w2 \text{ is } PS) \square (H2 \text{ is } NS). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Одне із цих правил для другої зони сушіння представлено в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} R_t (3CII): & \text{ If } (Tsh1 \text{ is } PS) \square (W2 \text{ is } Z) \square (H2 \text{ is } Z) \square (Tp2 \text{ is } PL) \text{ then} \\ & (Tsh2 \text{ is } PL) \square (w3 \text{ is } PS) \square (H3 \text{ is } Z). \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для кожного терму: $R_t (ZCI) = \in \{ \text{дуже мала, мала, норма, велика, дуже велика} \}$, і в короткій формі: $R_t (ZCI) = \in \{ NL, NS, Z, PS, PL \}$. Використовуючи по п'ять функцій приналежності для кожної вхідної множини розроблені правила роботи РНЛ, які сформовані у базу знань. Для першої зони сушіння вона надана на рис. Б.1, а для другої зони сушіння – на рис. Б.2 у додатку Б. Відмінною особливістю розроблених баз знань є їхня несиметричність оскільки сукупність правил для регулятора зон сушіння враховує видалення вологи з сирих окатишів і вони готуються для більш високотемпературного нагрівання. На термічний процес зони суттєво впливає температура і кількість теплоносія газоповітряного потоку, що надходить із другої зони охолодження. Параметри цього теплоносія становлять 150–250 °С, а потік, що відсмоктуються із зони сушіння, повинен бути не менше 75 °С, щоб уникнути конденсації вологи в газоході. Інші параметри в моделі не враховуємо, оскільки вони несуттєво впливають на технологічний процес.

Вхідними множинами для другої зони є вихідні нечіткі множини з попередньої зони сушіння з доповненням множини температури потоку із зони випалювання, позначеної як [Tr2]. Вона збільшує температуру верхнього шару окатишів у другій зоні сушіння за рахунок подачі теплоносія потоку із зони випалювання із температурою від 400 °С до 700 °С.

У Fuzzy Logic Designer:ZCI підпрограми «Fuzzy» програмного середовища Matlab/Simulink виконано синтез і вибір алгоритму (Mamdani), а в робочій галузі задано необхідну кількість вхідних і вихідних змінних (має п'ять вхідних та три вихідних множин). Отримано графічне зображення функцій приналежності. Для них обрано методи дефазифікації, імплікації, а також межі, у яких знаходяться функції належності вхідних і вихідних множин. Синтезовані функції приналежності та бази правил й обрані їхні типи. Після синтезу бази правил і синтезу функцій виведено механізм синтезу загального висновку про регулювання температури верхнього шару окатишів, їхньої вологості й висоти. Методом дефазифікації Defuzzification оцінювався центроїд «centroid» функції членства для кожного правила [90–93]. Кінцевий вихід обчислюється, як середнє

значення для індивідуального центроїда, зважене значеннями членства, таким способом (2.12):

$$Def_{\Sigma ZCI} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{Rt} C_i}{\sum_{i=1}^n C_i}, \quad (2.12)$$

де Q_{Rt} – результат бази правил;

i та C_i – центр функції вихідного членства.

Оперуючи даними лінгвістичних змінних у правилах нечіткої логіки, отримано графіки поверхні обліку правил і параметричних множин. Графіки поверхні для першої зони позначено на рис. 2.4 таким способом:

а – $[Tsh1]=F([Tp1], [Tshz])$, б – $[W2]=F([Tp1], [Tshz])$,

в – $[H2]=F([Tp1], [H1])$, г – $[Tsh1]=F([H1], [Oc])$.

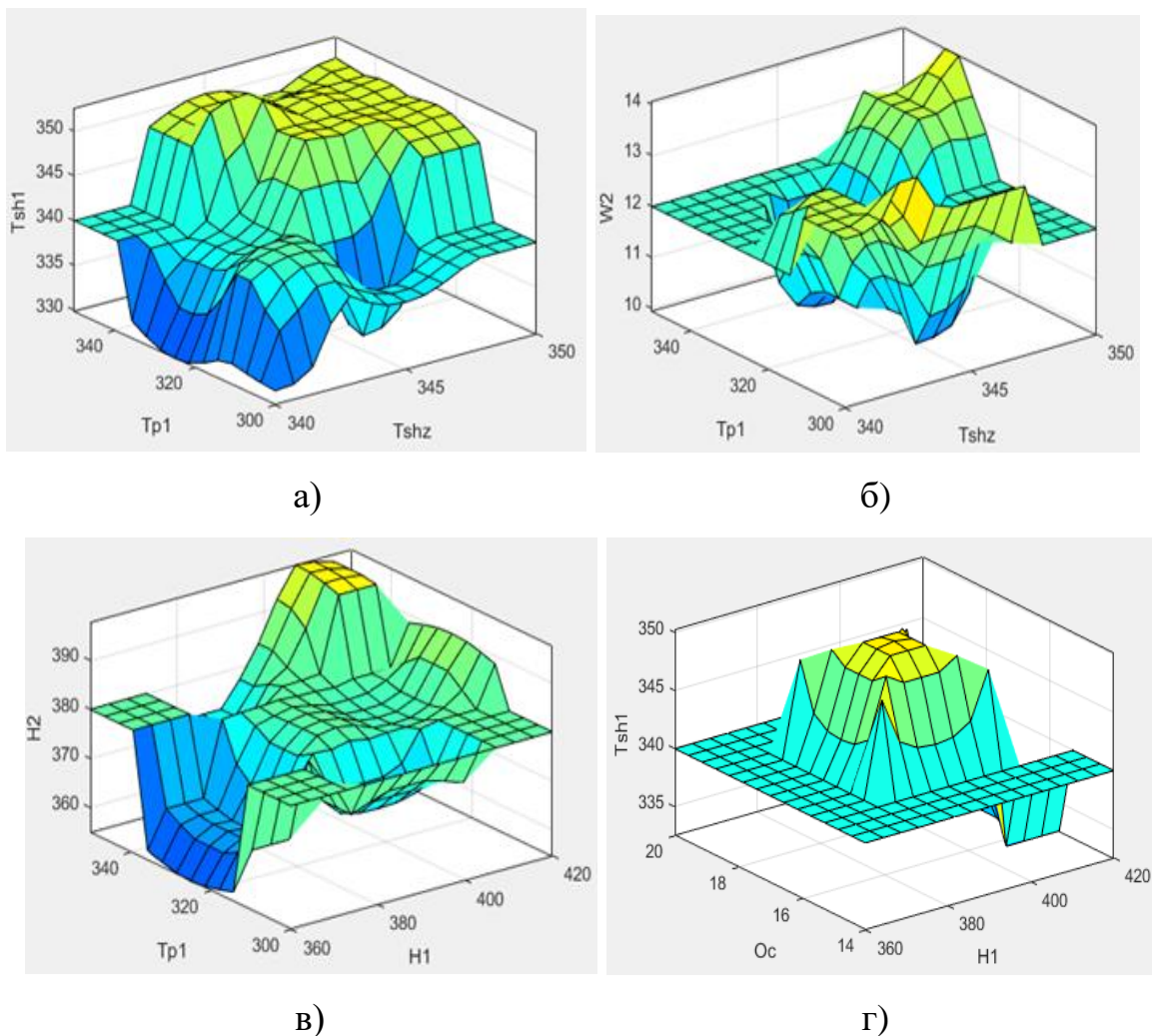


Рис. 2.4. Графіки поверхонь керування процесом у попередній зоні сушіння

а для другої зони – на рис. 2.5:

$$а – [Th2]=F([Tsh1], [Tp2]), \quad б – [W3]=F([Tp2], [W2]),$$

$$в – [H3]=F([Tp2], [H2]) \quad і \quad г – [Tsh2]=F([H2], [W2]).$$

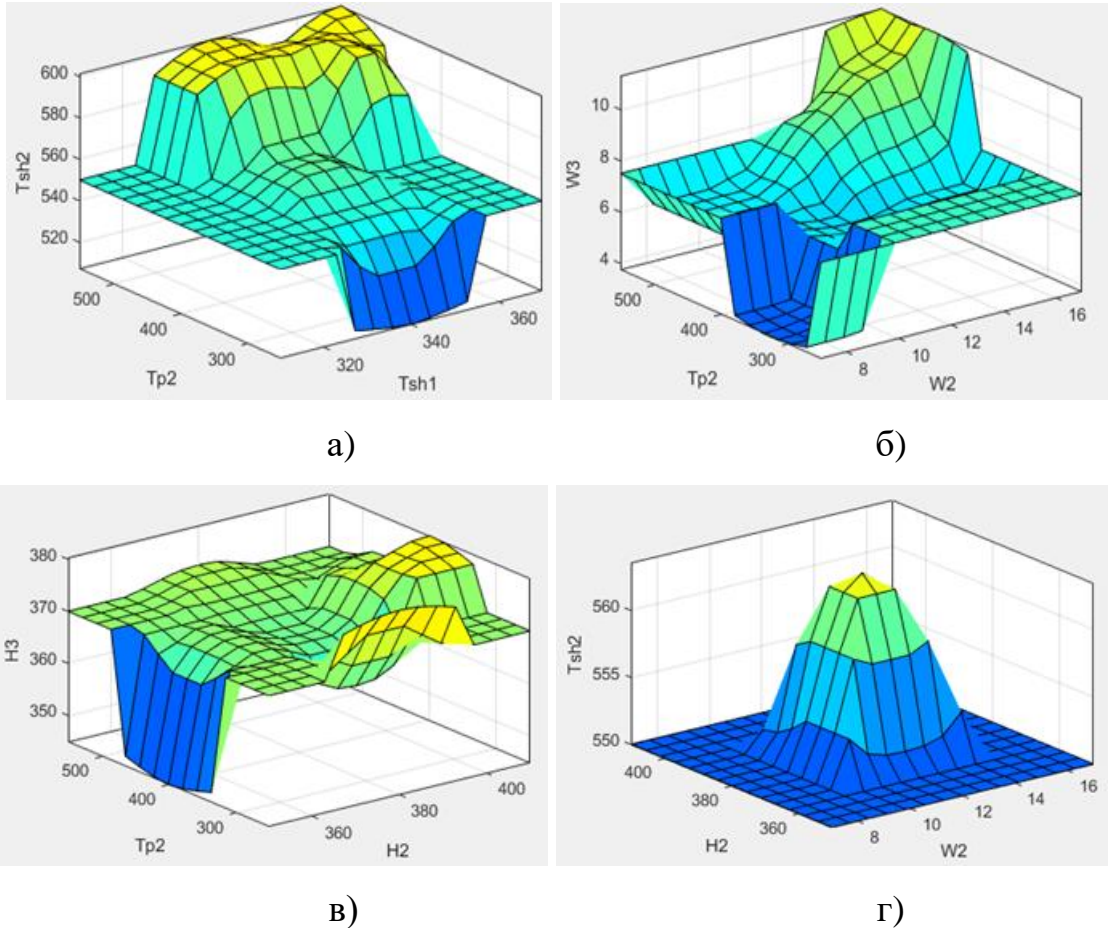


Рис. 2.5. Графіки поверхонь керування процесом у зоні остаточного сушіння окатишів

Температура верхнього шару окатишів на виході першої зони сушіння $[T_{sh1}]$, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи другої зони сушіння, визначається за експоненціальним законом залежно від суми температур заданого значення для верхнього шару окатишів для першої зони сушіння $[T_{shz}]$ і газоповітряного потоку зони охолодження $[T_{p1}]$ і пропорційно лінійно залежать від основності $[O_c]$ та вологи сирих окатишів $[W1]$, заданої швидкості переміщення візків $[V_{kv}]$ і висоти $[H1]$ шару окатишів на візках конвеєрної стрічки. Вихідні параметри вологи $[W2]$ і висоти $[H2]$ шару окатишів на виході

першої зони сушіння прямо пропорційно залежить від вхідних параметрів вологи $[W1]$ і висоти $[H1]$ шару окатишів на виході у першу зону сушіння, і зменшуються за експоненціальним законом в залежності від суми заданого значення температури верхнього шару окатишів у цій зоні та температури газоповітряного потоку, що нагнітається димотягом із другої зони охолодження. Як показали результати досліджень, температура верхнього шару окатишів у зонах сушіння залежить від швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки (рис. 2.4, а–в), вологості окатишів (рис. 2.4, в, г; рис. 2.5, а, в) і висоти шару окатишів (рис. 2.4, г; рис. 2.5, б, в). Висота шару окатишів на виході першої зони сушіння залежить від швидкості переміщення візків і температури теплоносіїв другої зони охолодження. Температура верхнього шару окатишів у другій зоні сушіння збільшується за рахунок подачі теплоносія потоку із зони випалювання із температурою від $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура верхнього шару окатишів на виході другої зони сушіння $[Tsh2]$, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи зони попереднього нагрівання, визначається за експоненціальним законом залежно від суми температури заданого значення для верхнього шару окатишів для другої зони сушіння, вихідної температури для першої зони сушіння $[Tsh1]$ і температури газоповітряних потоків зони випалювання $[Tr2]$ і пропорційно лінійно залежать від вологи окатишів $[W2]$ і висоти $[H2]$ шару окатишів на візках конвеєрної стрічки першої зони сушіння.

Волога окатишів $[W3]$ і висота $[H3]$ шару окатишів на виході із останньої зони сушіння прямо пропорційно залежить від вхідних параметрів вологи $[W2]$ і висоти $[H2]$ шару окатишів на виході у другу зону сушіння, і зменшуються за експоненціальним законом в залежності від суми заданого значення температури верхнього шару окатишів у цій зоні та температурам верхнього шару окатишів на виході першої зони сушіння $[Tsh1]$ і газоповітряного потоку $[Tr2]$, що нагнітається димососом із зони випалювання.

Дослідження виконано шляхом моделювання при розкиді значень вхідних параметрів технологічного процесу, використовуючи розроблені моделі

керування процесами сушіння окатишів. У ролі головного регулюючого та керуючого пристрою в моделях використовуються регулятори нечіткої логіки «Fuzzy Logic Regulator», які працюють за заданими правилами нечіткої логіки. До них застосована теорія нечітких множин для керування параметрами зі складними нечіткими реченнями.

Використовуючи середовище програмування Matlab/Simulink, задано функції приналежності обраних нечітких множин і розроблено моделі системи керування процесом термічного сушіння окатишів на основі нечіткої логіки, які представлені на рис. 2.6. Застосовуючи цю модель, проведені дослідження із визначення значень технологічних параметрів при виконанні процесу сушіння. Встановлено, що найбільший вплив на процес сушіння окатишів має температура потоку теплоносіїв, що при автоматизації нагнітається димотягом у досліджувану зону. Визначено величини технологічних параметрів для вихідних множин зони сушіння, які впливають на забезпечення регламентних технологічних параметрів другої зони сушіння. У моделі (рис. 2.6, а) позначено першу зону сушіння символом через ZCI, а другу зону сушіння на рис. 2.6, б – ZCII.

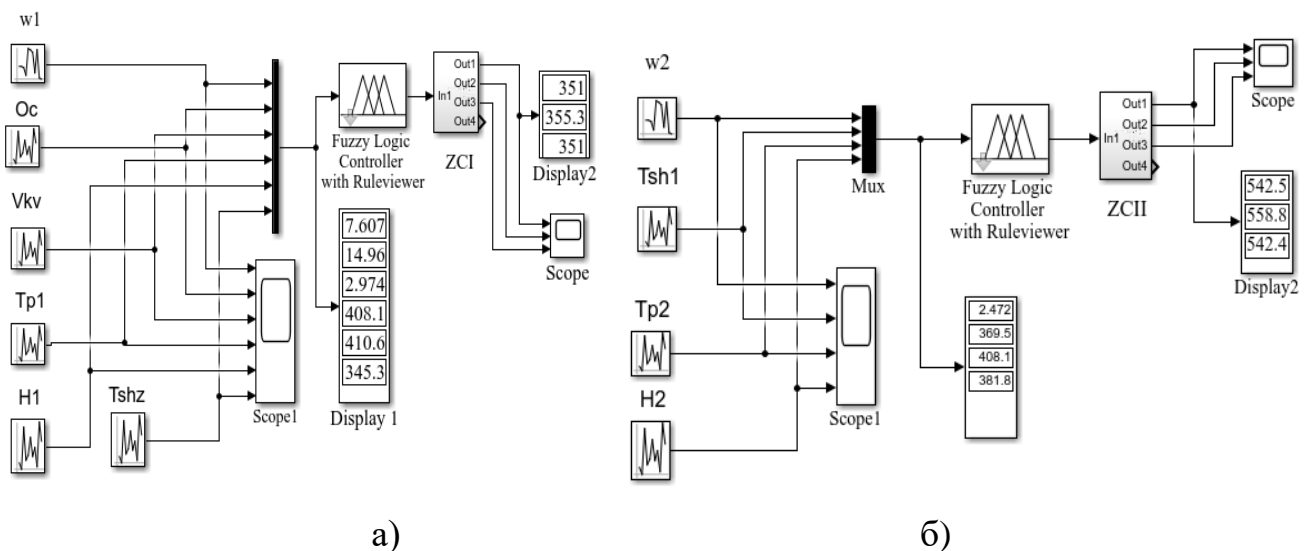


Рис. 2.6. Модель керування процесом сушіння окатишів:

а – першої зони і б – другої зони аперіодичною і двома коливальними ланками

При виконанні досліджень кожна зона представлена одною аперіодичною і двома коливальними ланками з різними значеннями коефіцієнтів пропорційної частини та сталих часу, що містять у ролі множника оператор Лапласа. Параметри для аперіодичних і коливальних ланок використано від систем автоматичного керування технологічним процесом, що використовуються при експлуатації ВМКТ.

Ланки використано для визначення температури верхнього шару окатишів на візках конвеєрної стрічки тому, що цей процес, пов'язаний з температурними режимами, має інерційність. Для врахування інших вихідних параметрів вибрані пропорційні ланки. Використовуючи модель керування процесом першої стадії сушіння окатишів на основі нечіткої логіки, проведено дослідження при подачі на вхід моделі різних множин і отриманні результати змін висновків, що представлені на рис. 2.7.

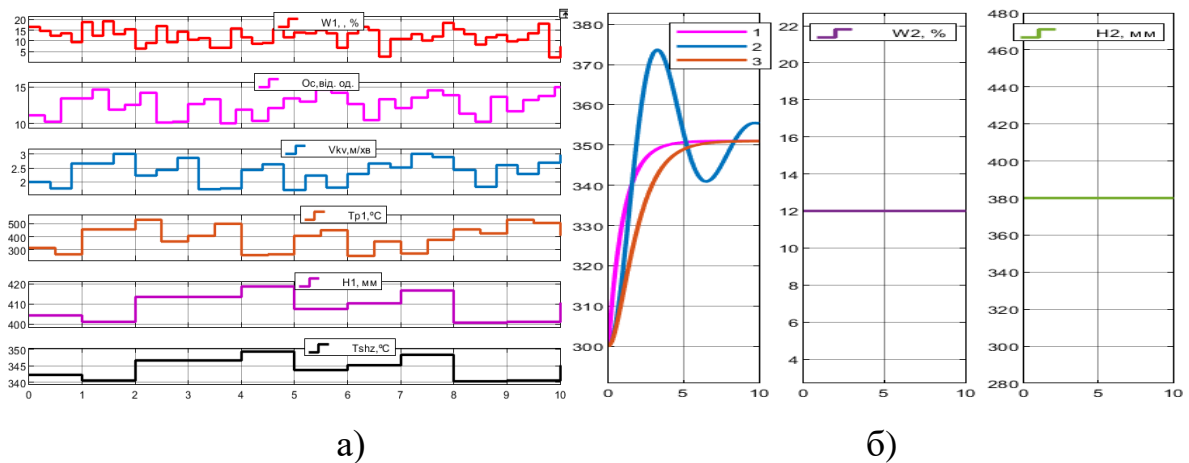


Рис. 2.7. Результати моделювання процесу сушіння окатишів у першій зоні:
а – завдання і б – керуючі впливи [Tsh1], [W2] і [H2]

На вхід моделі другої зони сушіння задано чотири множини [W2], [Tsh1], [Tr2] і [H2], величини яких змінюються у часі в діапазоні від мінімальних до максимальних значень. Це представлено на рис. 2.8, а, а результат моделювання – на рис. 2.8, б.

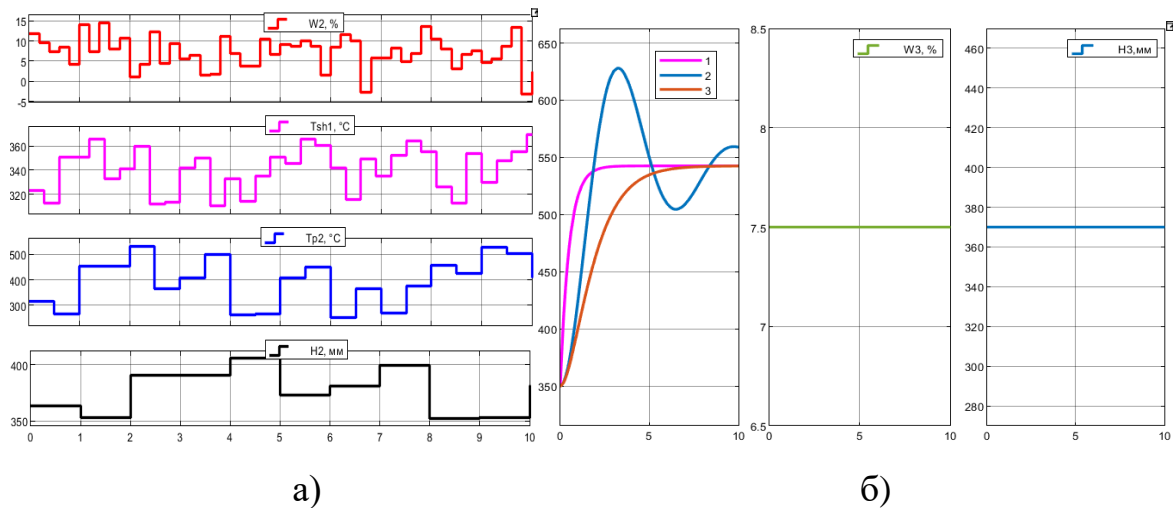


Рис. 2.8. Результати моделювання процесу керування остаточним сушінням окатишів: а – вхідні множини і б – вихідні множини

На графіках (рис. 2.7, б; рис. 2.8, б) позначено зміни: температур нагріву шару окатишів на виходах із зон (перший графік) для різних постійних часу об'єкта керування, вологи окатишів (другий графік) і висоти шару окатишів на візках (останній графік). У випадках застосування фазі-контролера в ролі керуючого регулятора, як показали результати дослідження, що представлені на першому графіку, перехідний процес нагріву верхнього шару окатишів у першій зоні сушіння, яка представлена аперіодичною ланкою: $W(s) = \frac{0,15}{s + 1}$; закінчується уже при рівні в 5 с. Якщо представити цю зону коливальною ланкою $W(s) = \frac{0,15}{s^2 + 0,5s + 1}$, то час перехідного процесу порівняно з аперіодичною ланкою збільшується у півтора рази. При коливальній ланці $W(s) = \frac{0,15}{s^2 + 2s + 1}$ спостерігається коливання температури шару окатишів на виході із першої зони сушіння і збільшується час перехідного процесу. Інші результати моделювання для зон наведено на графіках, представлених на рис. 2.9 і рис. 2.10.

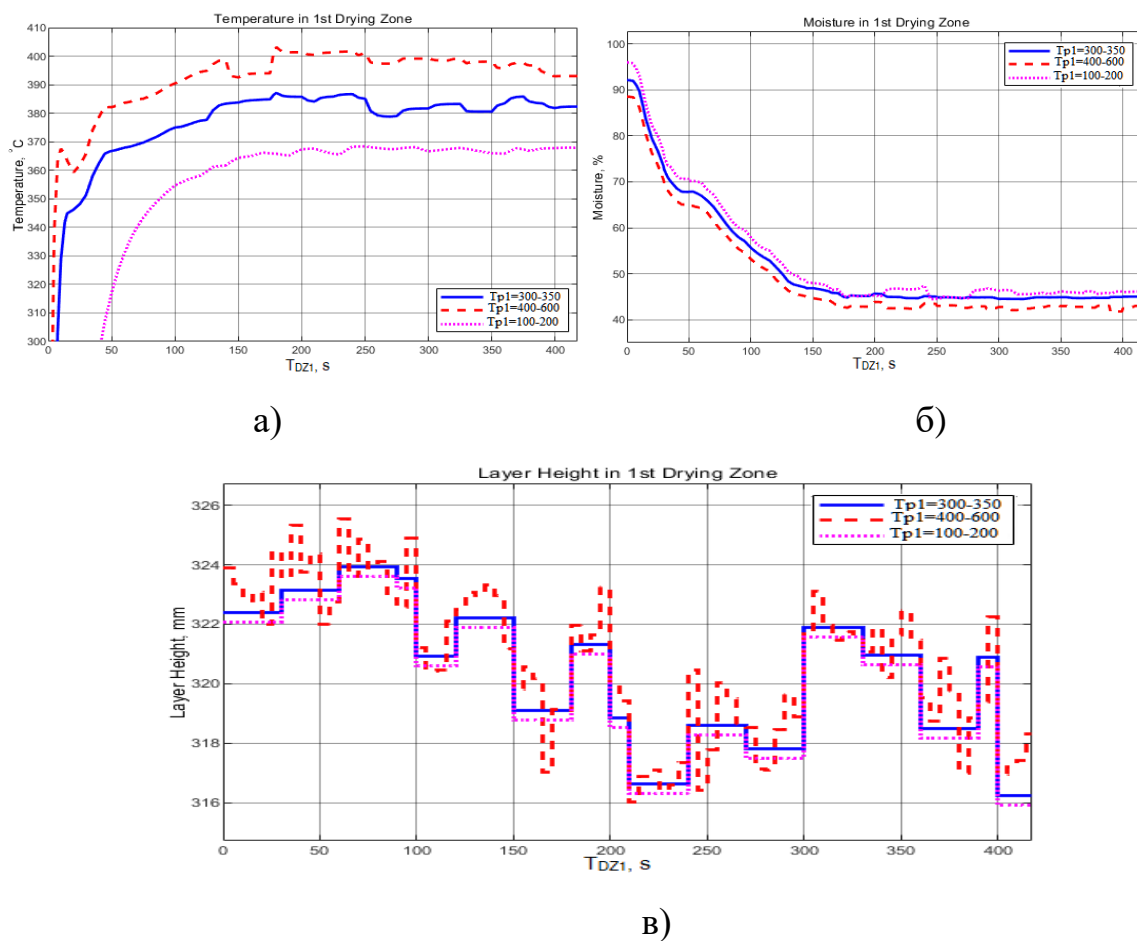


Рис. 2.9. Результати моделювання процесу сушіння окатишів у першій зоні при змінах керуючих впливів: $[T_{sh1}]$, $[W2]$, $[H2]$ і $[T_{p1}]$

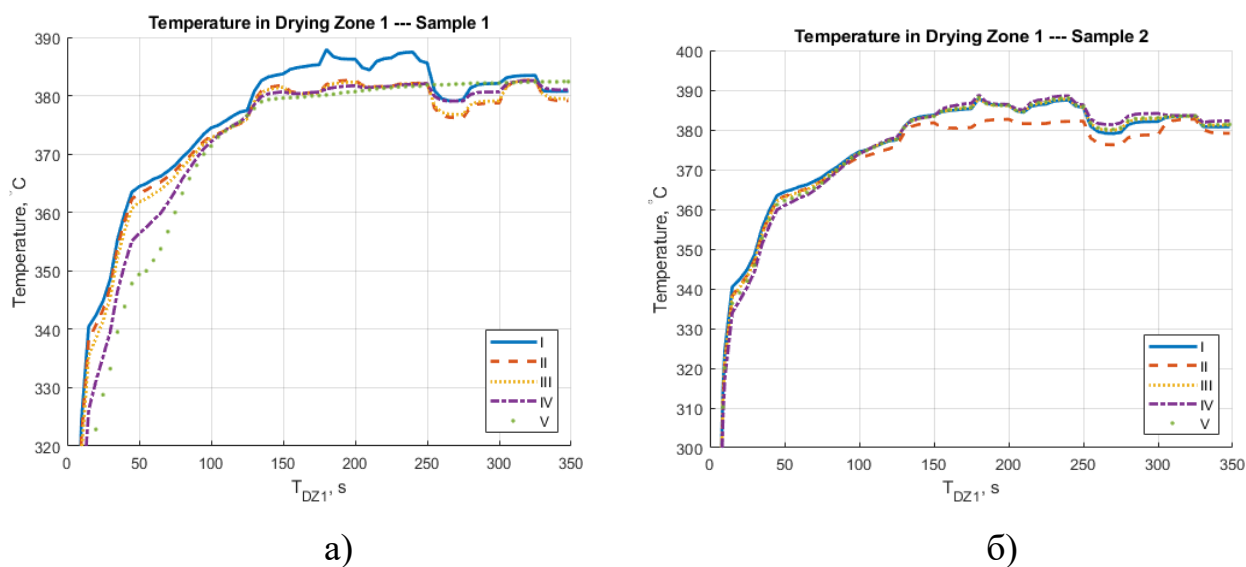


Рис. 2.10. Результати моделювання процесу сушіння окатишів при впливі вхідних множин на вихідні при використанні одного із вхідних множин: а – не залишаючи при цьому інші, б – залишаючи їх

На графіках при дослідженні керування процесом сушіння окатишів прийнято, що часовий інтервал (T_{DZ1}) дорівнює 348 с. Для другої зони сушіння результати досліджень показали, що найменший час у 2,5 с, при якому закінчується перехідний процес, для температури верхнього шару окатишів у 540 °С, що представлено на першому графіку. За час 7,5 с закінчується перехідний процес при використанні коливальної ланки, що представлено на другому графіку. При збільшенні постійної часу коливальної ланки перехідний процес є коливальним.

Вплив температури теплоносіїв [T_{p1}] на першу зону сушіння спочатку має пропорційний характер (рис. 2.9, а), і далі при усередненому значенні в 300–350 °С температурна характеристика верхнього шару окатишів має аперіодичний характер при наявності коливальних відхилень ± 5 °С на інтервалі часу від 250 до 400 с і практично постійне значення встановлюється на позначці в 382 °С. При максимізованому значенні температури теплоносія потоку на інтервалі 400–600 °С характеристика має аперіодичний коливальний характер майже на всьому інтервалі температурної характеристики. Перехідний процес встановлюється на значенні 393 °С.

При мінімізації значення температури теплоносія від 100 до 200 °С характеристика має більш плавний аперіодичний характер, проте, перехідний процес наростає значно повільніше (за 200 с, на відміну від двох попередніх за 100–150 с). При максимальному розкиді значень температури теплоносія ГПП від 400 до 600 °С графік вологості пропорційно зменшився на 2–3 % (рис. 2.9, б), а при мінімальному розкиді температури теплоносія від 100 до 200 °С графік вологості пропорційно збільшився до 4 %. Вплив температури теплоносія потоку (рис. 2.9, в) на характеристику висоти шару окатишів має відносний пропорційний характер. Визначимо вплив кожного окремого вхідного вектора на вихідні характеристики першої зони сушіння, які надалі використовуються для наступної зони сушіння. Для цього при проведенні досліджень у першому випадку в моделі поступово не використовуємо один із вхідних множин, залишаючи при цьому інші. У другому випадку послідовно не використовуємо у

моделі один із вхідних множин, не залишаючи попередньо використані. При моделюванні послідовно не використовуємо вхідні множини: $[V_{kv}]$, $[H1]$, $[O_c]$ і $[T_{p1}]$. Результати моделювання представлено відповідно на рис. 2.10, а, б. На ньому за римськими цифрами наведено п'ять характеристик: з урахуванням усіх параметрів вхідних множин $[V_{kv}]$, $[H1]$, $[T_{p1}]$, $[T_{sh1}]$ і $[O_c]$ – I, при використанні тільки одного вхідного вектора: швидкості візків $[H1, T_{p1}, T_{sh1}, O_c]$ – II, висоти шару окатишів $[T_{p1}]$, $[T_{sh1}, [O_c]$ – III, основності сирих окатишів $[T_{p1}]$ і $[T_{sh1}]$ – IV, температури теплоносія ГПП $[T_{p1}]$ – V.

Результати досліджень показали, що температурна характеристика II верхнього шару окатишів у технологічній зоні сушіння наростає саме тоді, що й вихідна температурна характеристика I (рис. 2.10, а), однак на часовому інтервалі 125–250 с має незначне просідання в $5\text{ }^\circ\text{C}$, а на інтервалі 250–350 с носить коливальний характер зі зміною температурного значення в $2\text{--}3\text{ }^\circ\text{C}$. Характеристика III (рис. 2.10, а) має приблизно той самий характер наростання та встановлення, що й графік характеристики II, однак є більш плавною. З цього можна зробити висновок, що урахування нечітких множин $[H1]$ має незначний вплив на температурну характеристику верхнього шару окатишів. Характеристика IV, що представлена на рис. 2.10, а, наростає із запізненням на часовому інтервалі від 10 до 125 с і має незначні коливання на інтервалі 250–350 с. Це говорить про те, що врахування нечітких множин $[O_c]$ має незначний вплив на $[T_{sh1}]$. Якщо не враховувати нечіткі множини $[T_{p1}]$, то маємо інерційний температурний графік, представлений характеристикою V (рис. 2.10, а) із деякими стрибками, що показує нам неадекватну зміну температурної характеристики.

На вихідну температуру верхнього шару окатишів у першій зоні сушіння одночасний вплив мають множини: $[V_{kv}]$, $[T_{p1}]$ і $[O_c]$ (графік на рис. 2.10, а, характеристика I). П'ять характеристик нагріву верхнього шару окатишів у досліджуваній зоні при моделюванні впливу вхідних на вихідні множини при невикористанні одного із вхідних множин, залишаючи при цьому інші, наведено на рис. 2.10, б. Тут прийняті ті ж позначення, що й на графіку рис. 2.10, а. Як видно з графіків, представлених на рис. 2.10, б, отримані характеристики

практично не відрізняються одна від одної. Це говорить про те, що проведення даного роду експериментів, з почерговим виключенням нечітких множин на вході, не показує адекватної картини впливу параметрів на вихідну температурну характеристику. Отже, надалі будуть використовуватись дані з урахуванням усіх вхідних множин.

У другій зоні при максимальній зміні температури теплоносія потоку від 500 до 600 °С на функціональній залежності зміни температури верхнього шару окатишів, що представлені на рис. 2.11, а, значення температури збільшилося на 10–20 °С. Проте, температура наростає повільніше (на 220 с) і є місце для відхиляючого коливання у 2–3 °С. При мінімальному температурному розкиді від 200 до 300 °С графік наростає за той самий час (100 с, як і при середньому розкиді), але присутнє просідання уздовж часового інтервалу на 15–20 °С. На рис. 2.11, б характеристика вологості пропорційно збільшує відсоткове значення вологості при мінімальному температурному розкиді теплоносія потоку від 200 до 300 °С, і пропорційно зменшується при максимальному температурному зміненні теплоносія від 500 до 600 °С. Значення висоти шару окатишів змінюється незначно при зміненні температури цього теплоносія (рис. 2.11, в).

Проведено серію експериментів, які пов'язані з відсутністю обліку деяких вхідних параметрів і визначення їхнього впливу на вихідні характеристики зони сушіння. Результати експериментів представлені характеристиками на рис. 2.11 г, на якому: I – з урахуванням усіх множин і II, III, IV – відповідно із виключенням множин: [Tr2], [H2] і [W2]. Порівнюючи характеристику II з характеристикою I, зауважуємо відхилення у вигляді коливань протягом 100–200 с часового інтервалу в 10–15 °С, а також незначне відхилення наприкінці температурної характеристики у 2–3 °С з 200 до 220 с. Характеристика III не має значних коливальних відхилень, у порівнянні з попередньою характеристикою II. Характеристика IV просідає у 20 °С на інтервалі від 70 до 230 с і існують стрибкові відхилення на інтервалах 100–125 с і 140–160 с із температурними відхиленнями в 5–10 °С. Проведено серію експериментів, які пов'язані з відсутністю обліку деяких вхідних параметрів і визначення їхнього впливу на

вихідні характеристики зони сушіння. Результати експериментів представлені характеристиками на рис. 2.11, г, на якому: I – з урахуванням усіх множин і II, III, IV – відповідно із виключенням множин: [Tr2], [H2] і [W2]. Порівнюючи характеристику II з характеристикою I, зауважуємо відхилення у вигляді коливань протягом 100–200 с часового інтервалу в 10–15 °С, а також незначне відхилення наприкінці температурної характеристики у 2–3 °С з 200 до 220 с. Характеристика III не має значних коливальних відхилень, у порівнянні з попередньою характеристикою II. Характеристика IV просідає у 20 °С на інтервалі від 70 до 230 с і існують стрибкові відхилення на інтервалах 100–125 с і 140–160 с із температурними відхиленнями в 5–10 °С.

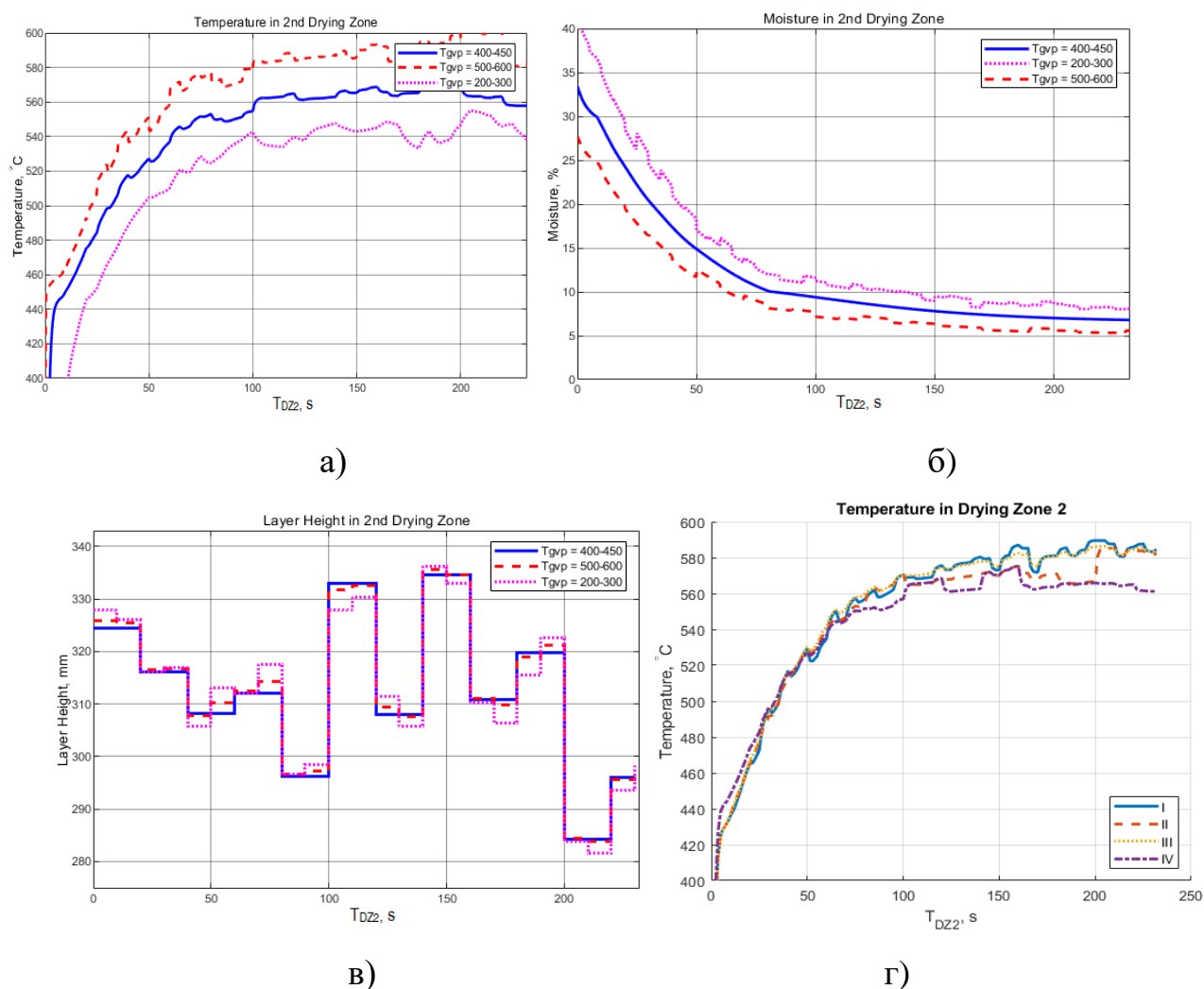


Рис. 2.11. Результати моделювання впливу теплоносія зони випалювання на вихідні параметри остаточної зони сушіння окатишів: а – $[Tsh2]=F([Tr2])$; б – $[W3]=F([Tr2])$; в – $[H3]=F([Tr2])$; г – виключенням деяких вхідних множин

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що використання функцій приналежності як для вхідних, так і для вихідних значень нечітких параметрів технологічного процесу в зоні сушіння дозволяють побудувати працездатні регулятори. Встановлено, що значення параметрів регламентної температури теплоносія газоповітряного потоку із зони випалювання і верхнього шару змінюється за експоненціальним законом у залежності від технологічних значень параметрів першої зони сушіння і мають вплив на вихідні параметри остаточної зони сушіння.

Представлення цієї зони коливальною ланкою при збільшенні її постійної часу перехідний процес сушіння окатишів стає коливальним. Відсутність обліку деяких вхідних параметрів приводить до зміни вихідних характеристик остаточної зони сушіння.

2.4. Моделювання процесів керування зонами попереднього нагрівання і випалювання окатишів із використанням регуляторів нечіткої логіки

Зона попереднього нагрівання окатишів призначена для підготовки до високотемпературного нагрівання окатишів у зоні випалювання, прогріву верхньої частини шару і завершення сушіння його нижніх горизонтів. При навантаженні регламентними значеннями сирих окатишів і їхній вологості 9,0–9,2 % температура в цій зоні повинна бути в межах від 850 до 1000 °С. У цьому разі завданням є видалення залишку вологи (не більше 5 % від загального вмісту), часткове окислення магнетиту й декарбонізації вапняку, переважно у верхніх горизонтах шару окатишів, і, на цій основі, утворення нових хімічних сполук за рахунок реакції в твердій фазі. При вологості сирих окатишів вище регламентної позначки доцільно, щоб температурний режим забезпечував її видалення із залишком вологи від 25 до 30 % від загального вмісту в шарі. Окатиші у цій зоні обробляють відпрацьованим вторинним теплоносієм зони випалювання і високотемпературними продуктами згоряння природного газу. У зонах попереднього нагрівання і випалювання природний газ спалюють

інжекційними пальниками, розташованими над кожною вакуум-камерою зон з обох боків машини. На інжекційні пальники вентилятором подається атмосферне повітря для покращення спалювання газу. У зоні випалювання регламентна температура повинна бути витримана на рівні 1240 ± 50 °С. Призначення цієї зони: окислення магнетиту, розкладання вапняку, зміцнення окатишів за рахунок часткового утворення рідкої фази, що сприяє ущільненню між зернами магнетиту.

Для керування роботою зони попереднього нагрівання використовуємо вхідні множини другої зони сушіння: [Tsh2], [W3] і [H3], вихідні множини [Tr2] температури теплоносія потоку із зони випалювання, [Gv1] і [A1] – витрати природного газу й повітря. Діапазони для вхідних множин обрано експертним оцінюванням: [Tsh2]=[400–700] °С, [W3]=[3–12] %, [H3]=[340–400] мм, [Tr2]=[250–550] °С, [Gv1]=[150–350] м³/год і [A1]=[240–500] м³/год.

Формування нечітких вихідних множин виконаємо при змінах температури верхнього шару окатишів і їхньої маси на візках КС. Їхні множини мають такі діапазони: [Tsh3]=[500–1060] °С і [Mo1]=[2,2–2,6] т/год.

Експертною оцінкою вибрано також діапазони зміни вхідних і вихідних множин для зони випалювання. Для вхідних множин вони є такими: [Tsh3]=[500–1150] °С, [Mo1]=[2,4–3] т/год, [Tr3]=[350–550] °С, [Gv2]=[145–305] м³/год і [A2]=[15–33] м³/год, а для вихідних: [Tsh4]=[900–1500] °С, [Mo2]=[2,2–2,8] т/год і [Tr2]=[250–550] °С.

Використовуючи методику дослідження термічного оброблення окатишів у зонах сушіння, сформульовано правила нечіткої логіки, що відповідають виразу (2.9). База цих правил для зони попереднього нагрівання надана на рис. Б.3, для зони випалювання – на рис. Б.4 у додатку Б. Одне з розроблених правил для зони попереднього нагрівання представлено виразом (2.13):

$$R_t \text{ (ЗПН): If [(Tsh2 is Z) } \square \text{ (W3 is Z) } \square \text{ (H3 is PS) } \square \text{ (Gv1 is PL) } \square \text{ (A1 is NL)]} \\ \text{then [(Tsh3 is PL) } \square \text{ (Mo1 is PS)].} \quad (2.13)$$

Інше з розроблених правил для зони випалювання представлено виразом (2.14):

$$R_t (3B): \text{If } [(Tsh3 \text{ is PS}) \square (Mo1 \text{ is Z}) \square (Tp3 \text{ is Z}) \square (Gv2 \text{ is NS}) \square (A2 \text{ is PL})] \\ \text{then } [(Tsh4 \text{ is PL}) \square (Mo2 \text{ is Z}) \square (Tp2 \text{ is PS})]. \quad (2.14)$$

Виконання синтезу бази правил, функцій приналежності та загального висновку дозволило за допомогою підпрограми «Fuzzy» у середовищі програмування Matlab/Simulink визначити поверхні РНЛ для зони попереднього нагрівання. Графіки поверхні управління фазі-контролера для цієї зони представлені на рис. 2.12. На цьому рисунку позначено:

- а – $[Tsh3]=F([Tsh2], [Tp2])$; б – $[Tsh3]=F([H3], [Tsh2])$;
в – $[Mo1]=F([Tsh2], [Tp2])$; г – $[Mo1]=F([Gv1], [Tsh2])$.

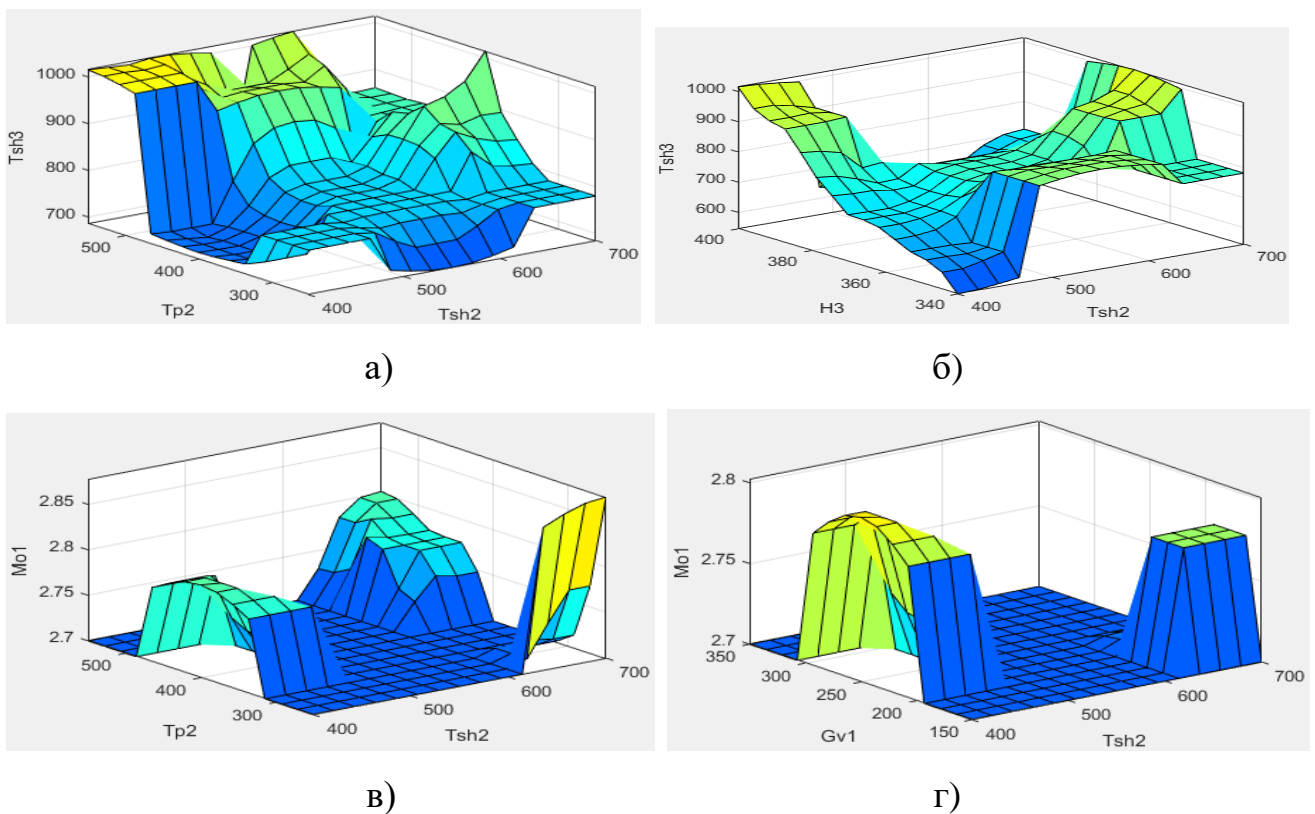


Рис. 2.12. Графіки поверхонь керування процесом у зоні попереднього нагрівання окатишів

Результати досліджень, що проведені у зоні попереднього нагрівання, підтверджують вплив на температуру верхнього шару окатишів параметрів

температури теплоносія потоку із зони випалювання, витрат природного газу і повітря, а також висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки. У цій зоні при збільшенні кількості згорання природного газу і повітря зростає за експоненціальним законом температура верхнього шару окатишів. Підвищення енергоефективності регламентного розподілу температури верхнього шару окатишів (рис. 2.12) дозволила зменшити витрати природного газу на 0,5 % при витратах повітря у відношенні 1:5 порівняно з відомими системами керування [7, 16].

Температура $[Tsh3]$ верхнього шару окатишів на виході зони попереднього нагрівання, яка необхідна для зони випалювання, визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур верхнього шару окатишів остаточної зони сушіння $[Tsh2]$ і газоповітряного потоку зони випалювання $[Tr2]$ та пропорційно лінійно залежать від вологи окатишів $[W3]$ висоти $[H3]$ шару окатишів на візках конвеєрної стрічки і витрат природного газу $[Gv1]$ й атмосферного повітря $[A1]$.

Маса $[Mo1]$ шару окатишів на виході із зони попереднього нагрівання зменшуються за експоненціальним законом в залежності від суми температури заданої для верхнього шару окатишів цієї зони, вихідної температури верхнього шару на візках конвеєрної стрічки остаточної зони сушіння $[Tsh2]$ і температури газоповітряного потоку зони випалювання $[Tr2]$ і прямо пропорційно зменшується від температури верхнього шару окатишів $[Tsh2]$ у цій зоні.

Функціональні залежності температури верхнього шару і маси окатишів на виході із зони випалювання представлено на (рис. 2.13). На графіках позначено:

$$а - [Tsh4]=F([Tsh3], [Tr3]); б - [Mo2]=F([Tsh3], [Mo1]);$$

$$в - [Tr2]=F([Gv2], [Tsh3]); г - [Tsh4]=F([Mo1], [Tsh3]).$$

Результати моделювання процесу обпалення окатишів показали, що нечіткі параметри температури верхнього шару окатишів залежать від вхідних параметрів температури верхнього шару окатишів і їхньої маси, що надходить з попередньої зони – ЗРН. Чим більші їх значення, тим більше значення температури теплоносія над шаром окатишів і відповідно на виході з зони.

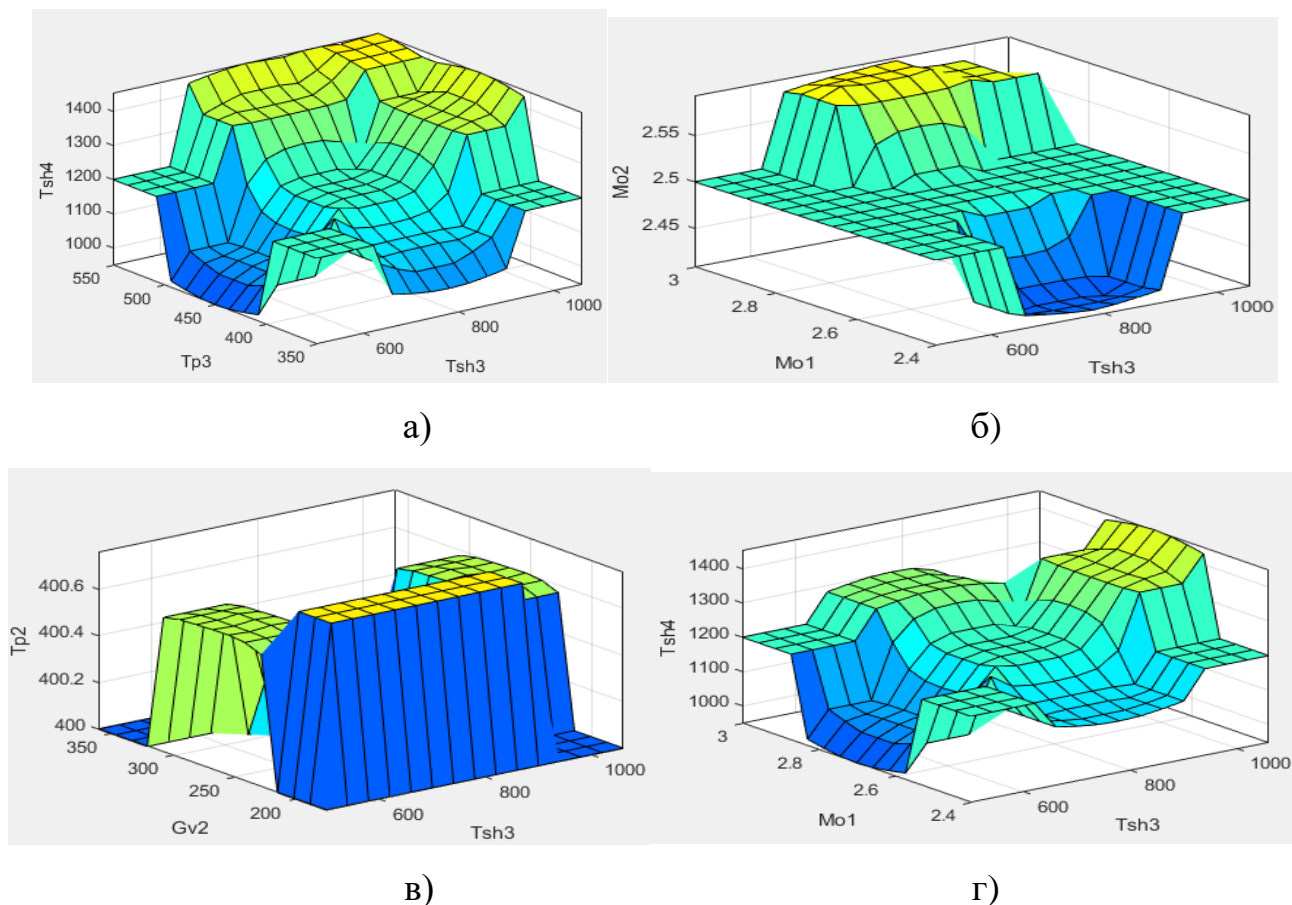


Рис. 2.13. Функціональні залежності зміни вихідних множин від значень вхідних множин при керуванні процесом обпалення окатишів

Ця температура також залежить від значення множини витрат природного газу (рис. 2.13, а–г) і визначається залежно від співвідношення «газ-повітря» (рис. 2.13, б). Чим більші витрати газу й повітря, тим більше температура над шаром окатишів у високотемпературній зоні. При цьому збільшується температура теплоносія, що відсмоктується димотягом у зон сушіння й попереднього нагрівання окатишів. У процесі обпалення окатишів найбільш інтенсивно зменшується їхня маса при виході із зони. Це виникає внаслідок окислення магнетиту і розкладання вапняку.

Температура $[T_{sh4}]$ верхнього шару окатишів на виході зони випалювання, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи зони рекуперації, визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температури заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі

окатишів конвеєрної стрічки, температури [Tsh3] верхнього шару окатишів зони попереднього нагрівання і вихідної температури [Tp3] газоповітряного потоку першої зони охолодження, маси [Mo1] шару окатишів на візках конвеєрної стрічки і витрат природного газ [Gv2] й атмосферного повітря [A2]. Температура [Tp2] теплоносія газоповітряного потоку на виході із зони випалювання визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур, які необхідні для забезпечення регламентних режимів роботи другої зони сушіння і зони попереднього нагрівання.

Маса [Mo2] шару окатишів на виході із зони випалювання зменшуються за експоненціальним законом у залежності від температури заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки, температури [Tsh3] верхнього шару окатишів зони попереднього нагрівання і вихідної температури [Tp3] газоповітряного потоку першої зони охолодження.

Позначення ZPH на рис. 2.14, а – зона попереднього нагрівання, а ZB на рис. 2.14, б – випалювання. У середовищі програмування Matlab/Simulink шляхом додавання до моделі регулятора нечіткої логіки Fuzzy Logic Controller створені імітаційні моделі роботи регуляторів нечіткої логіки для досліджуваних зон.

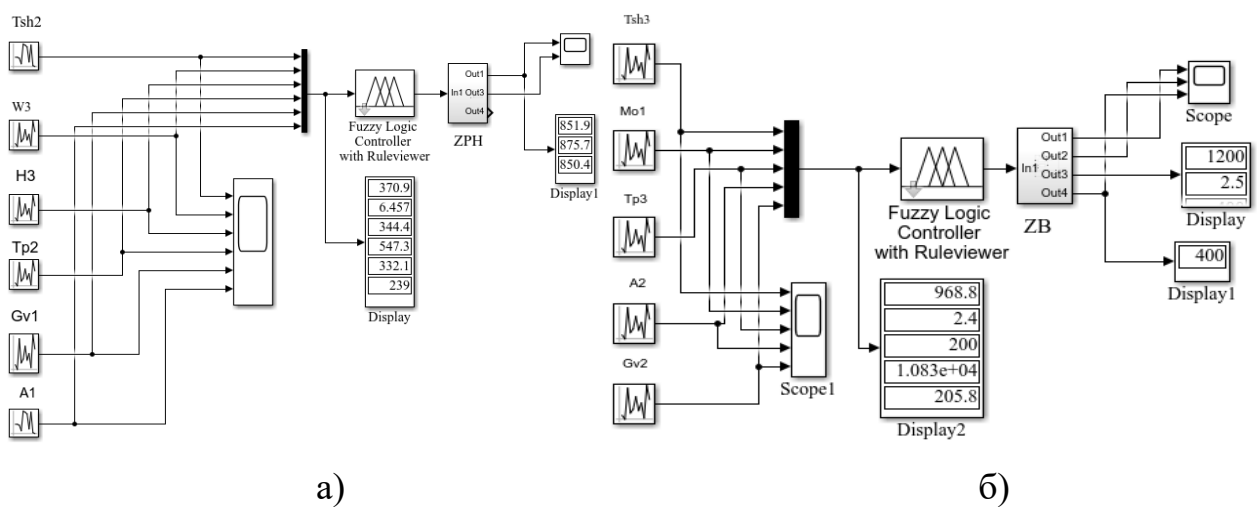


Рис. 2.14. Модель керування процесом:

а – попереднього нагрівання; б – випалювання окатишів

Контролер Fuzzy Logic Controller зони випалювання формує керуючі впливи [Tr2] на димотяг для подачі відпрацьованих теплоносіїв зони попереднього нагрівання і сушіння. На вхід контролера подаються множини: температура теплоносія [Tr3], що нагнітається з першої зони, і витрати природного газу [Gv2] і атмосферне повітря [A2] у відповідному відношенні «газ-повітря». У моделі також використані вихідні множини для визначення температури шару окатишів [Tsh4] і їхньої маса при переміщенні візків конвеєрної стрічки [Mo2].

Використовуючи імітаційні моделі систем керування процесом попереднього нагрівання і обпалення окатишів, проведені дослідження впливу вхідних параметрів на вихідні. Результати представлені на рис. 2.15 і рис. 2.16. При подачі на вхід моделі множин, які позначено на рис. 2.15, а, то результат змін вихідних множин представлено на рис. 2.15, б двома графіками. Перші графіки $Tsh3=F(t)$ і $Tsh4=F(t)$ показують зміну температури шару окатишів на виході із зон для різних ланок передавальних функцій. Другі графіки $Mo1=F(t)$ і $Mo2=F(t)$ встановлюють значення маси шарів окатишів на візках конвеєрної стрічки. Для графіків моделей об'єктів управління ZPH і ZB вибрані на основі аналітичних розрахунків та експериментальних даних і представлені трьома ланками, аналогічними зоні сушіння окатишів.

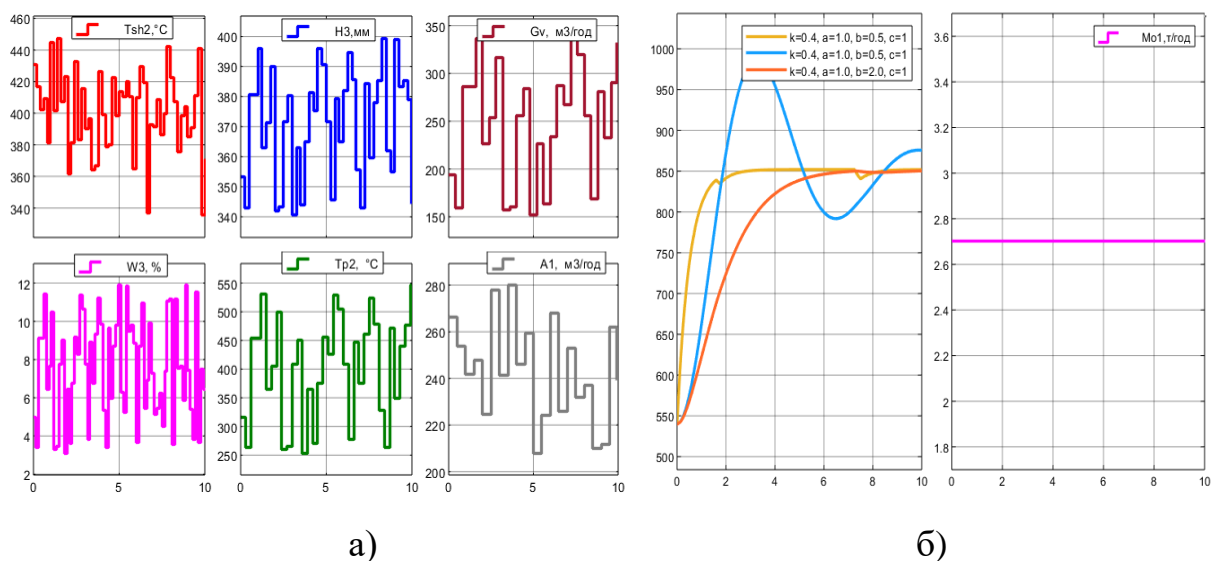


Рис. 2.15. Результати моделювання процесу керування в зоні попереднього нагрівання окатишів: а – вхідні множини; б – вихідні множини

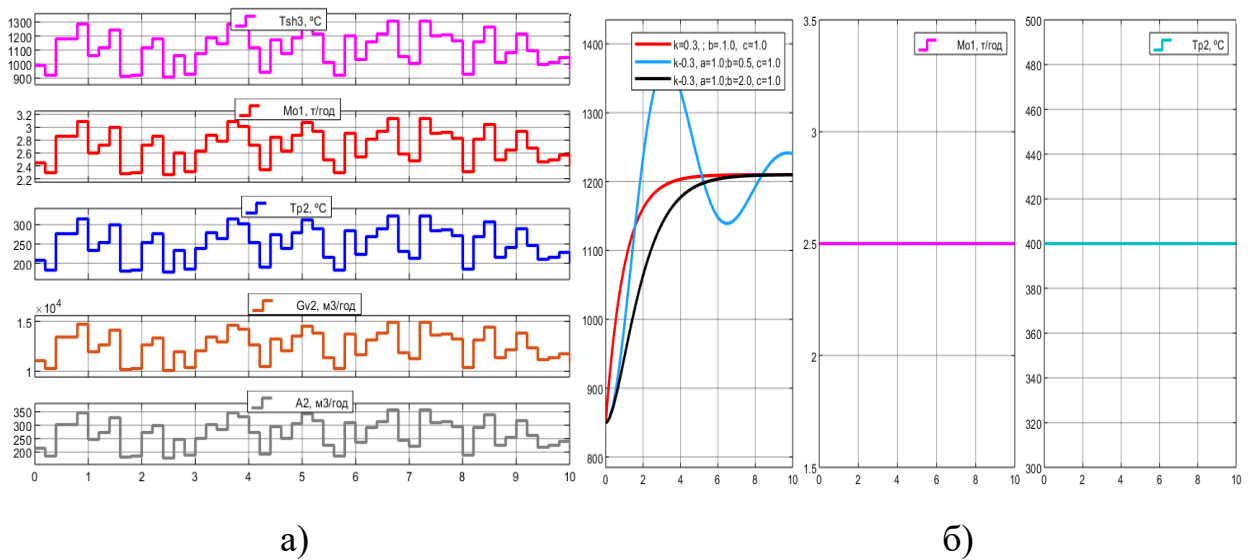


Рис. 2.16. Результати моделювання керування процесом обпалення окатишів:
а – вхідні завдання; б – вихідні значення

Результати досліджень, що представлено на першому графіку зони попереднього нагрівання, показали, що найменший час перехідного процесу для температури верхнього шару окатишів закінчується за 2 с, а для зони випалювання – 6 с. При використанні коливальної ланки час перехідного процесу відповідно закінчується за 6 с і 8 с (другий графік). При збільшенні у два рази постійної часу коливальної ланки виникає коливальний процес температури шару окатишів і збільшується час перехідного процесу. Вихідні множини для маси окатишів $[Mo1]$ і $[Mo2]$ залишаються незмінними в часі. Нагрів верхнього шару окатишів у зоні випалювання суттєво залежить від вхідних множин $[Tsh3]$, $[Tr3]$, витрат природного газу $[Gv2]$ і повітря $[A2]$, що спалюється у цій зоні. Збільшення постійної часу об'єкта ZB збільшує час перехідного процесу.

При зміні постійної часу об'єкта ZB у два рази, як видно з отриманих результатів дослідження, представлених на рис. 2.16, б, час перехідного процесу змінюється в три рази.

Для визначення впливу температури теплоносія потоку із зони випалювання на вихідні функціональні залежності для зони попереднього випалювання виконано моделювання при змінах температури теплоносія:

мінімальній від 200 до 300 °С, середній 400–450 °С та максимальній 500–600 °С. Результат моделювання наведено на рис. 2.17, на якому часовий інтервал (T_{PHZ}) дорівнює 290 с. За наведеними параметрами температурна характеристика змінюється за аперіодичним законом на заданому температурному інтервалі від 600 °С до 1000 °С. Характеристики мають деяке відставання в часі, а також відхиляючі коливання, що складають ± 5 °С. При максимальному температурному розкиді теплоносія від 500 до 600 °С графік пропорційно збільшився на 50 °С, а коливання на 5–10 °С.

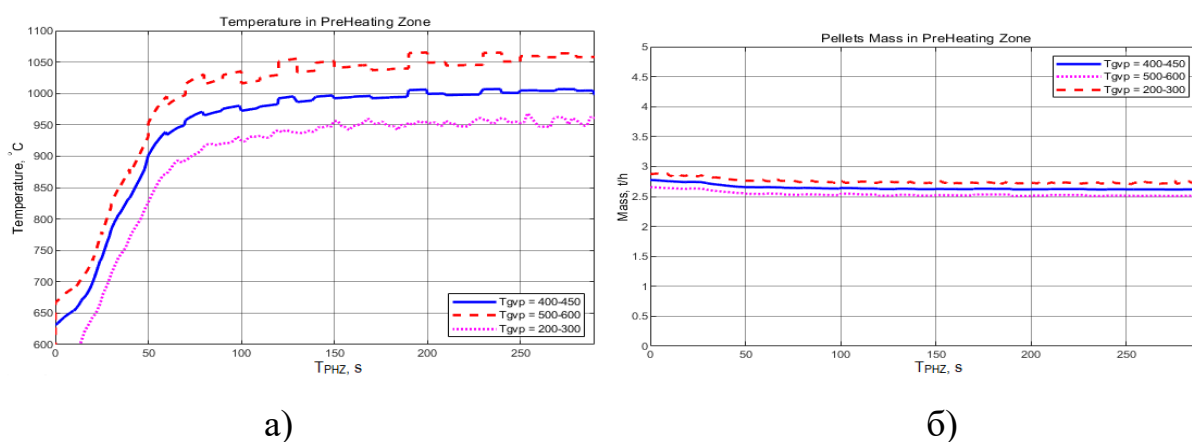


Рис. 2.17. Результати моделювання при розкиді значень температури теплоносія потоку для попереднього нагрівання окатишів для: а – температури верхнього шару окатишів; б – маси окатишів на візках КС

При мінімальному температурному розкиді теплоносія від 200 до 300 °С характеристика пропорційно зменшилася на 50 °С, а коливання приймають значення ± 3 °С. Характеристика змінення маси окатишів на конвеєрній стрічці (рис. 2.17, б) зменшується вздовж зони попереднього нагрівання з усередненим значенням 2,6 т/рік, оскільки вигорає остаточна волога та деякі домішки.

Облік маси окатишів на візках конвеєрної стрічки ведеться з урахуванням початкової насипної маси сирих окатишів із першої зони сушіння. При максимальному та мінімальному розкидах значень температури теплоносія відповідно від 200 до 300 °С і від 500 до 600 °С маса окатишів змінюється на 0,1 т/год, унаслідок процесів, що вказані вище.

Для забезпечення регламентних значень температур теплоносіїв газоповітряних потоків у взаємопов'язаних технологічних зонах сушіння, попереднього нагрівання конвеєрної машини на виході з технологічної зони випалювання управляють димотягом, змінюючи температуру газоповітряного потоку за експоненціальним законом. Визначено вплив на розподіл температури газоповітряних потоків за взаємопов'язаними технологічними зонами конвеєрної машини при управлінні димотягами за експоненціальним законом у функції зміни температури теплоносіїв, що відходять із технологічних зон випалювання і рекуперації. Встановлено, що потрібне значення температури теплоносіїв газоповітряного потоку для зон сушіння і попереднього нагрівання повинно бути з перевищенням у 1,17 рази.

Проведено серію експериментів за змінами вхідних множин моделі. Виявлено вплив цих множин на вихідні характеристики. Для цього на кожному етапі не враховувалися нечіткі множини: температури теплоносія, висоти шару та вологості окатишів. Результат моделювання представлений на рис. 2.18, на якому позначено характеристики: з урахуванням таких множин: I – [Tsh2], [W3], [H3], [Tr2], [Gv1] і [A1] і без їх урахування: II – [Gv1], III – [Gv1] і [Tr2], IV – [Gv1], [Tr2] і [H3], V – жодних вхідних множин.

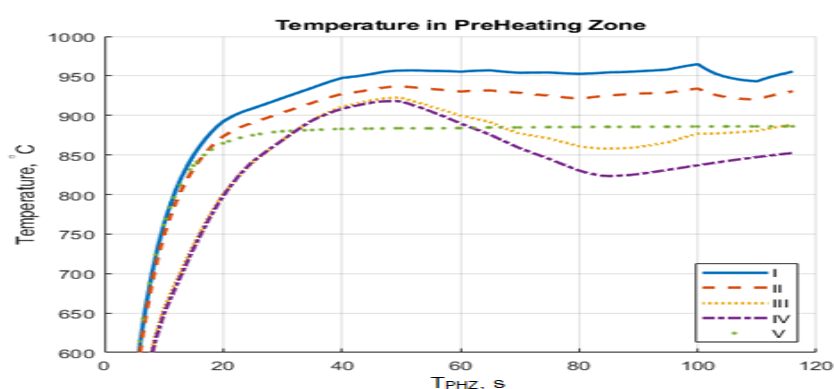


Рис. 2.18. Графіки моделювання процесу керування попереднім нагріванням окатишів при неврахуванні деяких вхідних множин

Друга характеристика не враховує витрати природного газу в порівнянні з першою, коли враховуються всі вхідні множини, має значне просідання за

температурним показником, але є більш плавною та має незначні стрибкові відхилення. Характеристика III, коли не враховуються витрати природного газу і температури теплоносіїв, які подаються із зони випалювання, аперіодично наростає та на часовому інтервалі від 50 до 90 с має просідання, що показує значний вплив на температурну характеристику показників вологи та висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки. Наступна характеристика IV, яка порівняно з III, додатково не враховує висоту шару окатишів, має схожий із нею вигляд. Проте, слід зазначити, що характеристика має значне просідання за температурним режимом та не входить до заданого за регламентом температурного значення. Якщо не враховувати жоден з вхідних параметрів, то характеристика V буде мати загально аперіодичний характер без просідань та стрибків, але вона не є адекватною і не забезпечує заданого за регламентом температурного значення.

Для визначення впливу температури теплоносія першої зони охолодження на вихідні функціональні залежності зони випалювання виконано моделювання при такому змінненні значень температури теплоносія: мінімальному від 700 до 800 °C, середньому 900–950 °C та максимальному 950–1000 °C. Тому проведено моделювання в середовищі програмування Matlab/Simulink. Часовий інтервал (T_{RoZ}) на рис. 2.19 дорівнює 290 с. За результатами дослідження встановлено, що графік функціональної залежності при усередненому температурному змінненні коливання на початку планомірно змінюються, а саме – зростає від 1100 до 1300 °C у зоні випалювання, а потім підтримує необхідну регламентну температуру та при наближенні до усталеного процесу температура в зоні спадає до +1120 °C. При максимальному та мінімальному температурному змінненні теплоносія бачимо пропорційне збільшення і зменшення, а також відповідне збільшення відхиляючих коливань. Графік зміни маси окатишів у зоні випалювання (рис. 2.19, б) показує, що маса окатишів зменшується по мірі проходження візками зони, тому що вигорять різні домішки, які входять до складу окатишів.

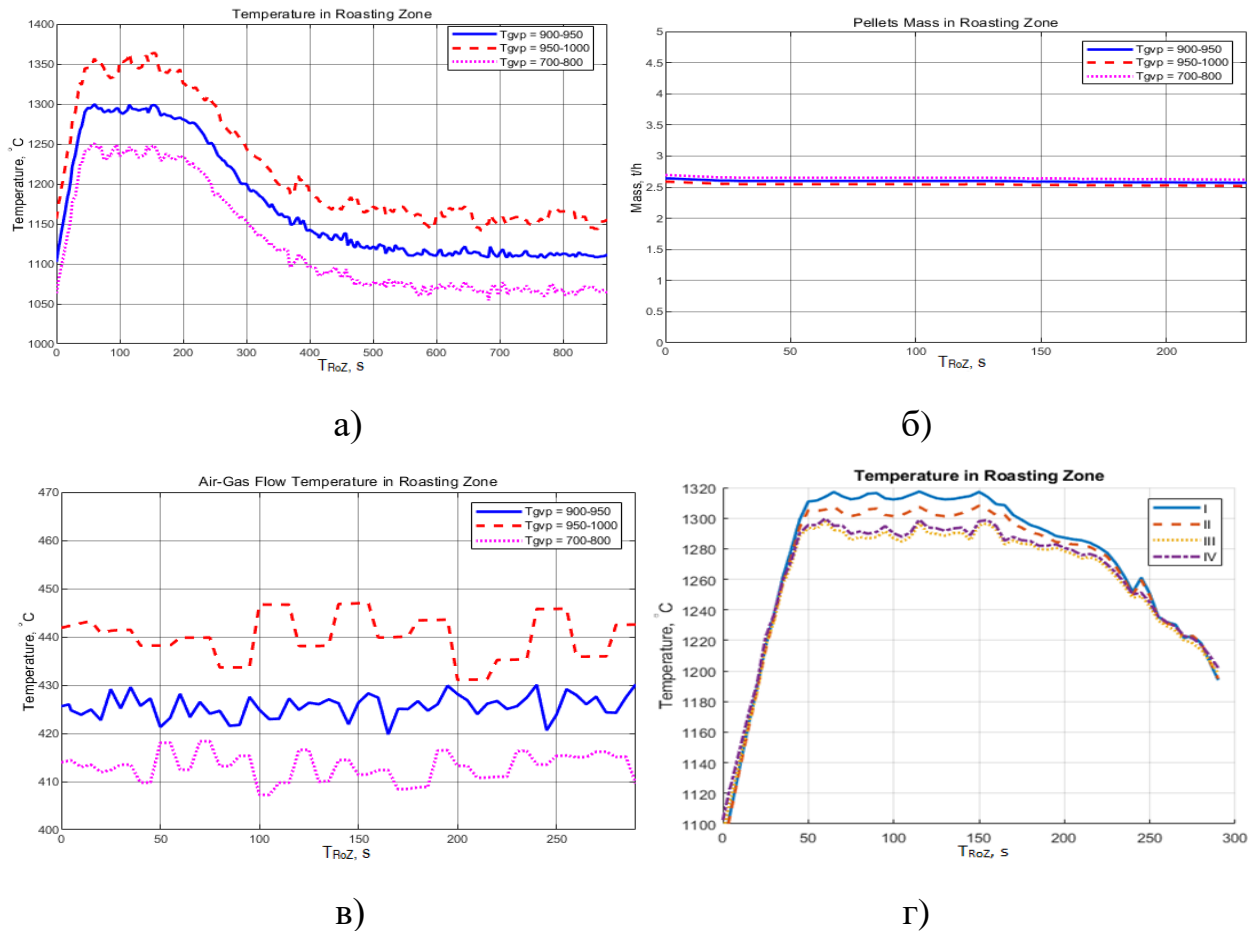


Рис. 2.19. Результати моделювання при розкиді температури теплоносія:

а – температури верхнього шару; б – маси окатишів на візках КС;

в – температури теплоносія; г – із поступовим урахуванням вхідних параметрів

Характеристика температури теплоносія (рис. 2.19, в) показує, що температура коливається в межах від 420 до 430 °С при усередненому значенні теплоносія. При максимізації та мінімізації температурного змінення відбувається відповідно збільшення та зменшення температури теплоносія на величину ± 15 °С. Визначено вплив на температуру теплоносіїв вхідних множин: маси окатишів із зони попереднього нагрівання, температури теплоносія із зони охолодження і витрати газу з атмосферним повітрям. Результати моделювання представлені на рис. 2.19, г, де: I – урахування тільки температури верхнього шару з ЗПН, II – маси окатишів, що надходять із ЗПН, III – температури теплоносія із ЗОІ та IV – урахування всіх вхідних параметрів. Графік I температури верхнього шару, у порівнянні з результуючою характеристикою графіка V, має відхилення, а саме:

температурний режим перевищує встановлені регламентовані норми та досягає 1320 °С, існують коливальність і більш виражена стохастичність при спаданні характеристики. Форми характеристик збігаються і носять той самий характер. Характеристика II має ті самі ознаки, що й перший графік. Проте, температурний режим досягає лише відмітки в 1305 °С, що є допустимим за регламентом технологічного процесу. Передостання характеристика III більш схожа на результуючий графік, але має просадку за температурним режимом.

За результатами досліджень можна зробити висновок, що температура теплоносія газоповітряного потоку із зони випалювання, температура верхнього шару окатишів із другої зони сушіння окатишів, витрати природного газу й атмосферного повітря мають вплив на вихідні характеристики зони попереднього нагрівання. Температура теплоносіїв газоповітряних потоків із зони охолодження, температура верхнього шару окатишів із зони попереднього нагрівання, витрати природного газу й атмосферного повітря мають вплив на вихідні характеристики зони випалювання.

2.5. Моделювання процесів керування зміцненням окатишів із використанням регулятора нечіткої логіки

У зоні рекуперації закінчується процес зміцнення окатишів нижнього горизонту шару на візках конвеєрної стрічки. Зміцнення окатишів відбувається за рахунок перенесення тепла з верхнього горизонту шару до нижнього. Верх шару холодне, а температура на межі «шар-ліжка» наближається до значень температури (1180–1200) °С. Контроль за ступенем прогрівання нижніх горизонтів шару окатишів визначається за температурою потоку теплоносіїв, які відходять, що повинна бути в межах від 280 до 300 °С.

Експертним шляхом за експериментальними даними визначені параметри для вхідних і вихідних нечітких множин. Для вхідних множин вони є такими: [Tsh4]=[900–1450] °С, [Mo2]=[2,2–2,8] т/год, [Tr4]=[350–550] °С, а для вихідних: [Tsh5]=[600–800] °С, [Mo3]=[1,5–2] т/год. Ці дані дозволили сформулювати

правила для роботи нечіткого регулятора при виконанні процесу рекуперації. Використано п'ять функцій приналежності для кожної вхідної і вихідної змінної. База правил забезпечує виконання зміцнення окатишів у ЗР і підготовляє їх до першого етапу охолодження. Використовуючи методику, що наведена у попередніх розділах роботи, і правила формування нечіткої логіки (2.9), розроблено нечіткі правила для опису роботи моделі. Одне із таких правил представлено в такому вигляді (2.15):

$$R_t(ЗР): \text{If } [(Tsh4 \text{ is PS}) \vee (Mo2 \text{ is Z}) \vee (Tp3 \text{ is NS})] \text{ then} \\ [(Tsh5 \text{ is PL}) \square (Mo3 \text{ is Z})]. \quad (2.15)$$

Після синтезу бази правил і функцій приналежності та за допомогою підпрограми «Fuzzy» у середовищі програмування Matlab/Simulink виконано синтез загального висновку й визначено поверхні РНЛ для вихідних множин зони рекуперації, які представлені на рис. 2.20. Графіки зміни температури верхнього шару окатишів на виході із зони представлено на рис. 2.20 а, б, а для маси окатишів на візках КС – на рис. 2.20 в, г, на якому позначено такі графіки:

$$\begin{aligned} \text{а} - [Tsh5] = F([Tp3], [Tsh4]), \text{ б} - [Mo3] = F([Tsh4], [Tp3]), \\ \text{в} - [Tsh5] = F([Mo2], [Tsh4]), \text{ г} - [Mo3] = F([Tsh4], [Mo2]). \end{aligned}$$

Результати моделювання показали (рис. 2.20 а, б), що множини вихідної температури верхнього шару окатишів у зоні рекуперації залежать від значень вхідних множин температури верхнього шару окатишів і маси окатишів, що надходять із попередньої зони випалювання. Їхнє значення забезпечують регламентні параметри технологічного процесу в цій зоні. Нечіткі множини для визначення вихідної маси залежать від температури верхнього шару окатишів на візках КС, яка входить у досліджувану зону, і від температури теплоносія потоку із зони охолодження. Для забезпечення регламентної міцності окатишів процес термічного оброблення окатишів проводиться при зниженні температури над верхнім шаром окатишів і перенесенні більшої частини тепла на кордон (межу) «шар-ліжка». Температура $[Tsh5]$ верхнього шару окатишів на виході зони

рекуперації, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи зон охолодження, залежить пропорційно лінійно від суми температури заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки, температури верхнього шару окатишів зони випалювання $[T_{sh4}]$, вихідної температури $[T_{p4}]$ газоповітряного потоку першої зони охолодження і маси $[Mo2]$ шару окатишів на візках конвеєрної стрічки на виході зони випалювання.

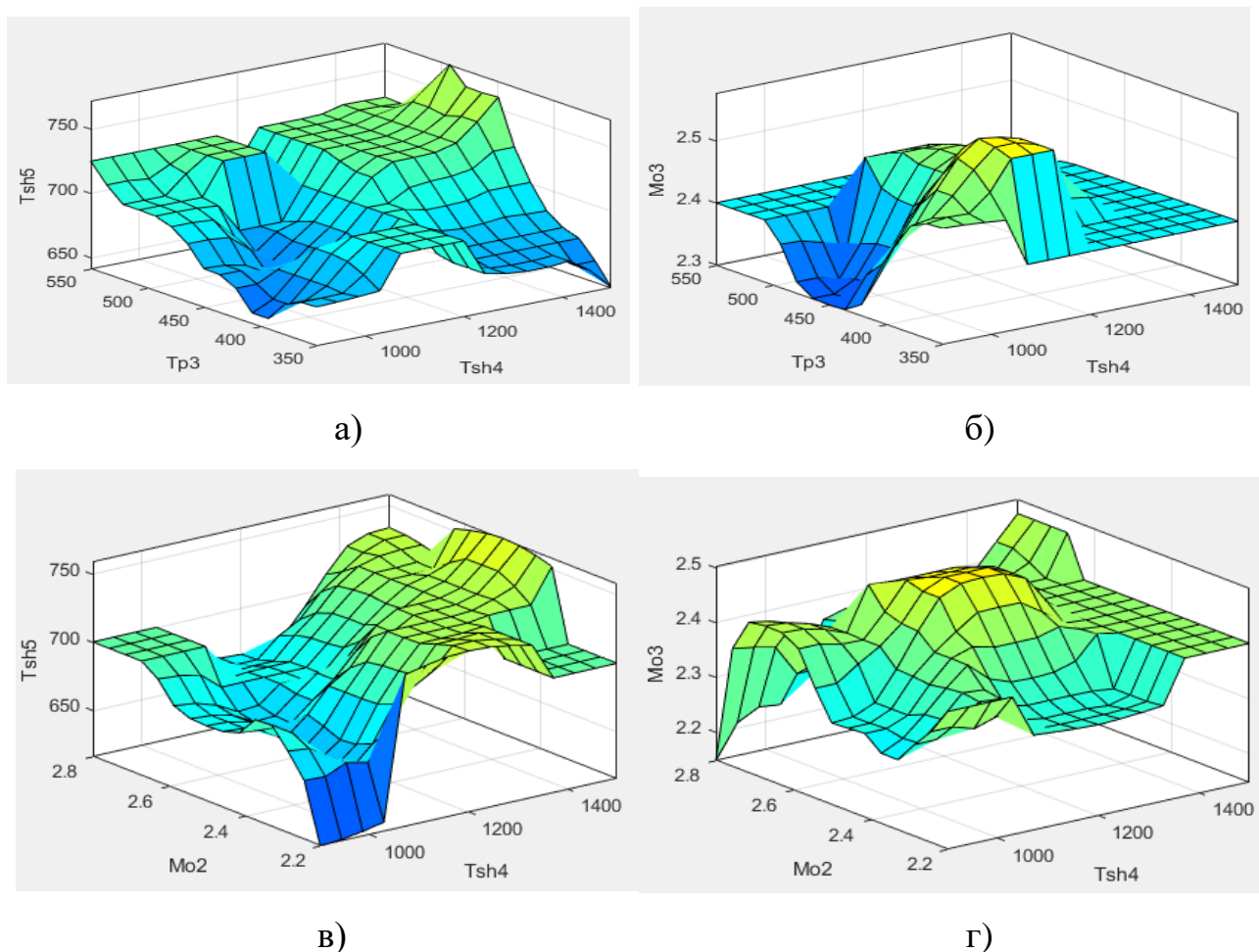


Рис. 2.20. Функціональні залежності зміни вихідних множин температури верхнього шару окатишів і їхньої маси від вхідних множин при керуванні процесом рекуперації

Маса $[Mo3]$ шару окатишів на виході із зони рекуперації зменшуються за експоненціальним законом у залежності від температури верхнього шару окатишів $[T_{sh5}]$ у цій зоні.

Для моделювання процесу рекуперації використаємо імітаційну модель, яка представлена на рис. 2.21.

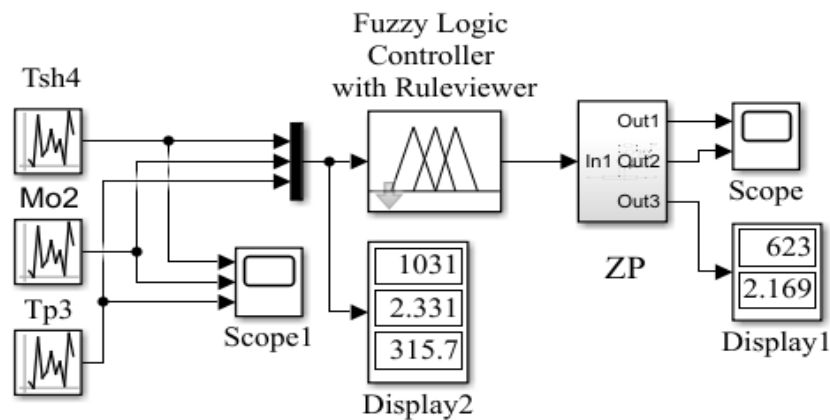


Рис. 2.21. Модель системи керування процесом рекуперації

У моделі контролер Fuzzy Logic Controller формує керуючі впливи на підтримку регламентних технологічних параметрів у зоні. Для цього задаються відповідні значення входних і вихідних множин. Цей контролер керує процесом рекуперації, закінчуючи процес зміцнення окатишів, і формує керуючі впливи для забезпечення регламентних параметрів у першій зоні охолодження. Для цього задаються вихідні множини: із зони випалювання – [Tsh4], [Mo2] і множини [Tp3] – температура теплоносія із охолодження.

Імітаційна модель системи керування процесом рекуперації окатишів на основі нечіткої логіки дозволила провести дослідження при подачі на вхід моделі множин, параметри яких вказано на рис. 2.22, а. На рис. 2.22, б представлено результати змін таких параметрів: температури шару окатишів на виході із зони випалювання – $Tsh5=F(t)$ (перший графік) для різних постійних часу аперіодичної і коливальних ланок передавальних функцій. Для визначення маси шару окатишів на візках КС – $Mo3=F(t)$ застосовується для зони рекуперації пропорційна ланка (другий графік). Залежність $Tsh4=F(t)$ представлена трьома графіками: 1 і 2 – для двох аперіодичних ланок: $W(s)=\frac{0,8}{-s-1}$ і $W(s)=\frac{0,8}{-4s-1}$ і 3 – відповідно

коливальною ланкою: $W(s) = \frac{0,8}{-s^2 - 0,5s - 1}$. Результати досліджень показали, що

при максимальній температурі шару окатишів [Tsh4] у 1200 °С у зоні рекуперації (ZP) проходить зміцнення окатишів при зниженні температури до 700 °С. При зміні постійної часу об'єкта ZP у чотири рази, як видно з отриманих результатів дослідження, представлених на першому графіку на рис. 2.22, б, час перехідного процесу охолодження окатишів збільшується в три рази.

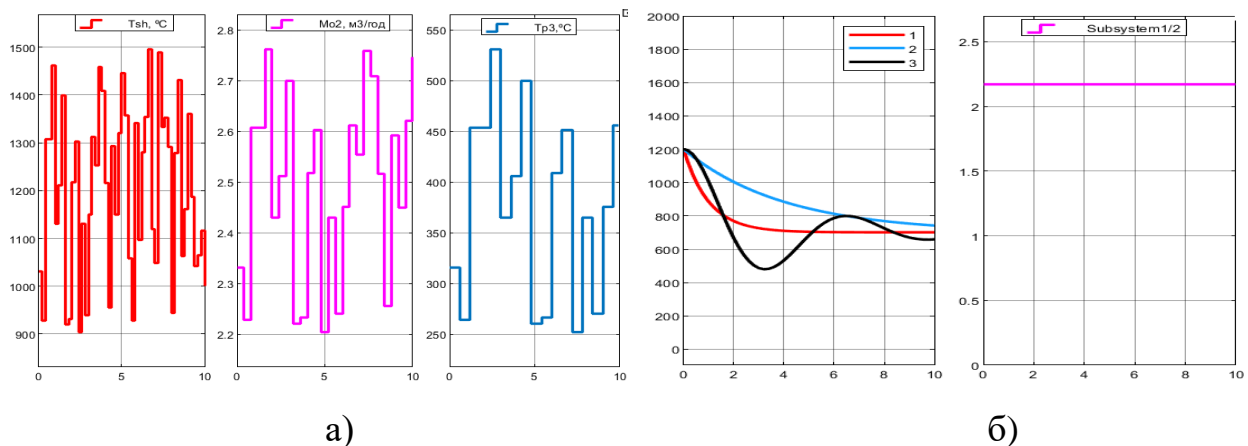


Рис. 2.22. Результати моделювання керування процесом рекуперації:

а – вхідні завдання; б – вихідні значення

Вихідні множини для маси окатишів [Mo3] залишаються незмінними в часі. Для визначення впливу температури теплоносія [Tr3] із першої зони охолодження на вихідні функціональні залежності зони рекуперації виконано моделювання при такому змінненні значень температури теплоносія: мінімальному від 700 до 800 °С, середньому 900–950 °С та максимальному 950–1000 °С. Результат моделювання наведено на рис. 2.23. Прийнято позначення щодо часового інтервалу T_{ReZ} – часовий інтервал у ZP, що дорівнює 174 с. За наведеними характеристиками бачимо, що температурний графік (рис. 2.23, а), при усередненому значенні температури теплоносія, спадає від 1082 до 920 °С, а при максимальному та мінімальному розкиді змінюється з деяким пропорційним збільшенням та зменшенням (на ± 25 °С, відповідно) уздовж усієї зони.

Маса окатишів (рис. 2.23, б) майже не змінюється на всьому інтервалі температурного розкиду, оскільки проходять процеси, пов'язані з охолодженням окатишів. Вхідні множини впливають на температурний режим, як показують результати моделювання, що представлені на рис. 2.23, в.

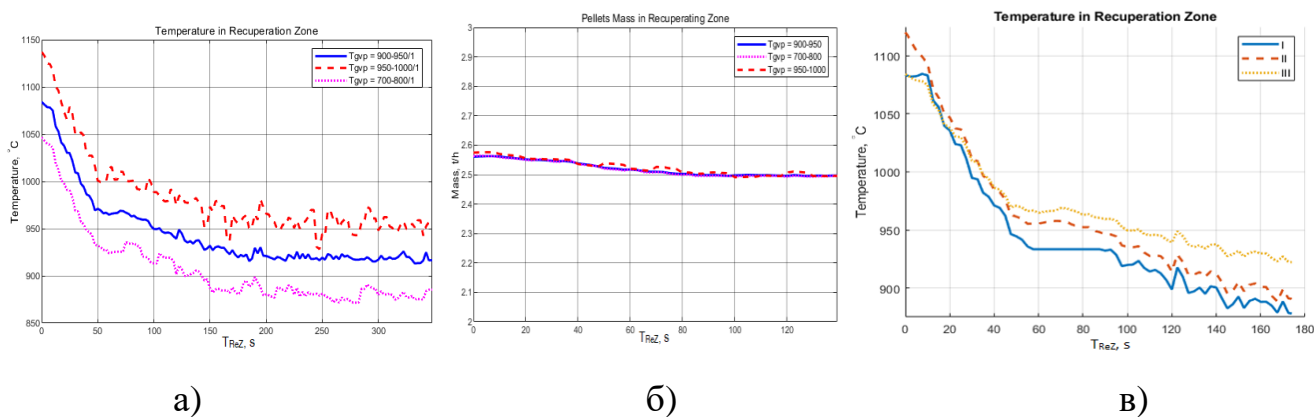


Рис. 2.23. Результати моделювання при змінах температури теплоносія на вході в зону рекуперації: а – температури верхнього шару окатишів; б – маси окатишів на візках КС; в – із поступовим урахуванням вхідних множин

За результатами досліджень можна зробити висновок, що зміна значень параметрів температури теплоносія газоповітряного потоку із першої зони охолодження й температури верхнього шару окатишів із зони випалювання не впливають на час перехідного процесу температури охолодження верхнього шару окатишів у зоні рекуперації.

2.6. Моделювання процесів керування процесом охолодження окатишів із використанням регулятора нечіткої логіки

Зона охолодження розділена на дві секції. Через першу секцію вентилятором продувається підігріте повітря температурою 250 °С, яке відбирається з-під ковпака другої зони охолодження й транспортується частково на інжекторні пальники як первинне повітря у високотемпературні зони, а інша частина повітря використовується для охолодження окатишів. Друга стадія

охолодження окатишів призначена для доохолодження шару окатишів у другій зоні охолодження до температури менше 120 °С, для чого атмосферне повітря вентилятором подається в зону через повітряні камери і, проходячи через шар окатишів знизу вгору, охолоджує їх. Нагрітий в шарі газоповітряний потік подається в ЗСІ.

При керуванні процесом охолодження обпалених окатишів у першій зоні на них одночасно діють дві вхідні нечіткі множини зони рекуперації: температура верхнього шару окатишів [Tsh5] і їхня маса на візках КС [Mo3], а також додаткова множина [Pb1], призначеної для забезпечення відповідного тиску атмосферного повітря у цій зоні. На виході першої зони охолодження формуються параметри трьох вихідних множин: температури верхнього шару окатишів [Tsh6], їхня маса на візках КС [Mo4] і температури теплоносія [Tr3], яка необхідна для застосування в зонах випалювання й попереднього нагрівання. У другій зоні діють вхідні множини: температура верхнього шару окатишів [Tsh6] і їхня маса на візках КС [Mo3], а також додаткова множина [Pb2], призначеної для забезпечення відповідного тиску повітря в цій ТЗ. На виході цієї зони формуються дві вихідні множини: температура верхнього шару окатишів [Tsh7] і їхня маса на візках КС [Mo5].

Використовуючи експертну оцінку, встановлено діапазони зміни вхідних і вихідних множин: [Tsh6]=[550–750] °С, [Mo4]=[1,9–2,1] т/год, [Pb2]=[50–350] м³/год, [Tsh6]=[550–750] °С, [Mo4]=[1,9–2,1] т/год і [Pb2]=[50–350] м³/год, [Tsh7]=[250–450] °С і [Mo5]=[1,8–2,0] м³/год і [Tr1]=[300–350] °С, [Tsh7]=[250–450] °С і [Mo5]=[1,8–2,0] м³/год і [Tr1]=[300–350] °С .

Використовуючи параметри вхідних і вихідних множин, сформульовані правила для РНЛ, який керує технологічним процесом у першій зоні охолодження. Для цієї зони правила надані на рис. Б.6, а для другої стадії охолодження база правил – на рис. Б.7 додатка Б. Для кожної вхідної і вихідної змінної використано по п'ять функцій приналежності, які застосовано при формуванні правил роботи РНЛ. База правил забезпечує регламентний процес

охолодження окатишів і підготовлює керуючий сигнал для виконання другого етапу охолодження. Сукупність правил першої стадії охолодження забезпечує процес перерозподілу газоповітряних потоків у інші зони машини, а при остаточному охолодженні окатишів подається теплоносії у першу зону сушіння. На основі логічних рівнянь (2.9) прикладом одного із правил роботи першої стадії охолодження буде (2.16):

$$R_t \text{ (ЗОI): If } [(Tsh5 \text{ is PS}) \square (Mo3 \text{ is Z}) \square (Pb1 \text{ is NS})] \text{ then} \\ [(Tsh6 \text{ is PL}) \square (Mo4 \text{ is Z}) \square (Tp3 \text{ is NL})]. \quad (2.16)$$

Другої зони охолодження буде (2.17):

$$R_t \text{ (ЗОII): If } [(Tsh6 \text{ is PS}) \square (Mo4 \text{ is Z}) \square (Pb2 \text{ is NS})] \text{ then} \\ [(Tsh7 \text{ is PL}) \square (Mo5 \text{ is Z}) \square (Tp1 \text{ is NL})]. \quad (2.17)$$

Після синтезу бази правил і функцій приналежності (трикутні) за допомогою підпрограми «Fuzzy» у середовищі програмування Matlab/Simulink виконано синтез загального висновку й поверхні РНЛ.

На графіку рис. 2.24 для першої стадії охолодження представлено: а і б – температури верхнього шару окатишів на виході із зони; в і г – маса окатишів на візках КС; д і е – температури теплоносія потоку. Для цієї зони графіки представляють такі функції:

$$a - [Tsh6]=F([Mo3], [Tsh5]), \quad б - [Tsh6]=F([Tsh5], [Pb1]), \\ в - [Mo4]=F([Mo3], [Tsh5]), \quad г - [Tp3]=F([Tsh5], [Mo3]).$$

Графіки для другої зони охолодження представлені рис. 2.25:

$$a - [Tsh7]=F([Pb2], [Tsh6]), \quad б - [Mo5]=F([Tsh6], [Mo4]), \\ в - [Tp1]=F([Pb2], [Tsh6]), \quad г - [Tsh7]=F([Tsh6], [Mo4]).$$

При керуванні процесом охолодження обпалених окатишів у кожній зоні охолодження на них одночасно діють декілька вхідних нечітких технологічних параметрів. У першій зоні на них одночасно діють дві вхідні нечіткі параметри

ЗР: температура верхнього шару окатишів і їхня маса на візках, а також додатковий тиск атмосферного повітря. На виході цієї зони формуються параметри трьох вихідних параметрів: температури верхнього шару окатишів, їхня маса на візках КС і температури теплоносія, яка необхідна для застосування ЗВ і ЗПН.

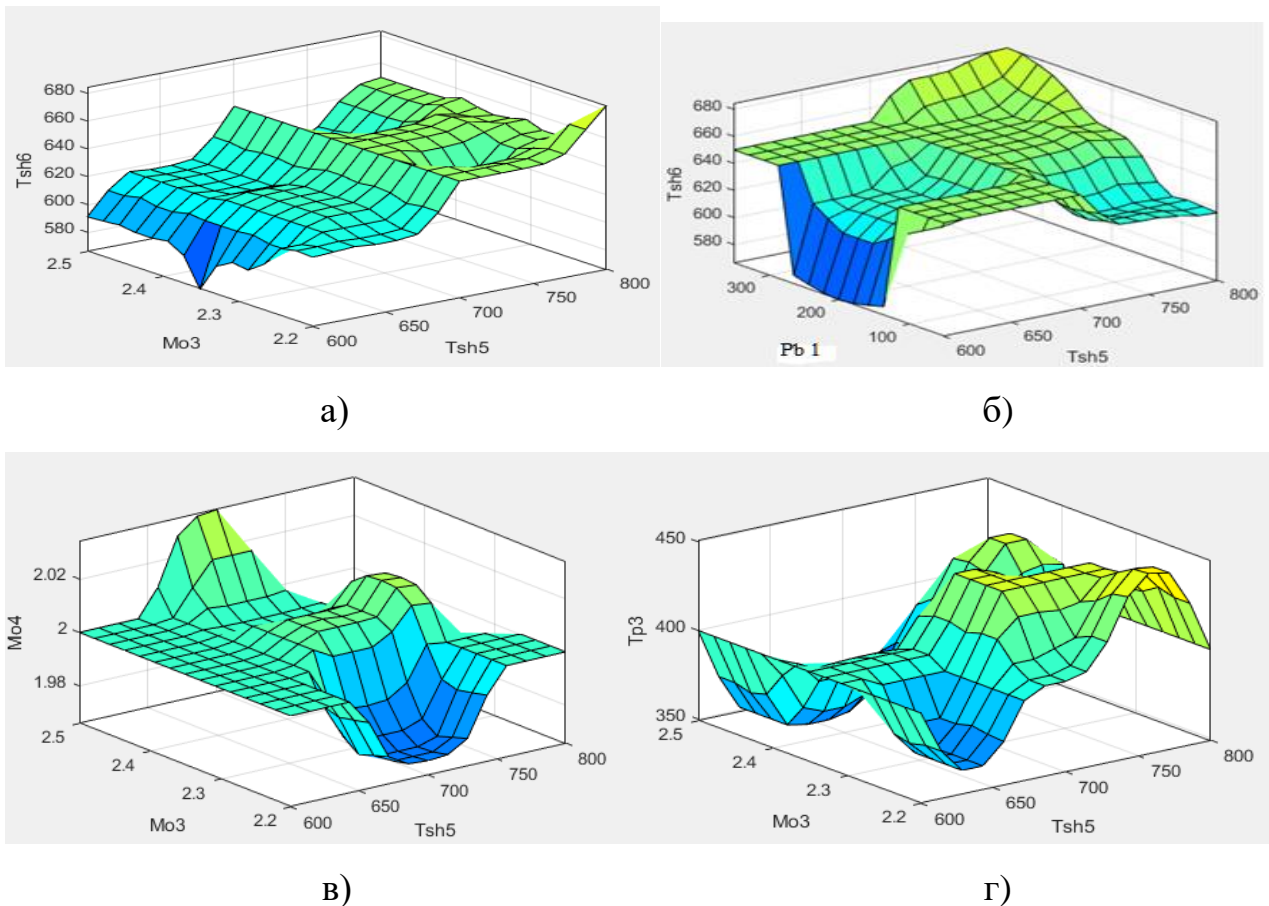


Рис. 2.24. Функціональні залежності зміни вихідних множин першої зони охолодження температури верхнього шару окатишів і їх маси від вхідних множин

Як показує аналіз графіка $[Tsh6]=F([Mo3], [Tsh5])$, що представлений на рис. 2.24, а, вихідна температура верхнього шару окатишів у ЗО1 прямо пропорційно залежить від температури верхнього шару окатишів $[Tsh5]$ і маси на візках КС $[Mo3]$, а також додатково по експоненціальному закону впливає тиск атмосферного повітря $[Pb1]$ (рис. 2.24, б), яке нагнітається вентилятором у цю зону.

Температура [Tsh6] верхнього шару окатишів на виході першої зони охолодження, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи другої зони охолодження, залежить пропорційно лінійно від температури заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки і температури [Tsh5] верхнього шару окатишів зони рекуперації, маси [Mo3] шару окатишів на візках конвеєрної стрічки і тиску [Pb1] атмосферного повітря. Температура [Tr3] теплоносія газоповітряного потоку на виході з першої зони охолодження визначається температурою, яка необхідна для забезпечення регламентних режимів роботи першої зони сушіння та змінюється за експоненціальним законом у залежності від тиску [Pb1] атмосферного повітря.

Маса [Mo4] шару окатишів на виході першої зони охолодження зменшуються за експоненціальним законом у залежності від температури верхнього шару окатишів [Tsh6] і тиску атмосферного повітря [Pb1] (рис. 2.24, в). На виході першої зони охолодження формуються параметри трьох вихідних множин: температури верхнього шару окатишів [Tsh6], їхня маса на візках КС [Mo4] і температури теплоносія [Tr3], яка необхідна для застосування в зонах випалювання й попереднього нагрівання.

Як показує аналіз графіка $[Tsh7]=F([Pb2], [Tsh6])$, що представлений на рис. 2.25, а, вихідна температура верхнього шару окатишів другої зони сушіння прямо пропорційно залежить від температури верхнього шару окатишів [Tsh6] і тиску атмосферного повітря [Pb2]. Маса на візках КС [Mo4] (рис. 2.25, б) залежить прямо пропорційно від маси на візках КС, що надходить з першої зони охолодження, і нелінійно від заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів КС.

Температура [Tsh7] верхнього шару окатишів на виході другої зони охолодження, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи другої зони охолодження, залежить пропорційно лінійно від температури заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки і температури [Tsh6] верхнього шару окатишів першої зони охолодження, маси [Mo4] шару окатишів на візках конвеєрної стрічки і тиску

[Pb2] атмосферного повітря. Температура [Tr1] теплоносія газоповітряного потоку на виході з другої зони охолодження визначається температурою, яка необхідна для забезпечення регламентних режимів роботи першої зони сушіння та змінюється за експоненціальним законом у залежності від тиску [Pb2] атмосферного повітря (рис. 2.25, в).

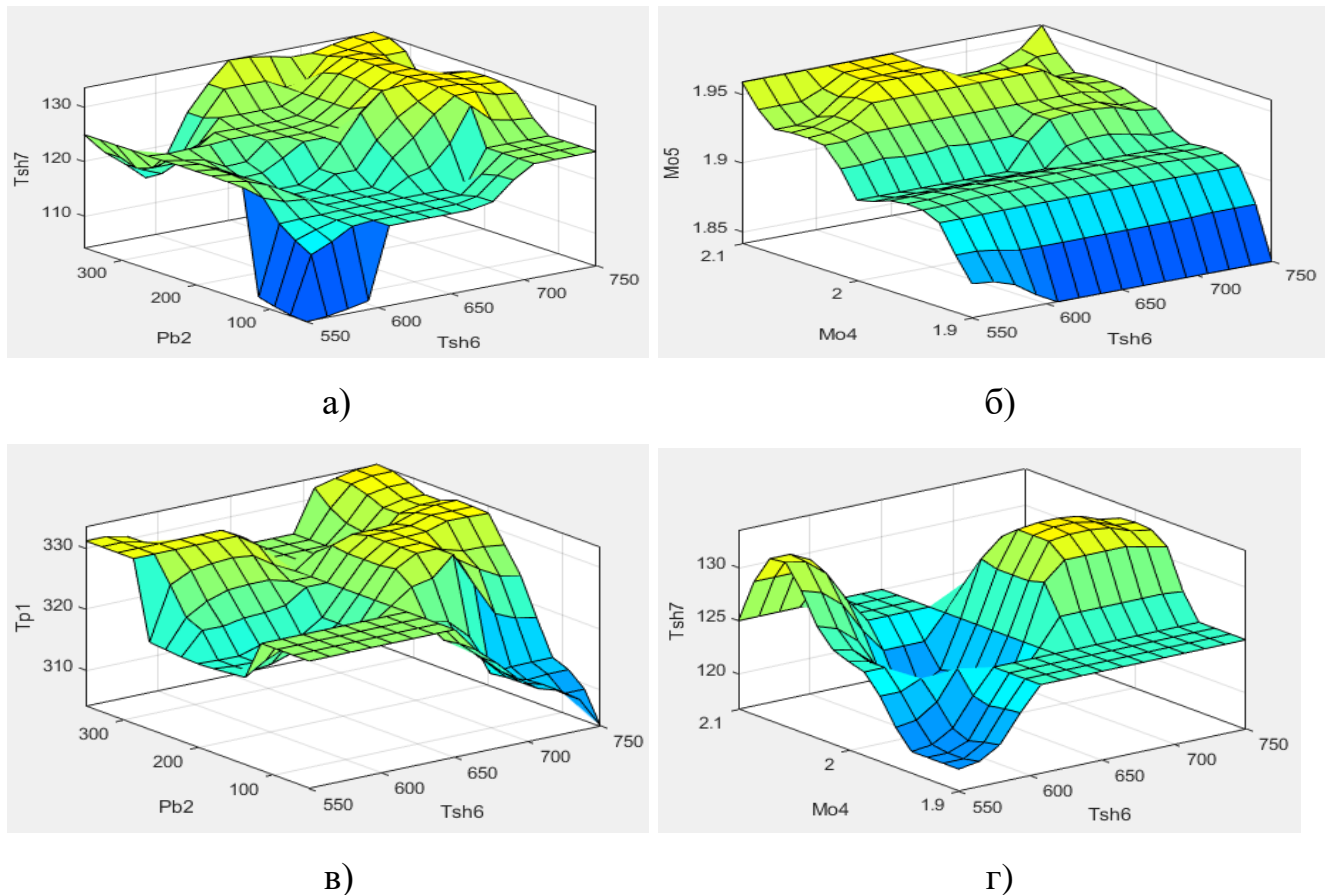


Рис. 2.25. Функціональні залежності зміни вихідних множин: температури теплоносіїв, маси і температури верхнього шару окатишів при виконанні процесу другої стадії охолодження

Маса [Mo5] шару окатишів на виході другої зони охолодження зменшуються за експоненціальним законом у залежності від температури верхнього шару окатишів [Tsh6] і тиску атмосферного повітря [Pb2] (рис. 2.24, в).

На другій стадії охолодження діють вхідні множини першої стадії: температура верхнього шару окатишів і їхня маса на візках КС, а також додаткової множини, що призначена для забезпечення відповідного тиску повітря

на цій стадії охолодження. На виході ЗОІ формуються дві вихідні множини: температура верхнього шару окатишів і їхня маса на візках КС.

Контролер Fuzzy Logic Controller (рис. 2.26) керує першою стадією процесу охолодження окатишів і формує керуючі впливи для останньої зони охолодження. На схемах моделі (рис. 2.26) технологічний об'єкт ЗОІ позначає першу зону охолодження, а ЗОІІ – другу. Результати досліджень на імітаційній моделі системи керування процесом термічного оброблення окатишів у зонах охолодження на основі нечіткої логіки отримано при подачі на вхід моделей сигналів відповідних значень параметрів. Для першої стадії вони надані на рис. 2.27, а і для другої стадії – рис. 2.28, а. Результати вихідних множин надано на рис. 2.27, б і рис. 2.28, б. Перші графіки $T_{sh6}=F(t)$ і $T_{sh7}=F(t)$ представляють функціональні залежності температури шару окатишів на виході із зон для різних постійних часу аперіодичної і коливальної ланок передавальних функцій, а для інших графіків застосована пропорційна ланка. Залежність $T_{sh6}=f(t)$ і $T_{sh7}=f(t)$ представлені трьома графіками: 1 і 2 – аперіодичними ланками: $W(s) = \frac{0,9}{-s-1}$

$W(s) = \frac{0,9}{-2s-1}$ і 3 – відповідно коливальною ланкою: $W(s) = \frac{0,9}{-s^2 - 0,5s - 1}$.

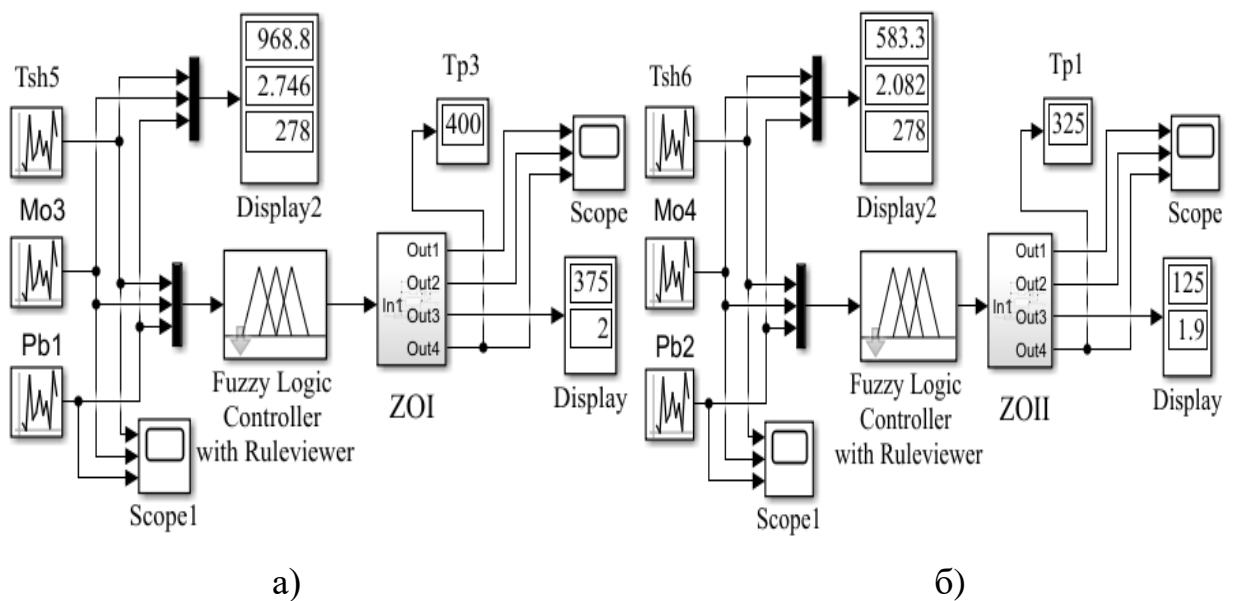


Рис. 2.26. Модель керування процесом охолодження окатишів:

а – першій стадії; б – другій стадії

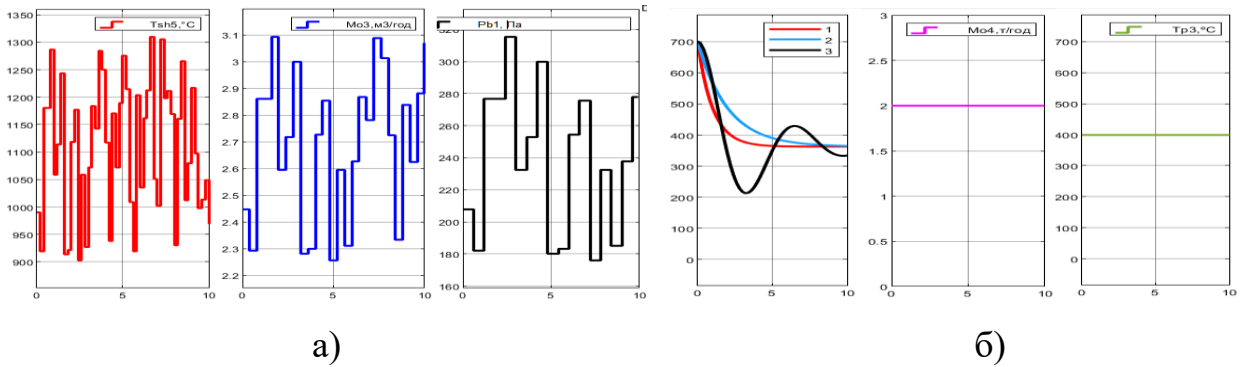


Рис. 2.27. Результати моделювання керування процесом першою стадією охолодження окатишів: а – вхідні завдання; б – вихідні значення

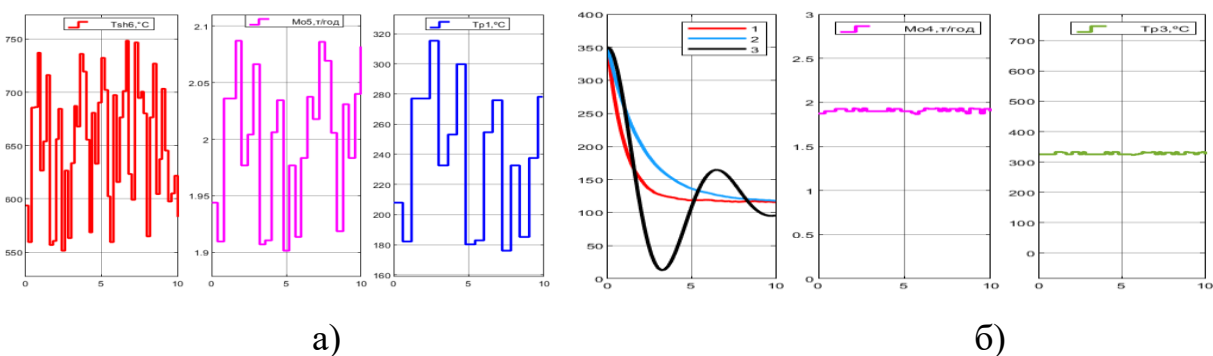


Рис. 2.28. Результати моделювання керування процесом охолодження окатишів у другій зоні: а – вхідні завдання; б – вихідні значення

Результати досліджень показали, що охолодження верхнього шару окатишів у досліджуваних зонах суттєво залежить від вхідних множин відповідно для першої і другої стадій охолодження: $[Tsh5]$ і $[Pb1]$ $[Tsh6]$ і $[Pb2]$. При зменшенні постійних часу перехідних функцій ланок систем автоматичного керування технологічних об'єктів температура охолодження верхнього шару окатишів в зонах охолодження збільшується.

Як показали результати досліджень, друга стадія охолодження верхнього шару окатишів суттєво залежить від вхідних множин: $[Tsh6]$ і $[Pb2]$. При зменшенні постійної часу об'єкта перехідний процес температури верхнього шару окатишів значно зменшується і відсутні коливання. Коли об'єкт ЗОП представлений коливальною ланкою – перехідний процес не має сталого

значення. Для першої стадії охолодження проведено ряд досліджень впливу вхідних множин на вихідні. Результат моделювання наведено на рис. 2.29.

На цьому рисунку прийнято позначення щодо часового інтервалу T_{CZ1} – часовий інтервал у ЗОІ, що дорівнює 464 с. На цих графіках позначено: а – характеристика температури верхнього шару окатишів в ЗОІ, б – характеристика зміни маси візків КС з окатишами в ЗОІ, в – характеристика температури ГПП і г – із поступовим урахуванням вхідних множин. За наведеними характеристиками бачимо, що температурний графік (рис. 2.29, а) витримує деяку встановлену температуру на початку, а потім стрімко спадає до $740\text{ }^{\circ}\text{C}$ із невеликими відхиленнями. Маса окатишів на візках КС (рис. 2.29, б) майже не змінюється, а температурний режим теплоносія ГПП у першій зоні охолодження ЗОІ (рис. 2.29, в) змінюється на інтервалі від 932 до $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ за спадаючим характером.

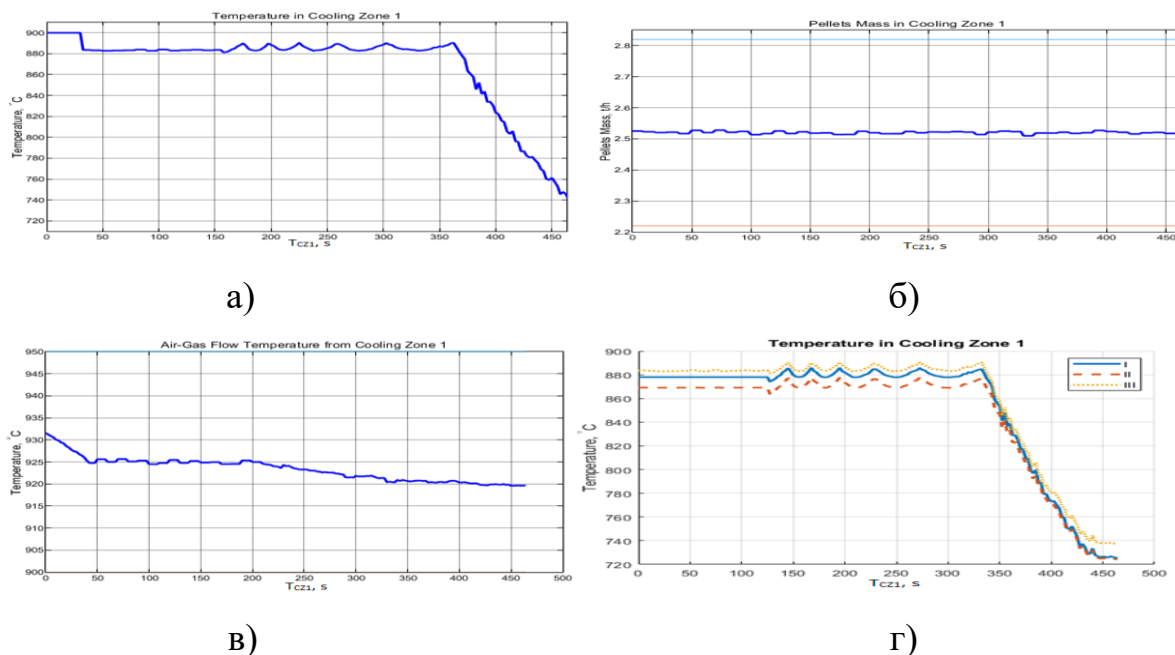


Рис. 2.29. Результати моделювання процесу охолодження:

а – температура верхнього шару окатишів; б – маса окатишів на візках КС, в – температура теплоносія; г – із поступовим урахуванням вхідних множин

Отримані результати моделювання впливів вхідних даних на температурний параметр представлені на рис. 2.29, г. На ньому позначено характеристики: I – без урахування тиску повітря в ЗОІ, II – без урахування маси окатишів, що надходять

із ЗР, III – з урахуванням усіх вхідних множин. З рис. 2.17, г бачимо, що три графіки мають схожий характер витримки температури та спадання й відрізняються лише пропорційно, що говорить нам про пропорційний вплив кожної з вхідних нечітких множин на температурну характеристику.

Для другої стадії охолодження проведено дослідження впливу вхідних множин на вихідні, зокрема вплив вхідних множин на значення вихідної температури. Для цього у середовищі програмування Matlab/Simulink виконано моделювання, результат якого наведено на рис. 2.30.

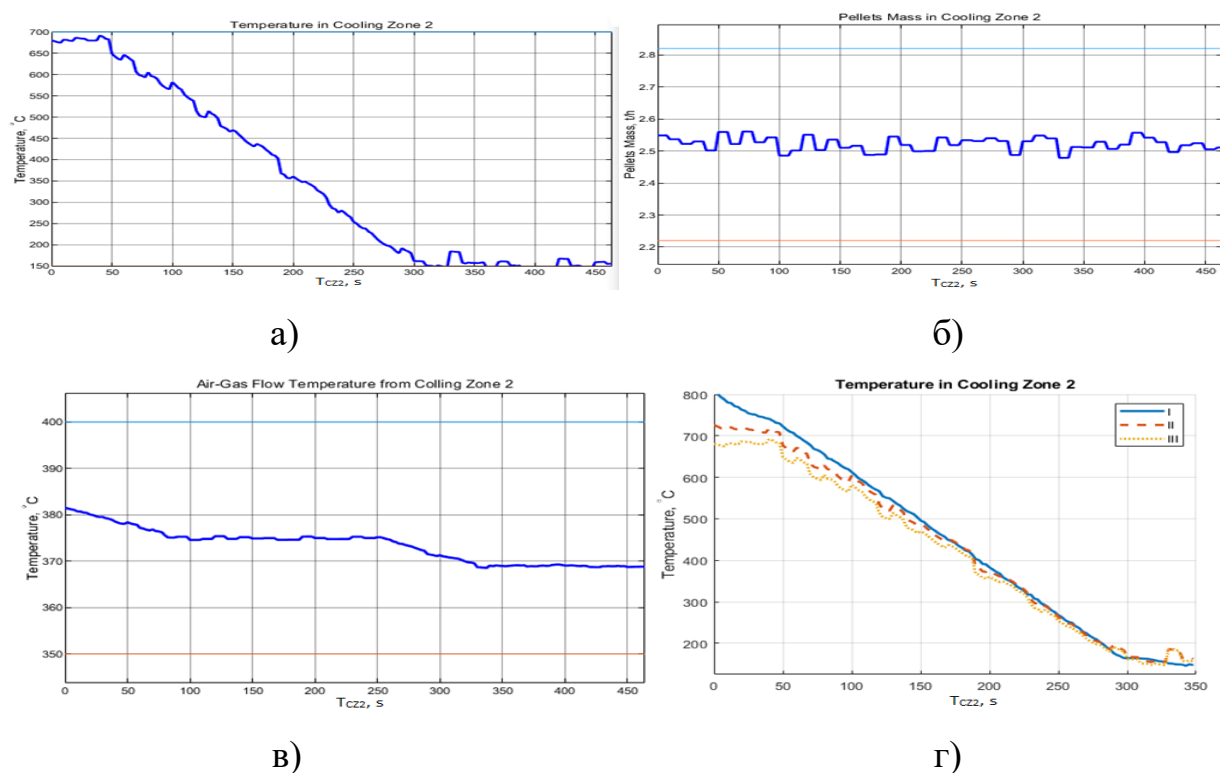


Рис. 2.30. Результати моделювання процесу другої стадії охолодження:
 а – температури верхнього шару окатишів; б – маси візків із окатишами;
 в – температури теплоносія; г – впливів різних вхідних множин

Регламентні значення параметрів маси візків конвеєрної стрічки ВМКТ із окатишами і температури теплоносія газоповітряного потоку майже не змінюється, а регламентні значення параметрів температури верхнього шару окатишів має спадаючий характер до нормованих значень, відповідно до 150 °С за регламентний час протікання технологічного процесу у 300 с. Це вказує на те, що у цій технологічній зоні забезпечується утримання регламентних значень

основних параметрів технологічного процесу за рахунок значень параметрів взаємопов'язаних перших технологічних зон сушіння і охолодження. Часовий інтервал (T_{CZ2}) моделювання дорівнює 348 с. За наведеними характеристиками бачимо, що температурний графік (рис. 2.18, а) витримує деяку встановлену температуру на початку, а потім стрімко спадає до 150 °С. Маса окатишів (рис. 2.30, б) майже не змінюється, а температурний режим (рис. 2.30, в) змінюється на інтервалі від 382 до 368 °С за спадаючим характером.

Результати моделювання впливів вхідних параметрів на температурний режим представлені на рис. 2.30, г, на якому позначено характеристики: I – без урахування тиску атмосферного повітря в зону, II – без урахування маси окатишів на візках КС, що надходять із попередньої зони, III – з урахуванням усіх вхідних множин. Три графіки мають схожий характер витримки температури та спадання, й відрізняються лише пропорційно, що говорить нам про пропорційний вплив кожної з вхідних множин на температурну характеристику верхнього шару окатишів.

Для забезпечення регламентних значень температур теплоносіїв газоповітряних потоків у взаємопов'язаних технологічних зонах випалювання і рекуперації на виході з першої технологічної зони охолодження потрібно управляти димотягами, змінюючи температуру газоповітряного потоку за експоненціальним законом. Визначено вплив на розподіл параметрів температури газоповітряних потоків за взаємопов'язаними технологічними зонами конвеєрної машини при управлінні димотягами за експоненціальним законом у функції зміни температури теплоносіїв, що відходять із першої зони охолодження. Встановлено, що потрібне значення температури теплоносіїв газоповітряного потоку для зон випалювання і рекуперації повинно бути з перевищенням у 1,17 рази.

За результатами досліджень можна зробити висновок, що температура верхнього шару окатишів із зони рекуперації має найбільший вплив на вихідні характеристики першої стадії охолодження при забезпеченні вентилятором відповідного вхідного тиску атмосферного повітря в цій зоні та необхідного для застосування в зонах випалювання й попереднього нагрівання.

Розглянуто питання вдосконалення процесу керування охолодження залізорудних окатишів у другій технологічній зоні охолодження випалювальної машини конвеєрного типу. На основі рішення систем нечітких функцій і принципів параметричної ідентифікації удосконалена математична модель, яка апроксимує динаміку термічного процесу охолодження залізорудних окатишів у технологічній зоні. Особливістю математичної моделі є те, що враховуються змінні технологічні параметрів взаємодіючих і сусідніх технологічних зон машини, залізорудних окатишів і витрат повітря. Проаналізовано характеристики перехідних процесів термічної обробки окатишів, отриманих при моделюванні, та виконано дослідження з метою визначення ефективного розподілу теплоносіїв газоповітряного потоку за технологічною зоною охолодження. Показано, що температура верхнього шару окатишів із попередньої зони охолодження та витрата атмосферного повітря мають найбільший вплив на вихідні характеристики другої зони охолодження. Визначено, що при збільшенні кількості атмосферного повітря за експоненціальним законом знижується температура верхнього шару окатишів у останній зоні технологічного процесу.

Висновки до розділу 2

У результаті досліджень процесів транспортування і обпалення окатишів із регламентними характеристиками у технологічних зонах отримані наступні основні наукові результати і закономірності по керуванню механізмами випалювальної машини конвеєрного типу:

- розроблено структурну імітаційну схему, яка надалі буде використана для розробки комплексної математичної моделі для керування процесом термічного оброблення окатишів за технологічними зонами машини, забезпечуючи в них регламентні режими роботи;

- температура верхнього шару окатишів на виході першої зони сушіння забезпечує регламентний режим роботи другої зони сушіння і визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур заданого значення

для верхнього шару окатишів для першої зони сушіння і газоповітряного потоку другої зони охолодження і пропорційно лінійно залежать від основності та вологи сирих окатишів, заданої швидкості переміщення візків і висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки;

– температура верхнього шару окатишів на виході другої зони сушіння, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи зони попереднього нагрівання, визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур заданого значення для верхнього шару окатишів для другої зони сушіння, верхнього шару на виході першої зони сушіння і газоповітряних потоків зони випалювання і пропорційно лінійно залежать від вологи окатишів і висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки на виході із першої зони сушіння;

– волога окатишів і висота шару окатишів на виході із остаточної зони сушіння зменшуються за експоненціальним законом в залежності від суми температур заданого значення для верхнього шару окатишів для другої зони сушіння, верхнього шару на виході другої зони сушіння і газоповітряного потоку зони випалювання;

– температура верхнього шару окатишів на виході зони попереднього нагрівання забезпечує регламентні параметри зони випалювання і визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур верхнього шару окатишів остаточної зони сушіння і газоповітряного потоку зони випалювання та пропорційно лінійно залежать від вологи окатишів і висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки і витрат природного газу й атмосферного повітря;

– температура верхнього шару окатишів на виході зони випалювання, яка необхідна для забезпечення регламентного режиму роботи зони рекуперації, визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки, температури верхнього шару окатишів зони попереднього нагрівання і вихідної температури газоповітряного потоку першої зони охолодження, маси шару окатишів на візках конвеєрної стрічки і витрат природного газу й атмосферного повітря;

– температура теплоносія газоповітряного потоку на виході із зони випалювання визначається за експоненціальним законом у залежності від суми температур, які необхідні для забезпечення регламентних режимів роботи другої зони сушіння і зони попереднього нагрівання;

– температура верхнього шару окатишів на виході зони рекуперації забезпечує регламентні режими роботи зон охолодження і залежить пропорційно лінійно від суми температур заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки, верхнього шару окатишів зони випалювання, вихідної температури газоповітряного потоку першої зони охолодження і маси шару окатишів на візках конвеєрної стрічки у цій зоні;

– маса окатишів із візками конвеєрної стрічки в зоні попереднього нагрівання не змінюється і не залежить від впливу температури газоповітряного потоку від взаємопов'язаної зони випалювання;

– вихідна температура верхнього шару окатишів у першій зоні охолодження забезпечує регламентний режим другої зони охолодження і прямо пропорційно залежить від суми температур заданої для цієї зони регламентного значення температури на верхньому шарі окатишів конвеєрної стрічки, верхнього шару окатишів зони рекуперації і маси на візках конвеєрної стрічки і додатково по експоненціальному закону потребує зміни тиску атмосферного повітря, яке нагнітається вентилятором у цю зону;

– температура теплоносія газоповітряного потоку на виході з другої зони охолодження визначається температурою, яка необхідна для забезпечення регламентних режимів роботи першої зони сушіння і змінюється за експоненціальним законом у залежності від тиску атмосферного повітря, що нагнітається вентилятором у цю зону;

– для усунення наявності некондиційних і нестандартних щодо технічних умов готових окатишів із-за не дотримання регламентних режимів роботи в технологічних зонах достатньо керувати температурою газоповітряного потоку по

експоненціальному закону, враховуючи значення регламентних параметрів взаємопов'язаних технологічних зон, в яких вже уточнені ці параметри;

– отримані поверхні нечітких висновків дозволили встановити залежності значень вихідних змінних від значень вхідних змінних нечітких моделей процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині у технологічних зонах сушіння, попереднього нагрівання, випалювання, рекуперації та охолодження окатишів, які є основою для програмування контролера або апаратної реалізації відповідних нечітких алгоритмів управління.

– для забезпечення регламентних значень температур теплоносіїв газоповітряних потоків у взаємопов'язаних технологічних зонах сушіння, попереднього нагрівання і випалювання конвеєрної машини на виходах технологічних зон випалювання і першої зони охолодження управляють димотягами, змінюючи температуру газоповітряного потоку за експоненціальним законом з перевищенням у 1,17 рази;

– температура теплоносіїв газоповітряних потоків на виході з шару окатишів із технологічної зони випалювання впливає на регламентні параметри зони попереднього нагрівання і прямо пропорційно залежить від висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки, різниці тиску при вході та виході із шару окатишів, швидкості проходження цього потоку через шар окатишів і переміщення візків уздовж технологічних зон;

– температура і витрати теплоносіїв газоповітряних потоків зон охолодження та потужність їх тягодуттьових механізмів мають експоненціальний закон впливу не тільки на температуру верхнього шару окатишів, а й на перерозподіл температур у шарі окатишів на візках конвеєрної стрічки;

– для забезпечення регламентних параметрів температур у шарі окатишів і теплоносіїв газоповітряних потоків у взаємопов'язаних технологічних зонах сушіння, попереднього нагрівання, випалювання, рекуперації й охолодження виникає необхідність лінійно управляти у функції швидкістю переміщення візків конвеєрної стрічки і продуктивністю димотягів і вентиляторів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ОКАТИШІВ І РОЗРОБКА МЕТОДІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ У ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗОНАХ

3.1. Розробки комплексної математичної моделі керування процесом оброблення окатишів на конвеєрних машинах

Виконаний аналіз наукової літератури й отримані результати наукових досліджень окремих технологічних зон показали, що для забезпечення ефективних температурних режимів на конвеєрній машині необхідне математичне моделювання теплових, газоповітряних і фізико-хімічних процесів на випалювальній машині конвеєрного типу тощо. Це потребує складання комплексної математичної моделі для дослідження цих процесів. Використання алгоритмів нечіткої логіки дозволяє врахувати змінні нечіткі множини і виконати ефективне керування технологічним процесом. Результати досліджень за допомогою математичної моделі дозволяють розробити технічні рішення, що сприяють забезпеченню поліпшення газодинамічних характеристик у шарі окатишів, врахувати вплив температури теплоносіїв взаємопов'язаних зон, виконати автоматизований перерозподіл теплоносіїв уздовж технологічних зон машини. Для побудови нечіткої математичної моделі експертним шляхом, враховуючи результати експериментальних досліджень, визначено вхідні та вихідні нечіткі параметри для кожної технологічної зони, яка є об'єктом керування. При розробці комплексної математичної моделі враховано імітаційну комплексну модель і схему автоматизації, які відповідно представлені на рис. 2.1 і рис. 2.2. Враховуючи ці зауваження, розроблена математична модель взаємопов'язаних між собою нечітких логічних рівнянь для знаходження вагових коефіцієнтів вихідних параметрів кожної технологічних зони і машини вцілому, яка представлена виразами (3.1). У рівняннях використано лінгвістичну оцінку, де $CM_i := [NL, NS, Z, PS, PL]$ – терми,

$i=1, 2, 3...n$; $B_{R_i}(Z...)$ і $B_{R_i}(BMKT)$ – бази даних для відповідних зон і випалювальної машини конвеєрного типу.

$B_{R_i}(BMKT)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{R_i}(ZCI): R_i : \text{If} \left[\begin{array}{l} W1 := \epsilon M_i \wedge Oc := \epsilon M_i \wedge Vkv := \epsilon M_i \wedge \\ \wedge Tp := \epsilon M_i \wedge H1 := \epsilon M_i \wedge Tsh := \epsilon M_i; \end{array} \right] \text{then} \\ \quad [Tsh1 := \epsilon M_i \wedge W2 := \epsilon M_i \wedge H2 := \epsilon M_i]; \\ B_{R_i}(ZCII): R_i : \text{If} [Tsh1 := \epsilon M_i \wedge W2 := \epsilon M_i \wedge H2 := \epsilon M_i] \text{then} \\ \quad [Tsh2 := \epsilon M_i \wedge W3 := \epsilon M_i \wedge H3 := \epsilon M_i]; \\ B_{R_i}(ZPH): R_i : \text{If} [Tsh2 := \epsilon M_i \wedge W3 := \epsilon M_i \wedge H3 := \epsilon M_i] \text{then} \\ \quad [Tsh3 := \epsilon M_i \wedge Mo1 := \epsilon M_i \wedge Tp := \epsilon M_i]; \\ B_{R_i}(ZB): R_i : \text{If} [Tsh3 := \epsilon M_i \wedge Mo1 := \epsilon M_i \wedge Tp3 := \epsilon M_i] \text{then} \\ \quad [Tsh4 := \epsilon M_i \wedge Mo2 := \epsilon M_i \wedge Tp4 := \epsilon M_i]; \\ B_{R_i}(ZP): R_i : \text{If} [Tsh4 := \epsilon M_i \wedge Mo2 := \epsilon M_i \wedge Tp4 := \epsilon M_i] \text{then} \\ \quad [Tsh5 := \epsilon M_i \wedge Mo3 := \epsilon M_i \wedge Pb := \epsilon M_i]; \\ B_{R_i}(ZOI): R_i : \text{If} [Tsh5 := \epsilon M_i \wedge Mo3 := \epsilon M_i \wedge Pb1 := \epsilon M_i] \text{then} \\ \quad [Tsh6 := \epsilon M_i \wedge Mo4 := \epsilon M_i \wedge Pb2 := \epsilon M_i]; \\ B_{R_i}(ZOII): R_i : \text{If} [Tsh6 := \epsilon M_i \wedge Mo4 := \epsilon M_i \wedge Pb2 := \epsilon M_i] \text{then} \\ \quad [Tsh7 := \epsilon M_i \wedge Mo5 := \epsilon M_i]. \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Отримана система логічних нечітких рівнянь і розроблена комплексна математична модель керування термічним обробленням окатишів, схема якої надана на рис. 3.1, дозволяють проводити дослідження процесу, використовуючи розроблену модель, виконані дослідження із визначенням ефективних температурних режимів у кожній технологічній зоні. Керування термічним обробленням окатишів може виконуватися, як окремими технологічними зонами, так і в комплексі. На вхід першої зони сушіння розробленої моделі подаються значення вхідних нечітких множин: $[W1]$, $[H1]$, $[Tp1]$, $[Vkv]$ і $[Tshz]$.

Вихідні параметри перших шести зон виводяться на Score, останньої зони сушіння окатишів – Display. До складу кожного блоку технологічної зони входять регулятор нечіткої логіки з елементами зв'язку і передаточними ланками представлення моделей об'єктів керування технологічних зон. Особливості цієї схеми полягають у тому, що в ній використовуються звороти зв'язки між зонами:

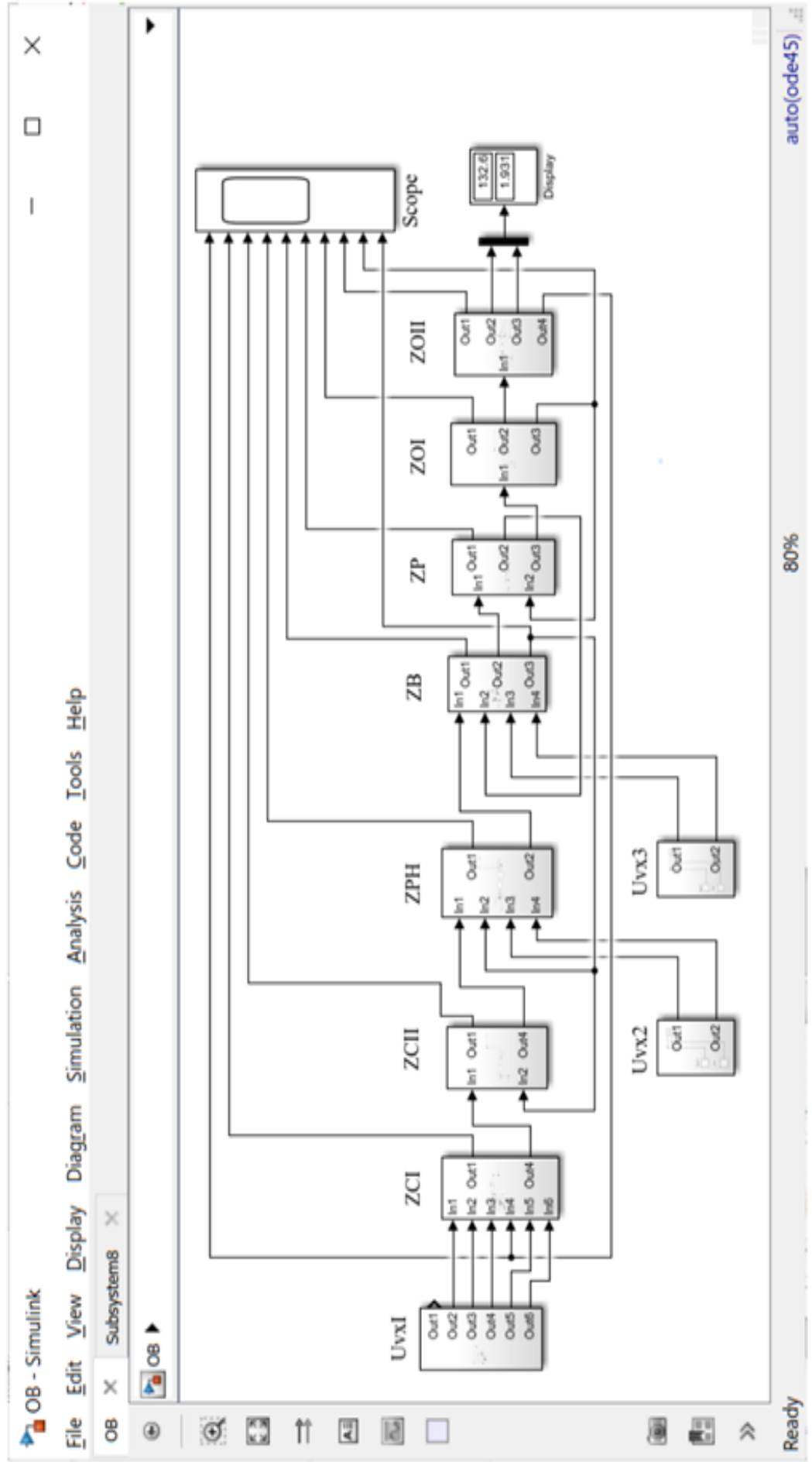


Рис. 3.1.1. Схема комплексної математичної моделі процесу керуванням термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині

ЗОП – ЗС1, ЗВ – ЗСП – ЗПН, ЗО1– ЗР, ЗР – ЗВ.

Схема комплексної математичної моделі процесу керуванням термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині використовує існуючі схеми керування технологічними зонами, які доповнюються нечіткими регуляторами, які працюють використовуючи рівняння (3.1). Варіант структурної схеми система керування процесом термічної обробки окатишів у технологічній зоні сушіння окатишів з параметричної адаптацією (рис. 3.2) являє собою дворівневу систему управління: на нижньому (виконавчому) рівні знаходиться чіткий регулятор (наприклад, ПД-регулятор), на верхньому – нечіткий регулятор. За допомогою нечіткого регулятора здійснюється налаштування параметрів чіткого регулятора. Можливе використання на нижньому рівні також нечіткого регулятора з перебудовувати параметрами.

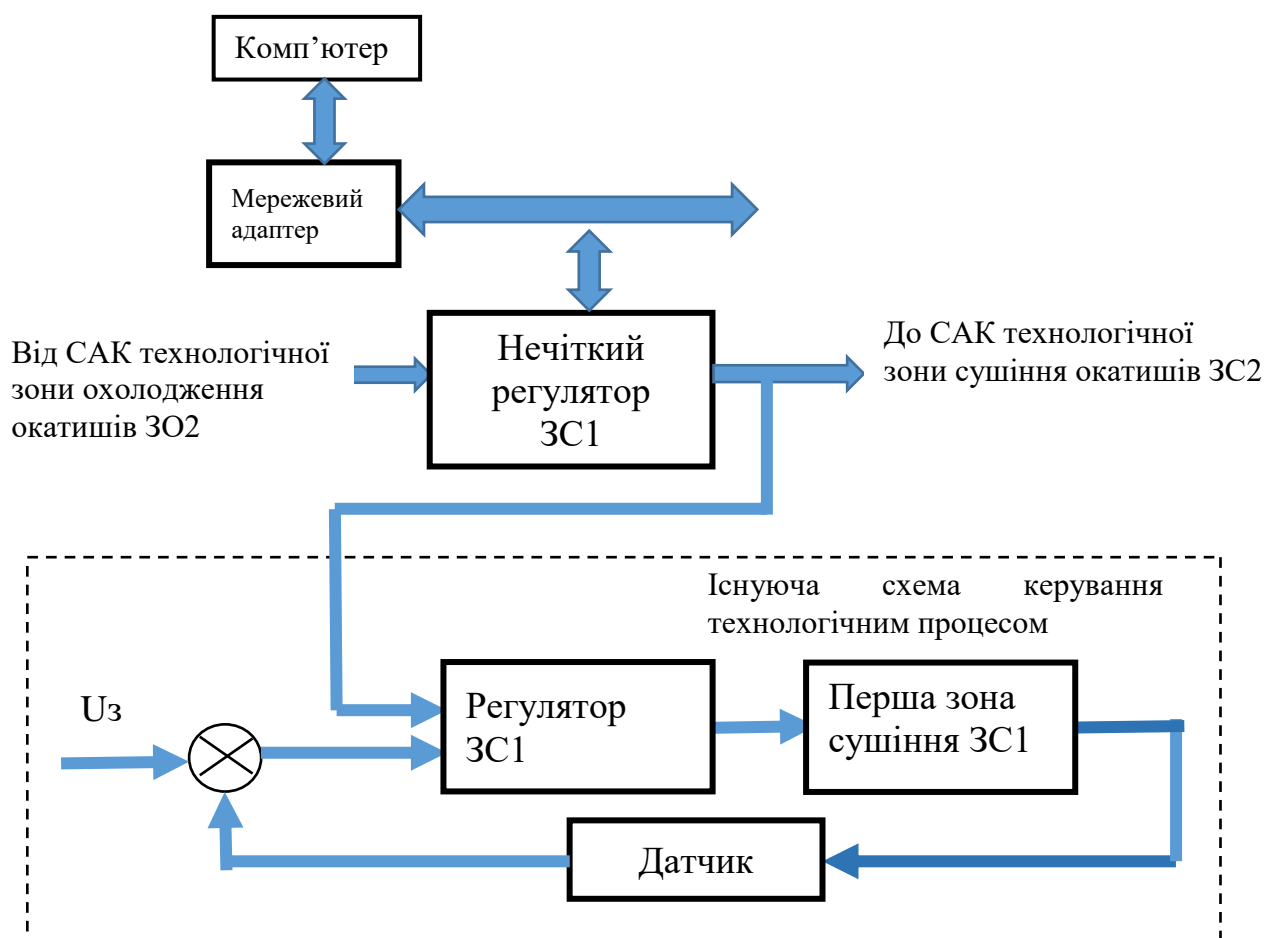


Рис. 3.2. Структурна схема керування процесом термічної обробки окатишів у технологічній зоні сушіння з параметричної адаптацією

Аналогічні структурні схеми керування процесом термічної обробки окатишів мають інші технологічні зони і вони можуть мати інші елементи, наприклад, контролер, мікроЕОМ, тощо. Наявність зворотних зв'язків для керування параметрами теплоносіїв по газоповітряним колекторам, забезпечуючи перерозподіл потоків між зонами за допомогою димотягів, виконуючи при цьому підвищення енергоефективності процесів сушіння, випалювання і охолодження тобто забезпечується економія природного палива і електричної енергії. При проведенні досліджень враховуються витрати електроенергії і природного газу при забезпеченні регламентних параметрів температур нагріву верхнього шару окатишів у кожній технологічній зоні машини. Результати моделювання представлені на рис. 3.3.



Рис. 3.3 Результати моделювання термічного процесу оброблення окатишів на конвеєрній машині з визначенням температури верхнього шару окатишів у кожній технологічній зоні

На основі моделювання проведено чисельні дослідження з метою визначення ефективного розподілу температур теплоносіїв газоповітряного потоку за технологічними зонами для забезпечення стабілізації теплового режиму процесу оброблення окатишів. У ЗСІ підтримується температура верхнього шару окатишів на рівні 380 °С, а далі у ЗСІІ вона досягає 550 °С, у ЗПН – 900 °С і у ЗВ досягає максимального значення у 1200 °С. Із ЗР температура верхнього шару окатишів починає зменшуватися на виході другої зони охолодження і досягає заданого регламентного значення в 150 °С. Результати моделювання отримані при ефективних значеннях вхідних і вихідних параметрів виробничого процесу. Як показали результати досліджень (рис. 3.3) температура верхнього шару окатишів у перших чотирьох зонах ЗСІ, ЗСІІ, ЗПН і ЗВ збільшується за експоненціальним законом і витримується на заданих регламентних значеннях і вони мають похибку не більше п'яти відсотків. Це забезпечується за рахунок того, що вносяться зміни в існуючу на виробництві схему керування технологічним процесом за допомогою ланки компенсації помилки від впливу, що задається регулятором, шляхом зміни значень неповних і нечітких технологічних параметрів попередніх зон машини.

Для отримання регламентних значень параметрів температури верхнього шару окатишів у кожній технологічній зоні в математичній моделі враховано зміну продуктивності випалювальної машини конвеєрного типу по сирим окатишам. Керування кожною технологічною зоною забезпечено підвищення ефективності теплового й газового режимів за рахунок прямо пропорційній зміні швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки. При цьому враховуються зміни за експоненціальним законом у залежності від температури газоповітряного потоку у функції висоти шару і прямо пропорційній зміні значень параметрів висоти шару, вологи окатишів на візках КС і їх основності від взаємопов'язаних технологічних зон.

Отже, на основі аналітичних методів розроблено комплексну математичну модель процесу керування процесом оброблення окатишів на конвеєрних машинах, яка на відміну від відомих, представлена у вигляді блочно-послідовної

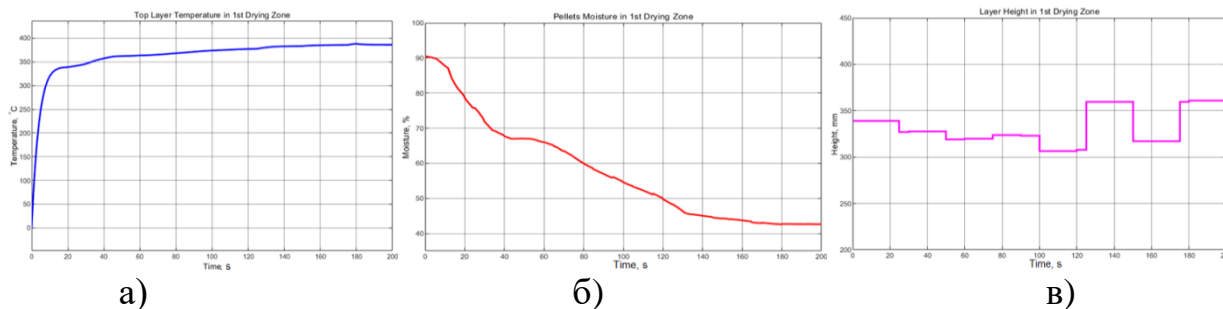
структури. Комплексна модель складається з окремих математичних моделей технологічних зон, представлених нечіткими логічними рівняннями, що враховують неповні та нечіткі параметри взаємопов'язаних технологічних зон і поєднані між собою так, що виходи одних моделей є входами для наступних і з'єднаних між собою зворотними зв'язками відповідно до прийнятої технології. Це дозволило забезпечити автоматизоване керування перерозподілом теплоносіїв газоповітряних потоків уздовж технологічних зон ВМКТ.

3.2. Дослідження впливу значень неповних і нечітких технологічних параметрів на якість перехідних процесів

З метою визначення впливу значень неповних і нечітких технологічних параметрів на якість перехідних процесів проведемо дослідження за допомогою моделювання, яке проведено з використанням програмних математичних пакетів Matlab/Simulink і нечіткої логіки Fuzzy Logic Toolbox. При цьому взято до уваги, що моделі кожної зони пов'язані між собою не тільки послідовно, відповідно до технологічної конструкції конвеєрної машини, але й з урахуванням зворотних зв'язків температур теплоносіїв, а саме: модель ЗСІ враховує температуру відпрацьованого теплоносія потоку, що надається із ЗОП, ЗСІІ та ЗПН – із ЗВ, та ЗР – із ЗСІ і ЗВ.

Аналіз впливу значень параметрів теплоносіїв на якість перехідних процесів у замкненій системі виконано для кожної технологічної зони машини. Отримано характеристики зміни температури верхнього шару, вологості, маси та висоти шару окатишів для зон сушіння окатишів, результати моделювання яких представлені відповідно на рис. 3.4. Результати дослідження показують, що у перехідному режимі характеристика температури верхнього шару окатишів для ЗСІ, що представлена на рис. 3.4, а, експоненціально збільшується і має відмінність від характеристики, знятої з моделі для цієї зони, представленої на рис. 2.9. Перехідний процес має більш плавний аперіодичний характер і закінчується за 140 с на значенні в 390 °С, на відміну від 380 °С за 145 с.

Зона сушіння ЗСІ

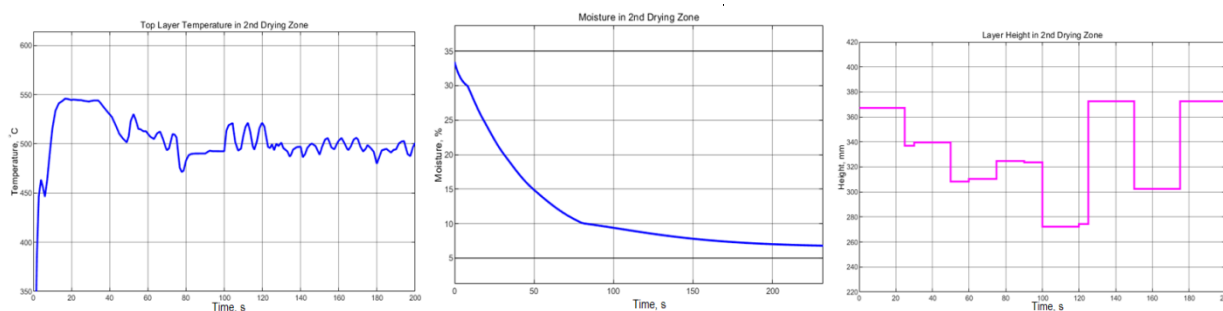


а)

б)

в)

Зона сушіння ЗСІІ



а)

б)

в)

Рис. 3.4. Перехідний процес керування сушінням окатишів:

а – температури верхнього шару; б – вологості; в – висоти шару окатишів

Перерегулювання відсутнє, що говорить про значний вплив зворотного зв'язку на температурний показник шару окатишів у ЗСІ. За такої умови, характеристика зміни вологості в першій зоні сушіння є незначною.

Показник вологості експоненціально зменшується з 90 до 42 % за 140–180 с. Тому характеристика (рис. 3.4, б) не відрізняється від характеристики знятої з моделі (рис. 2.9). Характеристика зміни висоти шару окатишів на візках КС має ступінчастий вид (рис. 3.4, в). Проте, функціональна залежність на цьому рисунку відрізняється на 5 % від характеристики отриманої на попередній моделі.

Результати дослідження показують, що температурна характеристика шару окатишів для другої зони сушіння, що надана на рис. 3.4, а, має аперіодичний характер. Вона зростає з 350 до 550 °С у п'ять разів швидше, ніж характеристика представлена на рис. 2.11, та приймає значення на 10 °С більше. При подачі впливів, що збурюються, ця характеристика просідає на 50 °С на інтервалі з 36 до 45 с, далі температура коливається ± 15 °С на інтервалі з 60 до 120 с та на ± 5 °С

наприкінці. Одночасно характеристика температури шару окатишів для ЗСП, що на рис. 2.11, а, є більш стійкою. Це говорить про значний вплив зворотного зв'язку за температурою теплоносія у цій зоні.

Результати дослідження показують, що характеристика вологості окатишів для другої зони охолодження, що надана на рис. 3.4, б, експоненціально зменшується плавно у часі на інтервалі від 33 до 7 % за 180 с, як і характеристика з рис. 2.11, що вказує про незначний вплив зворотного зв'язку за температурою теплоносія на характеристики вологості окатишів. У результаті дослідження процесу керування сушінням окатишів отримано характеристику (рис. 3.4, в) зміни висоти шару окатишів, яка має ступінчастий вигляд. Вона змінюється від 270 до 370 мм і в середньому приймає показник у 320 мм висоти шару окатишів, що помітно вище ніж показник з характеристики (рис. 2.11), де середнє значення встановлюється на 310 мм висоти шару окатишів.

Результати моделювання перехідних процесів керування попереднім нагріванням окатишів представлено на рис. 3.5.

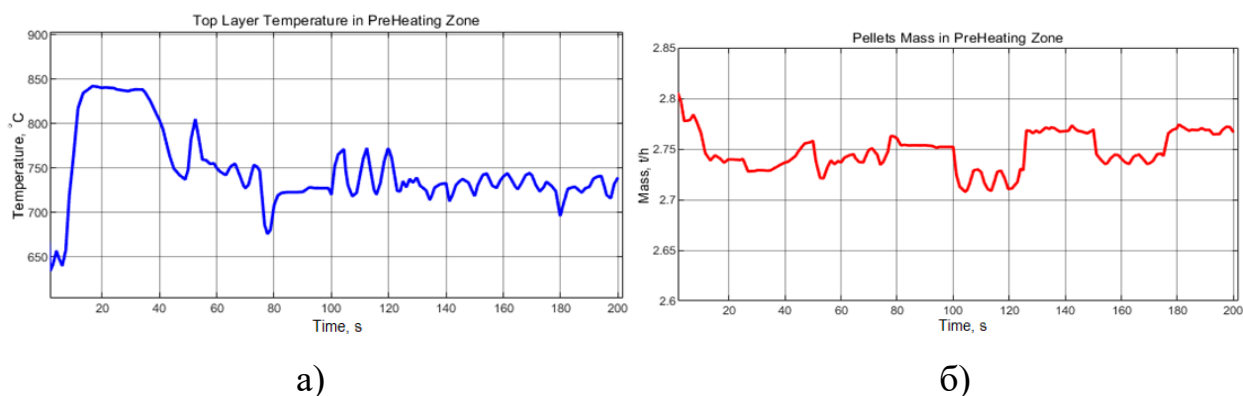


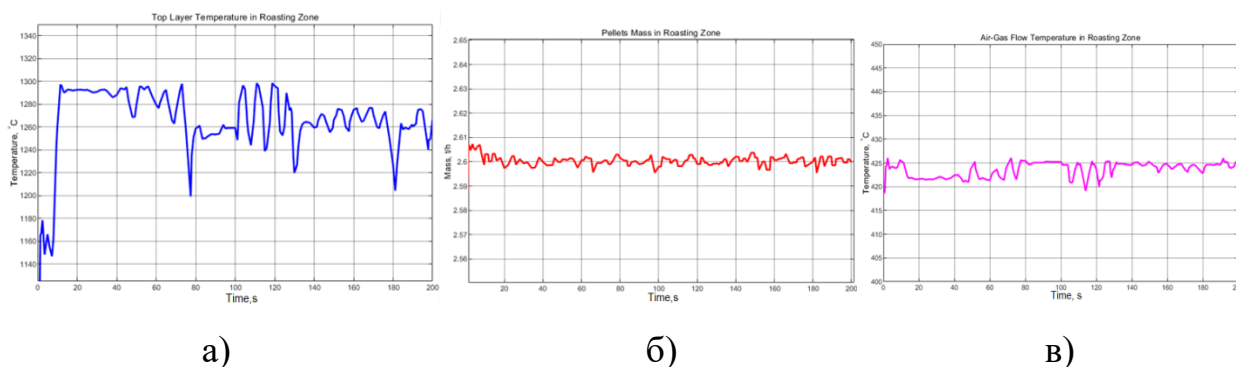
Рис. 3.5. Перехідний процес керування попереднім нагріванням окатишів:
а – температури верхнього шару окатишів; б – маси візків КС із окатишами

Результати дослідження показують, що моделювання перехідного процесу нагріванням окатишів у зоні попереднього нагрівання, характеристика температури верхнього шару окатишів, що представлена графіком на рис. 3.5, а, має аперіодичний характер. Вона зростає з 650 до 850 °С за 20 с, а характеристика на рис. 2.17, а – у п'ять разів довше і досягає до значення 1000 °С. Вона є більш

стійкою, оскільки при подачі впливів, що збурюються, ця характеристика просідає на $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ на інтервалі з 30 до 45 с, далі, температура коливається в межах $\pm 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ на інтервалі з 60 до 120 с. Наприкінці вона змінюється лише на $\pm 15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Це говорить про вплив температури газоповітряного потоку на температуру верхнього шару окатишів у цій зоні. Водночас характеристика зміни маси окатишів на візках конвеєрної стрічки (рис. 3.5, б) у ЗПН має ступінчастий вид. Вона приймає усталене значення в $2,75\text{ т/рік}$, на відміну від характеристики (рис. 2.17, б), де усталене значення маси встановлюється на показнику в $2,7\text{ т/рік}$. Це говорить про незначний вплив зворотного зв'язку температури газоповітряного потоку на зміну маси окатишів у зоні попереднього нагрівання.

Результати моделювання перехідних процесів керування обпаленням і рекуперацією окатишів представлено на рис. 3.6.

Зона випалювання



Зона рекуперації

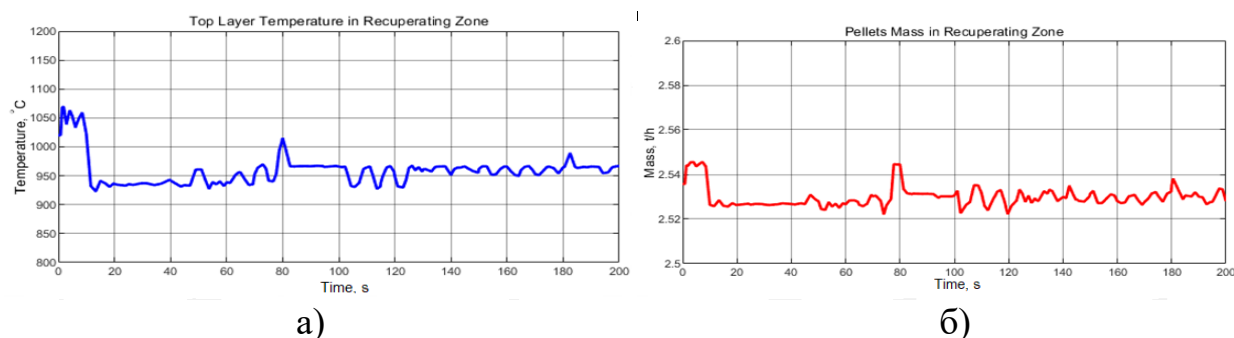


Рис. 3.6. Перехідний процес керування обпаленням і рекуперацією окатишів:

а – температури верхнього шару; б – маси візків конвеєрної стрічки із

окатишами; в – температури теплоносіїв ГПП

Дослідження перехідного процесу керування при моделюванні перехідного процесу в зоні випалювання показало, що температурна характеристика верхнього шару окатишів, графік якої представлений на рис. 3.6, а, при використанні зворотного зв'язку за температурою відпрацьованих теплоносіїв із першої зони охолодження зростає прямо пропорційно з 1100 до 1180 °С, потім коливається від 1160 до 1290 °С. Проте, графік температури верхнього шару, отриманий на моделі без зворотного зв'язку, що наданий на рис. 2.19, а, при усередненому температурному розкиді планомірно змінюється, а саме – зростає від 1100 до 1300 °С на початку процесу випалювання, потім підтримується необхідна за технологією температура та зрештою спадає в технологічній зоні до ± 1120 °С. При подачі впливів, що збурюють, характеристика (рис. 3.6, а) набуває перерегулювання та РНЛ подає керуючий вплив, що нормалізує чисельне значення температури, на відміну від графіка (рис. 2.19, а), де при максимальному та мінімальному температурному розкиді теплоносія ГПП бачимо пропорційне збільшення та зменшення температури верхнього шару, а також присутнє збільшення відхиляючих коливань.

Маса окатишів у зоні випалювання, що представлена графіком на рис. 3.6, б, як показали результати досліджень, періодично змінюється на 10 % щодо сталого значення в 2,6 т/рік окатишів та майже не відрізняється від графіка, представленого на рис. 2.19, б. Це вказує на те, що вплив температури відпрацьованих теплоносіїв із першої зони охолодження не впливає на зміну маси окатишів на виході цієї зони.

Результати досліджень перехідного процесу керування обпаленням окатишів у зоні випалювання показали, що характеристики температур теплоносіїв газоповітряного потоку, що представлені графіками на рис. 3.6, в, і рис. 2.19, в, майже не відрізняються, приймають аперіодичний вигляд з наявністю коливань близько встановленого значення в 425 °С чисельно рівних ± 5 °С, тобто вони практично не відрізняються.

Температурна характеристика верхнього шару окатишів при дослідженні перехідного процесу керування у зоні рекуперації, що представлена графіком на

рис. 3.6, а, спочатку має лінійний спадаючий характер, а потім підтримується на рівні 1050 °С і встановлюється на рівні 940 °С. При подачі впливів, що збурюються, виникають коливання на рівні ± 20 °С на інтервалі від 40 до 60 с, з'являється перерегулювання на 80 с і наприкінці існують коливання на ± 10 –15 °С. Водночас характеристика, що отримана на моделі без використання зворотного зв'язку (рис. 2.23, а), при усталеному значенні температури теплоносія ГПП спадає від 1082 до 920 °С у зоні рекуперації, а при максимальному та мінімальному розкиді змінюється з деяким пропорційним збільшенням та зменшенням (на ± 25 °С, відповідно) протягом усього процесу. Це вказує на те, що існує вплив температури газоповітряного потоку з взаємопов'язаної першої зони охолодження на температуру верхнього шару окатишів, забезпечуючи підтримання регламентного її значення.

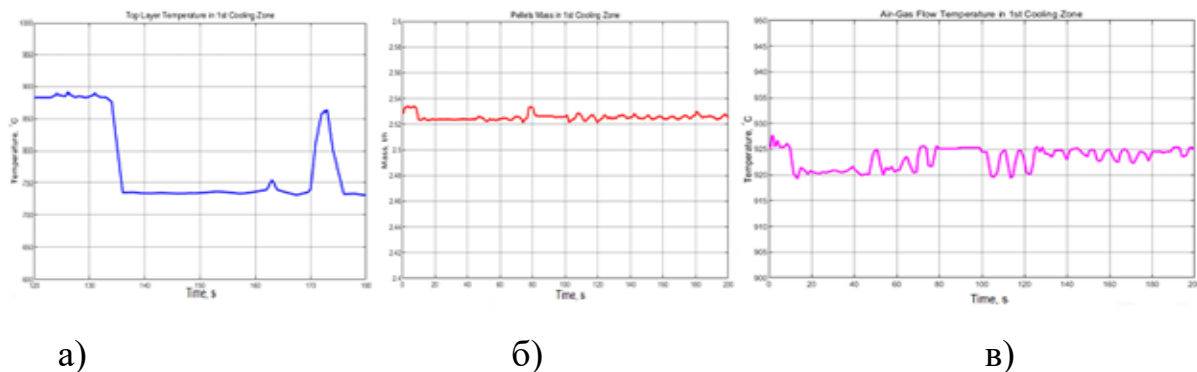
Зміна маси візків із окатишами при дослідженні перехідного процесу керування в зоні рекуперації (рис. 3.6, б) має незначні коливання і приймає усереднене значення в 2,54 т/рік, на відміну від графіка (рис. 2.23, б), де усталене значення встановлюється на відмітці в 2,52 т/рік. Тобто ці характеристики не відрізняються між собою і при перехідному режимі впливу температури газоповітряного потоку похибка складає не більше одного відсотка.

Моделювання перехідних процесів керування охолодженням окатишів у першій і другій зонах представлено графіками на рис. 3.7.

Результати досліджень перехідного процесу керування у першій зоні охолодження показали, що температура верхнього шару окатишів при дії зворотного зв'язку підтримується на рівні 880 °С, потім спадає до 740 °С і підтримується це значення температури (рис. 3.7, а). При подачі дії, що збурює, з'являється стрибок, амплітуда якого дорівнює 100 °С і за 6 с спадає до усталеного значення в 740 °С. Аналогічно, на графіку (рис. 2.29, а) відбувається схожий процес, однак, відсутні стрибкові відхилення. Підтримування температури верхнього шару окатишів у першій зоні охолодження на регламентному рівні забезпечується за рахунок використання перерозподілу температури газоповітряного потоку цієї зони між зонами випалювання і

рекуперації, та враховуються зміни вихідних технологічних параметрів зони рекуперації в перехідних процесах, що впливають на технологічні параметри першої зони охолодження. Одночасно, перехідний процес утримання регламентного значення маси окатишів із візками конвеєрної стрічки в першій зоні охолодження має характеристики, що представлені графіком на рис. 3.7, б. Значення цієї маси окатишів із візками конвеєрної стрічки у цій зоні періодично змінюється на величину не більше $\pm 10\%$ щодо сталого значення в 2,53 т/рік і утримується за рахунок зміни температури газоповітряного потоку, що використовується зонами випалювання і рекуперації.

Зона охолодження ЗОІ



Зона охолодження ЗОІІ

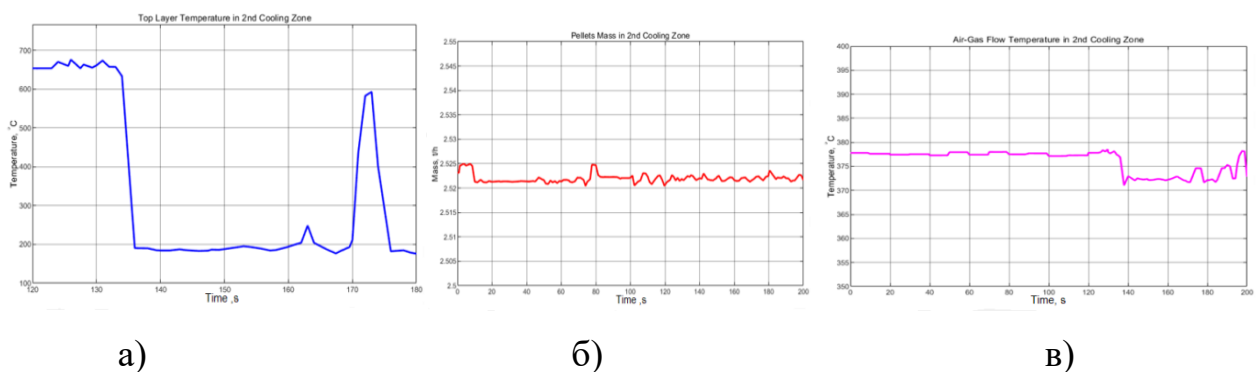


Рис. 3.7. Перехідний процес керування охолодженням окатишів:

а – температури верхнього шару; б – маси візків із окатишами;

в – температури теплоносія ГПП

Результати досліджень утримання значень параметрів регламентної температури газоповітряного потоку у перехідному процесі керування у першій

зоні охолодження показали, що ця температура приймає аперіодичний вигляд (рис. 3.7, в). У характеристиці наявні коливання близько сталого значення в $925\text{ }^{\circ}\text{C}$ чисельно рівних $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. що вказує на роботу зворотного зв'язку газоповітряного потоку по температурі у перехідному процесі охолодження окатишів на виході із зони. Проте, графік на рис. 2.29, в, має спадаючий вигляд з 930 до $925\text{ }^{\circ}\text{C}$ на інтервалі від 0 до 50 с та спадає з 925 до $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ на інтервалі 200 – 400 с.

Забезпечення регламентних параметрів температури верхнього шару окатишів у другій зоні охолодження виконується при наявності зворотного зв'язку по температурі газоповітряного потоку з взаємопов'язаною першою зоною сушіння. Процес охолодження підтримується на позначці 15 с значення в $660\text{ }^{\circ}\text{C}$, потім спадає до $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ та витримує це значення температури (рис. 3.7, а). При відсутності зворотного зв'язку (рис. 2.30, а) відбувається схожий процес, за умови відсутності стрибкових відхилень. Водночас характеристика зміни параметрів маси візків із окатишами має періодичні коливання на рівні $\pm 15\%$ щодо сталого значення в $2,53$ т/рік (рис. 3.7, б). Тоді, як характеристика на рис. 2.30, б майже не має коливань, але устанавлюється на рівні у $2,52$ т/рік. Проте, регламентна температура теплоносія ГПП приймає періодичний вигляд із наявністю коливань близько встановленого значення в $378\text{ }^{\circ}\text{C}$ чисельно рівних $\pm 5\%$ і на 140 с спадає на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.7), на відміну від графіка на рис. 2.30, в, який має спадаючий вигляд із 380 до $375\text{ }^{\circ}\text{C}$ на інтервалі 0 – 100 с та надалі спадає з 375 до $368\text{ }^{\circ}\text{C}$ на інтервалі з 325 с. Все це вказує на використання цієї температури у перехідному процесі охолодження окатишів.

Проведене моделювання з використанням програмних математичних пакетів Matlab/Simulink і нечіткої Fuzzy Logic Toolbox дозволило визначити вплив параметрів теплоносіїв на якість перехідних процесів температури верхнього шару, вологості, маси та висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки в замкненій системі для кожної зони конвеєрної машини. Виконано порівняльний аналіз характеристик зміни значень температури верхнього шару, вологості, маси та висоти шару окатишів при наявності й відсутності зворотних зв'язків. Отже,

отримав подальший розвиток підхід узгодженого керування багатозонним процесом термічного оброблення окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу, теоретичний розрахунок якого базується на основі використання логічних рівнянь нечіткої логіки в умовах неповної і нечіткої інформації про параметри взаємопов'язаних технологічних зон, причому кожна зона машини ефективними окремими контурами керування.

Дослідження впливу значень неповних і нечітких технологічних параметрів на якість перехідних процесів при сушінні окатишів показало, що температура верхнього шару залишається незмінною, вологість окатишів зменшується по експоненціальному закону, а висота верхнього шару окатишів на візках конвеєрної стрічки має ступінчастий вид коливання, які відрізняються до 10 %. На основі параметричної ідентифікації параметрів високотемпературних зон відбувається нелінійне керування температурою теплоносіїв газоповітряних потоків, що забезпечує регламентні режими роботи оброблення залізородних окатишів у кожній технологічній зоні машини.

3.3. Аналіз впливу значень параметрів теплоносіїв газоповітряних потоків на якість перехідних процесів у замкненій системі

Визначимо, як змінюються в перехідному режимі такі значення параметрів: нагрів верхнього шару окатишів, зміни вологості, висоти і маси шару візків із окатишами для високотемпературних зон попереднього нагрівання і випалювання. Для цього складено структурну схему моделі для дослідження перехідного процесу в цих зонах, яка враховує параметри попередньої зони сушіння. Досліджувані моделі зон враховують співвідношення подачі природного газу і атмосферного повітря. Перші дві взаємопов'язані зони попереднього нагрівання і сушіння мають зворотній зв'язок за допомогою відпрацьованих теплоносіїв зони випалювання. На рис. 3.8 представлено чотири блоки: DZ2 імітує роботу ЗСІІ, PHZ – ЗПН, RoZ – ЗВ. До Display Block надходять сигнали вихідних характеристик із трьох перерахованих блоків, вихідні сигнали яких виводяться на

осцилограф. У блоці DZ2 є чотири вхідних сигнали: температура верхнього шару окатишів T , волога окатишів Ψ , висота шару окатишів H на візках та сигнал температури теплоносіїв T_{agf} , який надходить від зони випалювання в ролі зворотного зв'язку.

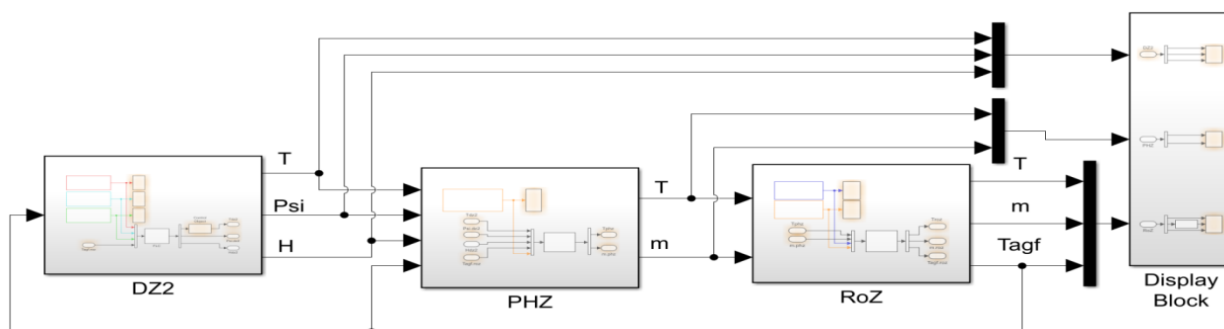


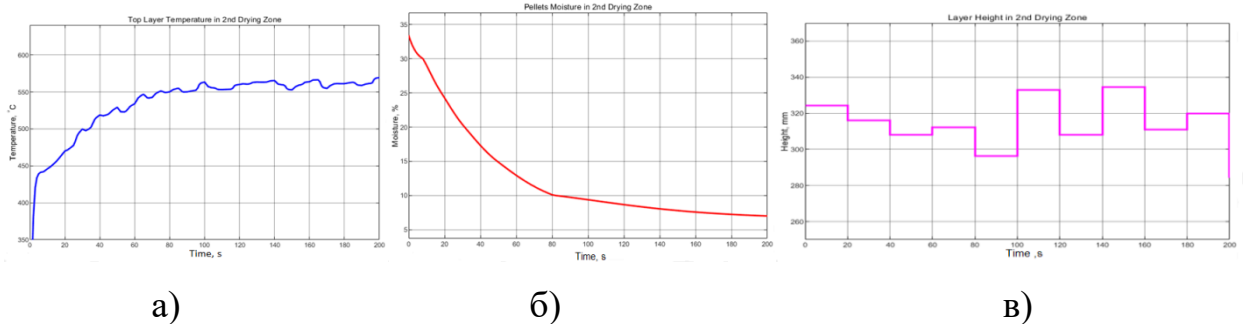
Рис. 3.8. Структурна схема моделі для дослідження перехідного процесу у високотемпературних технологічних зонах

Три перших сигнали моделюються подібно до функціональних залежностей сигналів, що надходять від зон сушіння, використовуючи вихідні сигнали цих зон відповідно до імітаційної моделі. Блок PHZ – приймає чотири вхідних сигнали від інших блоків – DZ2 та RoZ. На його вході моделюється показник подачі газу, а на виході формуються сигнали відповідно до імітаційної моделі. Блок RoZ приймає два вхідних сигнали з блоку PHZ та моделює показники співвідношення подачі газу і атмосферного повітря й температуру відпрацьованого теплоносія із першої зони охолодження. Вихідні сигнали блоків реєструються осцилографами. Функціональні залежності, отримані під час моделювання зібраної системи, представлені на рис. 3.9.

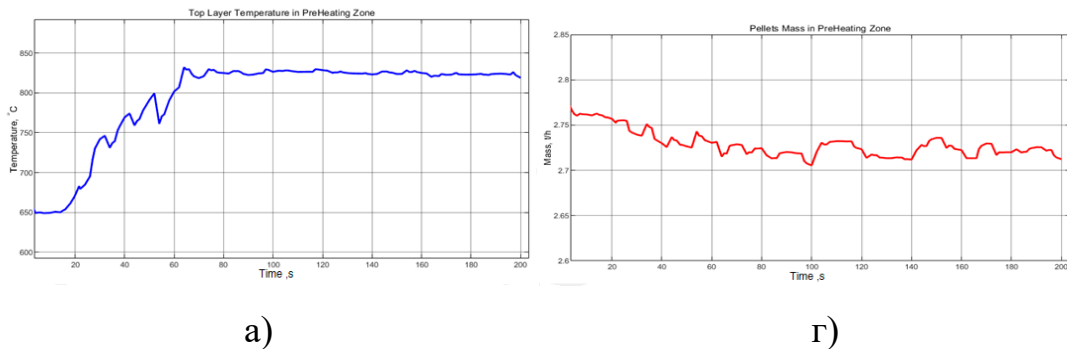
Характеристика регламентної температури верхнього шару окатишів для другої зони сушіння (рис. 3.9, а) спочатку лінійно збільшується до п'яти секунд, а потім експоненціально збільшується у часі до усталеного значення. На відміну від характеристики, що представлена на рис. 2.9, а, ця характеристика має такий же аперіодичний характер з наявністю коливань і більшим часом перехідного процесу. При використанні зворотного зв'язку перехідний процес закінчується за 90 с, а без зворотного зв'язку за 200 с. При подачі впливів, що збурюють,

характеристика регламентної температури верхнього шару окатишів незначно просідає. Результати досліджень перехідного процесу сушіння окатишів показали, що характеристика вологості окатишів у зоні сушіння, що наведена на рис. 3.9, б, експоненціально зменшується плавно у часі. Вона змінюється з часом на інтервалі від 33 до 7 % за 180 с, що показує вплив тиску атмосферного потоку на першу зону охолодження.

Друга зона сушіння



Зона попереднього нагрівання



Зона випалювання

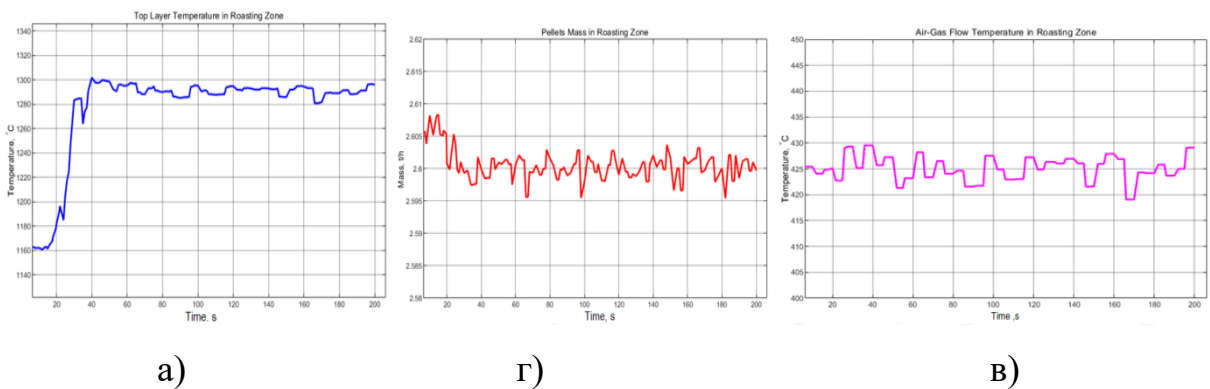


Рис. 3.9. Перехідні процеси керування високотемпературними зонами конвеєрної машини: а – температури верхнього шару окатишів; б – вологості; в, г – висоти шару і маси візка із окатишами; д – температури теплоносіїв ГПШ

Характеристики зміни значень параметрів регламентної висоти шару окатишів для зони сушіння, що представлені графіками на рис. 3.9, в, і рис. 2.9, в, мають однаковий ступінчастий вигляд, але їх значення змінюються по-різному. На графіку, представленому на рис. 3.9, в, параметри регламентної висоти шару окатишів змінюються від 295 до 330 мм (в середньому 312 мм) і практично залежить від значень параметрів першої зони сушіння окатишів. Тоді, як на графіку, представленому на рис. 2.9, в, параметри регламентної висоти шару окатишів змінюються від 317 до 324 мм (в середньому 321 мм). Аналіз отриманих результатів показав, що перехідні процеси керування зоною сушіння знижують значення параметрів регламентної висоти шару окатишів.

Результати досліджень перехідного процесу керування попереднім нагріванням окатишів показали, що регламентна температура верхнього шару окатишів у зоні має аперіодичний характер, зростає з 650 до 825 °С за 65 с (рис. 3.9, а). На інтервалі зростання від 20 до 60 с є коливання, викликані збуреннями значень параметрів температури теплоносія газоповітряного потоку. Як показав аналіз отриманих графіків, замкнута система керування дозволяє зменшити час перехідного процесу в 2,3 рази порівняно з розімкненою системою, графік якої представлено на рис. 2.17, а. Результати досліджень перехідного процесу керування попереднім нагріванням окатишів показали, що характеристика зміни значень параметрів маси окатишів у цій зоні (рис. 3.9, г) має коливання і приймає усталене значення на рівні 2,72 т/рік і відрізняється меншим значенням у порівнянні з графіком, представленим на рис. 2.17, б, який має усталене значення на рівні 2,74 т/рік. Це вказує на вплив значень параметрів взаємопов'язаних другої зони сушіння і випалювання.

Температури верхнього шару окатишів у зоні випалювання зростає з 1160 до 1280 °С у перехідному процесі керування обпалення окатишів, а час перехідного процесу, як видно з графіка представленого на рис. 3.9, а, закінчується за 40 с і в сталому режимі з'являються коливання, амплітудою ± 5 °С, що вказує на вплив значень параметрів температури газоповітряного потоку взаємопов'язаної першої зони охолодження. Водночас РНЛ підтримує стале

значення, на відміну від графіка, наданого для цієї зони на рис. 3.6, а, і тому не відбувається значних відхиляючих стрибків.

Значення даних маси візків із окатишами (характеристика на рис. 3.9, г) у зоні випалювання періодично змінюється на величину $\pm 10\%$ щодо сталого значення в 2,6 т/рік, а температурна характеристика теплоносія ГПП у цій зоні приймає аперіодичний вигляд з наявністю коливань близько сталого значення в $425\text{ }^{\circ}\text{C}$, чисельно рівних $\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.9, а), та не відрізняється від результату, отриманого на попередній моделі, графік якої надано на рис. 3.6, в. Все це вказує на те, що у перехідних процесах при керуванні високотемпературною зоною випалювання конвеєрної машини використовуються значення параметрів температури газоповітряного потоку в якості зворотного зв'язку, що дозволило встановити енергоефективність процесів сушіння, попереднього нагрівання, обпалювання і охолодження. При цьому, на графіках для відповідних зон з'явилися стрибкові відхилення в 10–15 % від номінального значення й виникали перерегулювання на створюване збурення від параметрів теплоносіїв ГПП. Проте, значного впливу на показники вологи, висоти шару та маси візків із окатишами знайдено не було.

У моделі, створеної з трьох моделей ЗСП, ЗПН та ЗВ, характер впливу є схожим, однак, температурні функціональні залежності здебільшого відреагували на подачу із зони випалювання збурення температурою теплоносія у ролі зворотного зв'язку – з'явилися невеликі відхилення до 5 % від номінального значення температури верхнього шару окатишів. Отже, як показали результати аналізу впливу параметрів теплоносіїв газоповітряних потоків на якість перехідних процесів у замкненій системі при сушінні окатишів температура верхнього шару окатишів на візках конвеєрної стрічки спочатку зростає по експоненціальному закону і стабілізується на регламентному значенні, вологість окатишів зменшується по експоненціальному закону до потрібного регламентного значення і висота шару окатишів із окатишами на візках конвеєрної стрічки мають коливальний характер. При такому способі керування взаємопов'язаними технологічними зонами синтезована замкнута система

керування дозволяє зменшити час перехідного процесу до 15 % порівняно з існуючими системами, реалізованими, наприклад, на базі ПД-регуляторів.

При попередньому нагріванні окатишів вплив параметрів теплоносіїв ГПП на якість перехідних процесів у замкненій системі на температуру верхнього шару окатишів, спочатку зростає по експоненціальному закону і стабілізується на регламентному значенні, а висота шару окатишів із окатишами на візках конвеєрної стрічки зменшується до регламентного значення. Одночасно, при випалюванні окатишів температура верхнього шару окатишів спочатку зростає по експоненціальному закону і стабілізується на регламентному значенні, а висота шару і маса окатишів на візках із окатишами відповідає регламентним значенням.

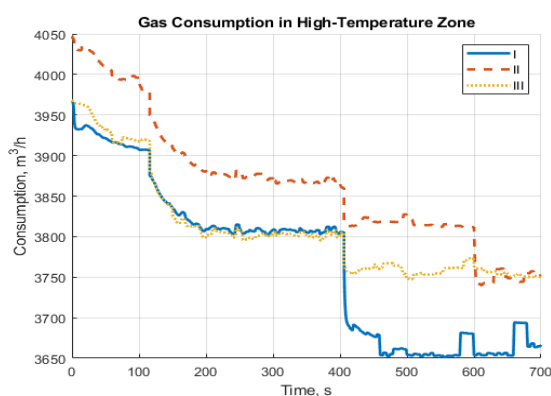
3.4. Дослідження енергетичних показників при керуванні процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині

Для оцінки енергоефективності процесів сушіння, попереднього нагрівання, обпалювання і охолодження проведено дослідження впливу температури теплоносіїв і витрат енергоносіїв на енергетичні показники при керуванні процесом термічного оброблення окатишів на ВМКТ. Для цього складено модель для високотемпературних зон конвеєрної машини. У моделі враховано такі параметри: продуктивність димотягів, яка залежить від витрат електроенергії, кількість тепла, яка залежить від витрат палива, а саме – природного газу. Для проведення досліджень із визначення витрат енергетичних показників у математичному пакеті Matlab/Simulink розроблені правила нечіткої логіки. Для дослідження впливу енергоносіїв високотемпературних технологічних зон конвеєрної машини на інші зони використаємо розроблену модель, представлену на рис. 3.8.

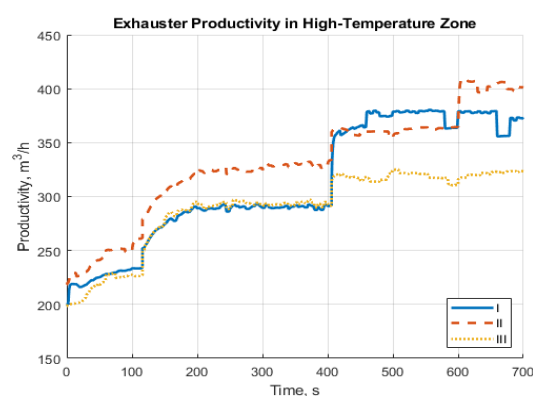
Проведені дослідження і отримано графіки перехідних процесів для визначення витрат кількості природного газу й електроенергії при роботі димотягів. Результати моделювання при витратах кількості природного газу представлені графіками на рис. 3.10 а, б, які порівняні з експериментальними

даними, графіки перехідних процесів яких наведено на рис. 3.10 в, г.

Результат моделювання

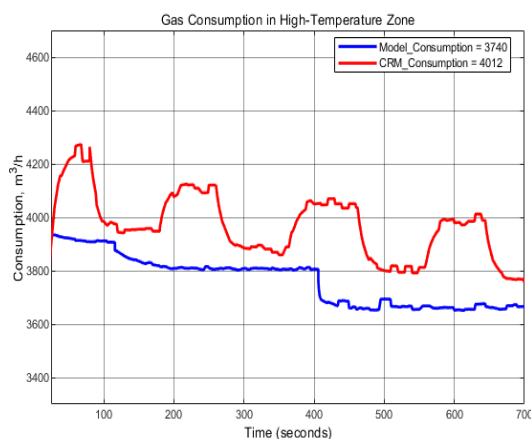


а)

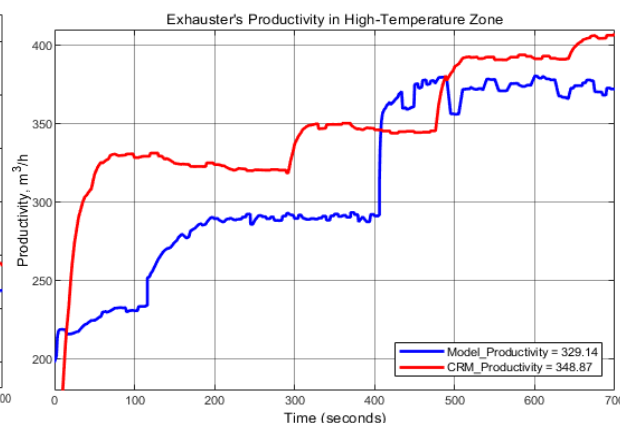


б)

Результат експерименту



в)



г)

Рис. 3.10. Перехідні процеси: а, в – за витратами природного газу у високотемпературних зонах; б, г – продуктивністю роботи димотягу

На графіках рис. 3.10, а, характеристику I отримано при регламентованому температурному режимі (заданих витратах природного газу), характеристики II і III – відповідно при збільшеній та зменшеній температурах теплоносіїв ГПП. Як показали результати досліджень, при подачі використаних теплоносіїв газоповітряних потоків зі збільшеною температурою із ЗОП у ЗСІ витрачається менше палива, водночас необхідна кількість тепла у високотемпературних технологічних зонах, що отримується за рахунок газу, є достатньою. При зменшенні температури теплоносія ГПП потрібно більше витрат газу для

підтримання необхідного теплового режиму у високотемпературних зонах і забезпечення відпрацьованим теплоносієм інших технологічних зон. Зміна температури теплоносія показує, що його збільшення пропорційно потребує збільшення продуктивності роботи димотягу та навпаки – зменшення приводить до зменшення продуктивності димотягу (рис. 3.10, б). Це обумовлено збільшеним та зменшеним відповідно розрідженням температури у високотемпературних зонах при термічній обробці окатишів.

При зменшенні температури теплоносіїв збільшується витрата газу для підтримки необхідної кількості тепла у високотемпературних зонах, а також збільшується продуктивність димотягу для розрідження температури.

Проведено порівняльний аналіз функцій витрати газу та продуктивності димотягу у високотемпературних зонах, отриманих у результаті досліджень перехідних процесів і використанням експериментальних даних на обладнанні ВМКТ типу LURG-278A на ФОГ ПрАТ «Північного ГЗК» (додатки В). Результати перехідних процесів отримані на моделях і експериментальних даних, представлені на рис. 3.10, в, г.

Як показали результати досліджень, що представлена на графіку рис. 3.10, а, характеристика витрати природного газу змінюється ступінчасто, відповідно до високотемпературних зон, і знижується на інтервалі від 4000 до 3600 м³/год. На легенді (рис. 3.10, в) наведено середній показник витрати природного газу для моделі (Model_Consumption) та експериментальних даних (CRM_Consumption). У позначках рис. 3.10, б, наведено середній показник продуктивності димотягу у високотемпературних зонах.

Отже, результати досліджень показали, що характеристика продуктивності димотягу змінюється ступінчасто на інтервалі від 200 до 375 м³/год, відповідно до високотемпературних зон машини. Ця характеристика змінюється залежно від температурних режимів у кожній зоні. Чим більша температура верхнього шару окатишів у технологічній зоні, тим більше потрібно відвести тепла із цієї зони для підтримання регламентного температурного режиму. У порівнянні з характеристикою, отриманою за експериментальними даними з конвеєрної

машини типу LURGI-278A на дільниці випалювання ФОГ ПрАТ «Північний ГЗК», вдалося знизити електроспоживання на 5,73 %, а витрати природного газу до 1,1 м³/т при підтриманні регламентного температурного режиму, що підтверджено актом (додаток К).

При визначені енергетичних показників при керуванні процесом термічного оброблення окатишів на ВМКТ у перехідних процесах результати моделювання порівняно з експериментальними даними на діючому обладнанні показало, що витрати природного газу у високотемпературних зонах і продуктивність роботи димотягу плавно зростає при умові збільшення значень регламентних параметрів температури верхнього шару окатишів для забезпечення процесів сушіння, попереднього нагрівання, обпалювання і охолодження.

3.5. Узагальнений аналіз адекватності моделей термічного оброблення окатишів на ВМКТ при нечіткому керуванні

Для оцінки адекватності раніше розроблених моделей для кожної взаємопов'язаної зони й конвеєрної машини загалом проведено обробку експериментальних циклів даних, отриманих при керуванні процесом з локальними регуляторами у робочих умовах ВМКТ типу LURGI-278A на дільниці випалювання ФОГ ПрАТ «Північний ГЗК», які надані у додатку Б. В процесі керування термічним обробленням окатишів проводиться ідентифікація характеристик об'єкту керування і на основі цієї інформації нечіткий регулятор видає значення змінних на вході локальних регуляторів (наприклад, ПД-регуляторів) і за допомогою нечіткого регулятора здійснюється налаштування параметрів чіткого регулятора.

Проведено порівняльний аналіз функцій температури верхнього шару окатишів для зон машин, зміни висоти шару окатишів на конвеєрних візках конвеєрної стрічки для зон сушіння, а також функцій температури теплоносіїв ГПП для ЗВ, ЗОІ та ЗОІІ. Функціональні залежності, отримані з моделей і

експериментальних даних, відповідно представлені графіками на рис. 3.11 і рис. 3.12.

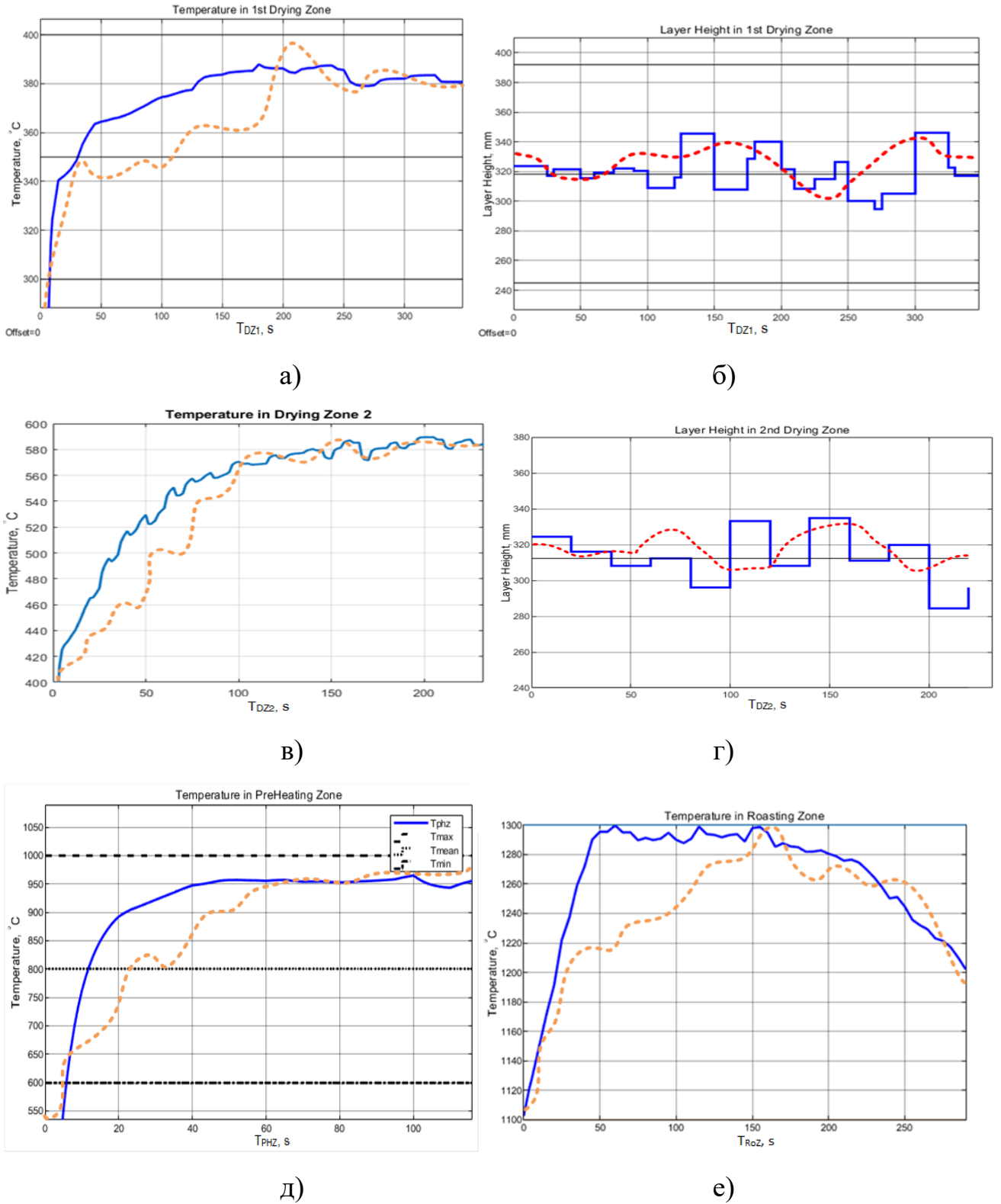


Рис. 3.11. Порівняння характеристик моделей з нечіткою логікою та експериментальними даними для: а, б – ЗСІ; в, г – ЗСІІ; д – ЗПН; е – ЗВ; а, в, д і е – графіки температури; б і г – висоти шару окатишів

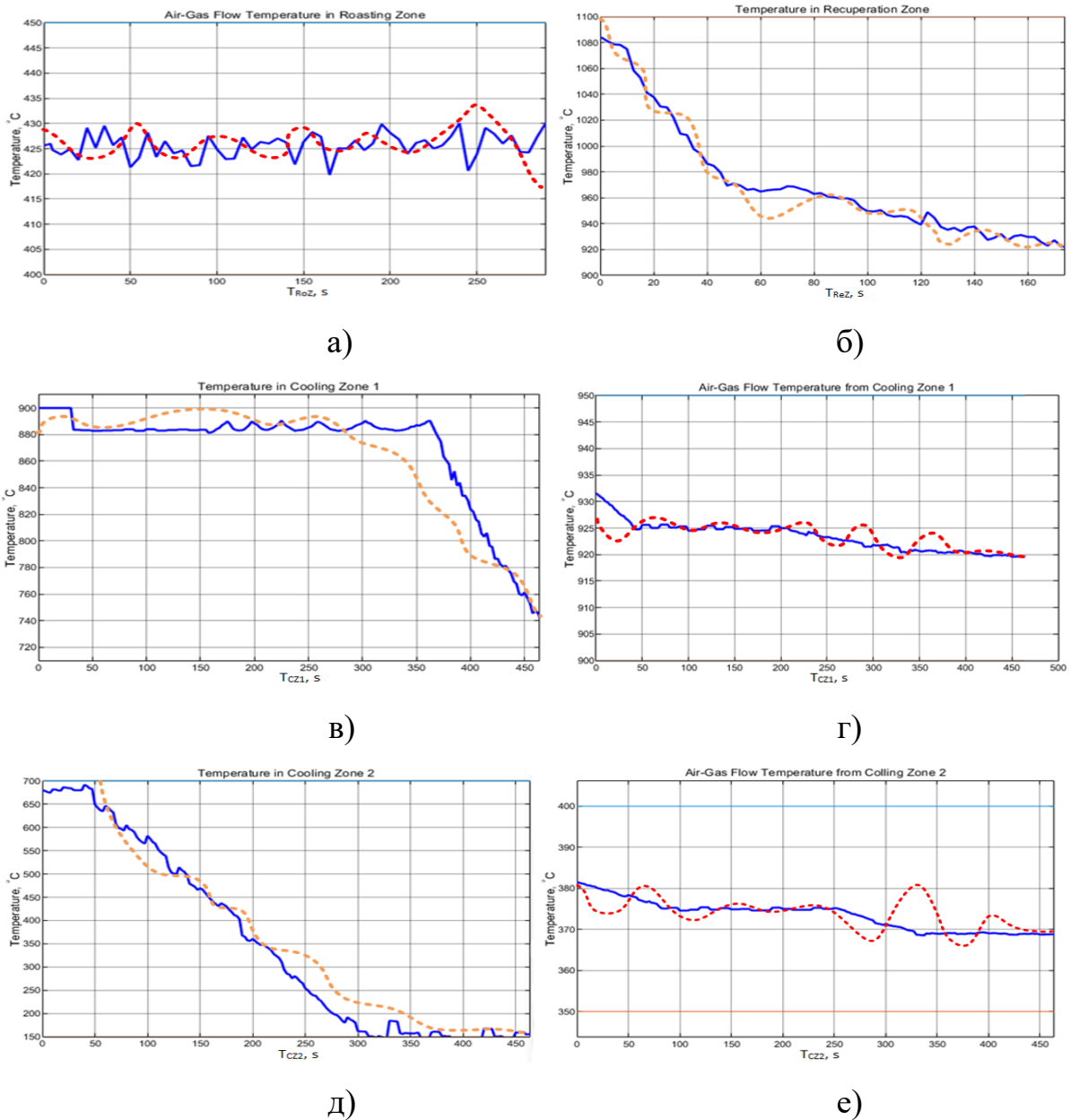


Рис. 3.12. Порівняння характеристик моделей з нечіткою логікою й експериментальними даними для: а – маса шару окатишів у ЗВ; б – температура охолодження верхнього шару окатишів у ЗР; в і д – температури охолодження шару окатишів відповідно у ЗОІ і ЗОІІ; г і е – температури теплоносія ГПП

Порівняння характеристик моделей з нечіткою логікою та експериментальними даними для ЗСІ, ЗСІІ, ЗПН і ЗВ, графіки яких відповідно надано на рис. 3.11, а–е, показало, що характеристики нагріву верхнього шару окатишів змінюються за експоненціальним законом у часі. Експериментальні характеристики у порівнянні з характеристиками отриманих на моделях з нечіткою

логікою мають більш коливання температур, але перехідний процес закінчується одночасно, тобто вони є адекватними. Характеристики моделей з нечіткою логікою для висоти шару окатишів у ЗСІ і ЗСІІ мають графіки ступінчатого характеру, тоді як експериментальні характеристики мають синусоїдальний, але їх середні значення співпадають, що вказує на їх адекватність.

Як показали результати досліджень, обидві характеристики (рис. 3.12, б, в, д, г, е) зміни температури для процесів охолодження окатишів у ЗР, ЗОІ і ЗОІІ мають схожий характер спадання, деяку несуттєву коливальність та встановлюються на відповідних регламентованих температурних значеннях. Аналізуючи характеристики, що представлені на цих графіках зроблено висновок, що обидві характеристики мають схожий характер коливання температур охолодження окатишів у ЗР, ЗОІ і ЗОІІ і зміни теплоносія ГПП, що й відбувається на виробництві та відрізняються не більше, як на 5 %, отже, модельовані значення параметрів вказаних температур є адекватними.

Оскільки основним досліджуваним елементом є значення впливу температури теплоносія ГПП, то для кожного значення температури вираховане середнє значення функції відгуку, незміщена оцінка дисперсії функції відгуку й оцінка дисперсії відтворюваності, величини яких коливалися від 0,001 до 9–10. Дисперсія відтворюваності середнього значення відгуку склала 0,0377.

Для розрахунку оцінок коефіцієнтів моделі застосовано метод найменших квадратів, а в умовах різної кількості дослідів у точках плану застосовані критерії Фішера та Бартлетта. Експертами показники розділені на «Нормальний режим», «Передаварійний режим» і «Аварія». З кожного класу виділені випадковим чином показники, на основі яких і проведено статистичний аналіз адекватності моделі. Ці показники надано у табл. 3.1, у якій позначено: 1, 5 – дані з експериментальних значень температури верхнього шару і відповідно висоти шару окатишів, 2, 6 – дані, отримані для конкретної зони з моделі нечіткої логіки відповідно про температуру верхнього шару та висоту шару окатишів, 3, 4, 7, 8 – відповідно проміжні розрахункові дані за критерієм Фішера, MSR та MSE.

Таблиця 3.1

Дані з моделі, експерименту і проміжних розрахунків

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
1	354,1	355,3	1231,0	1,6	328,5	338,8	47,7	14,1
2	358,6	359,9	1569,9	1,6	315,8	326,8	47,7	14,1
3	362,3	363,5	1870,3	1,4	330,5	318,8	47,7	14,1
...
84	379,1	380,7	3659,6	2,6	325,3	310,22	298,1	260,64

Лістинг скрипт-програми тестування за Фішером представлено в додатку Г.

Використовуючи ці дані виконано перевірку адекватності моделей термічного оброблення окатишів на ВМКТ. Обчислені спектри коливань технологічних показників моделей для кожної технологічної зони ВМКТ. Відфільтровані значення й моделі піддані кореляційному та спектральному аналізу й виконано перевірку однорідності за критерієм Фішера, для чого створено *script*-файл у пакеті математичного моделювання NNT [95]. Результати досліджень для першої зони сушіння показали однорідність оцінок дисперсії відтворюваності, де розрахункове значення критерію Фішера (3.2) $F_{розр}=197,9 \cdot 10^3$ значно більше ніж табличне $F_{табл}=6,95$ для температури верхнього шару окатишів, а також $F_{розр}=54,54$ значно більше ніж $F_{табл}=3,97$ для висоти шару окатишів, що свідчить про надійність обчислення кореляційної матриці.

$$F_{розр} = \frac{MSR}{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i,розр} - Y_{серед.розр.}) \cdot (n-2)}{\sum_{i=1}^n (Y_i - Y_{серед.розр.})} \quad (3.2)$$

де Y – вектор еталонного значення моделі температури верхнього шару окатишів у ЗСІ, отриманого за експериментальними даними;

$Y_{\text{розн}}$ – вектор розрахункових значень, отриманий зі знятої моделі нечіткої логіки для ЗСІ.

За результатами аналізу на адекватність моделі для ЗСІ визначені розрахункові показники температури, які склали для верхнього шару окатишів $F_{\text{розн.т}}=353,16$ та висоти шару окатишів $F_{\text{розн.в}}=5,61$. Розрахункові значення виявилися більшими за табличні показники $F_{\text{табл.т}}=3,91$ та $F_{\text{табл.в}}=4,96$ відповідно. Характеристики відрізняються між собою до 1 %, що говорить про адекватність складеної моделі даним для цієї зони.

Розрахунок для ЗПН за критерієм Фішера показав, що розрахункове значення критерію Фішера $F_{\text{розн.т}}=22,31$ і є більшим ніж табличне $F_{\text{табл.т}}=3,93$, що вказує на адекватність отриманої моделі. Аналіз перевірки на адекватність моделі ЗВ за температурою верхнього шару окатишів та температурою теплоносіїв ГПП виявив, що за розрахунками значення критерію Фішера більші ніж за табличними значеннями, вказаних вище характеристик $F_{\text{розн.т}}=14716,68 > F_{\text{табл.т}}=3,99$ та $F_{\text{розн.зн}}=211,64 > F_{\text{табл.зн}}=3,99$ відповідно.

Аналогічно для зони попереднього нагрівання $F_{\text{розн.т}}=986,83$ є більшим ніж табличне $F_{\text{табл.т}}=3,97$, а для першої зони охолодження $F_{\text{розн.т}}=7891,06 > F_{\text{табл.т}}=3,89$ та $F_{\text{розн.зн}}=139,69 > F_{\text{табл.зн}}=3,89$ відповідно.

Усі ці значення вказують на адекватність отриманої моделі. Аналіз адекватності моделі другої зони охолодження за температурою верхнього шару окатишів та температурою теплоносіїв виявив, що за розрахунками значення критерію Фішера значно більші ніж за табличними значеннями, вказаних вище характеристик $F_{\text{розн.т}}=2123,81 > F_{\text{табл.т}}=3,91$ та $F_{\text{розн.в}}=97,87 > F_{\text{табл.в}}=3,91$ відповідно.

Порівняльний аналіз нагріву і охолодження верхнього шару окатишів для взаємопов'язаних технологічних зон показав, що графіки співпадають із значеннями даних моделей з нечіткою логікою та експериментом у більшій частині діапазону значень температур та в деякому діапазоні значень температур графіки відрізняються між собою не більше, як на 5 %, але витримуються регламентні значення температур, перехідний процес закінчується одночасно, що вказує на їх адекватність.

Висновки до розділу 3

У результаті досліджень процесу керування термічним процесом оброблення окатишів і стабілізації температури у взаємопов'язаних технологічних зонах встановлено:

– перехідний процес зміни значень параметрів температури верхнього шару окатишів для першої зони сушіння має в замкненій системі більш плавний аперіодичний характер, перерегулювання відсутнє, що говорить про значний вплив температури газоповітряного потоку другої зони охолодження;

– характеристика зміни значень параметрів висоти шару і вологості окатишів у першій зоні сушіння при використанні температури газоповітряного потоку взаємопов'язаної другої зони охолодження не відрізняються від характеристик, знятих з моделі без цієї температури, а характеристика зміни висоти шару окатишів на візках конвеєрної стрічки має ступінчастий вид і відрізняється на 5 % від характеристики, отриманої без цієї ж температури;

– температурна характеристика, яка має зміни значень параметрів верхнього шару окатишів на візках конвеєрної стрічки для другої зони сушіння, характеризується аперіодичним характером і зростає у п'ять разів швидше, ніж характеристика, отримана без впливу температури газоповітряного потоку взаємопов'язаної зони випалювання, та приймає значення більше на 10 °С.

– характеристика температури верхнього шару окатишів у зоні попереднього нагрівання має аперіодичний характер, а характеристика, що отримана без впливу температури газоповітряного потоку взаємопов'язаної зони випалювання, у п'ять разів довше досягає заданої регламентної температури верхнього шару окатишів у цій зоні;

– графік маси окатишів із візками конвеєрної стрічки в зоні попереднього нагрівання має характеристику ступінчастого виду і не залежить від впливу температури газоповітряного потоку від взаємопов'язаної зони випалювання;

– зміна значень параметрів температури верхнього шару окатишів у зоні випалювання при використанні зворотного зв'язку за температурою

відпрацьованих теплоносіїв із першої зони охолодження у сталому режимі має коливання амплітудою ± 50 °С;

– характеристика значень параметрів маси окатишів із візками конвеєрної стрічки у зоні випалювання періодично змінюється на 10 % щодо сталого їх значення і не відрізняється від графіка, отриманого на моделі без наявності зворотного зв'язку за температурою відпрацьованих теплоносіїв із першої зони охолодження;

– характеристика температури верхнього шару окатишів у зоні рекуперації має спадаючий характер і при впливі температури газоповітряного потоку від взаємопов'язаної першої зони охолодження виникає перерегулювання, а зміна значень параметрів маси окатишів із візками конвеєрної стрічки мають однакові усталені значення;

– у значенні параметрів температури верхнього шару окатишів у зоні першої зони охолодження при дії взаємопов'язаних зон випалювання і рекуперації з'являється стрибок, який спадає до усталеного значення, а значення параметрів маси окатишів із візками конвеєрної стрічки не змінюються і мають однакові середні сталі значення;

– температура верхнього шару окатишів у другій зоні охолодження при дії взаємопов'язаної першої зони сушіння процес охолодження окатишів змінюються плавно і витримується задане регламентне значення вихідної температури нагрівання верхнього шару окатишів;

– значення параметрів температури теплоносіїв газоповітряних потоків, які відходять із зони випалювання, першої і другої зон охолодження, впливають за експоненціальним законом на зміну температур верхніх шарів окатишів у зонах сушіння, попереднього нагрівання і рекуперації;

– при підтриманні регламентних температурних режимів у взаємопов'язаних технологічних зонах на математичній моделі порівняно з експериментальними виробничими даними знижуються електроспоживання на 5,73 %, і витрати природного газу до $1,1 \text{ м}^3/\text{т}$;

– проведено аналіз адекватності за критерієм Фішера отриманих результатів моделювання з використанням комплексної математичної моделі та експериментальних даних виробничої ВМКТ типу LURGI-278A ФОГ ПрАТ «Північний ГЗК», котрий показав, що отримані основні характеристики технологічного процесу в середньому відрізняються між собою не більше, як на п'ять відсотків, тобто вони є адекватними.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ЗОНАМИ ВМКТ

4.1. Розробка функціональної схеми системи автоматизованого керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині

Удосконалення математичного і програмного забезпечення вимагає зміни структури існуючої функціональної схеми системи автоматизованого керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрній машині і потребує використання сучасної елементної бази. Це дозволить управляти низкою технологічно необхідних процесів: укладка сирих окатишів на візки конвеєрної стрічки, підтримання необхідної швидкості при їх переміщенні вздовж ТЗ, нормованих значень параметрів ГПП і температурних режимів шару окатишів у кожній зоні машини, а також виконувати функції контролю, сигналізації, захисту та блокування. З цією метою розроблена удосконалена функціональна схема системи керування процесом термічного оброблення окатишів на ВМКТ. Вона представлена на рис. 4.1. Система містить такі зони, елементи й блоки: КС – конвеєрна стрічка з візками, у які завантажуються окатиші й переміщуються через ЗСІ, ЗСІІ, ЗПН, ЗВ, ЗР, ЗОІ і ЗОІІ, форкамери 0–27, газоповітряні колектори КЛІ–КЛ6, димотяги D1–D7, датчики (первинні перетворювачі): температури ГПП у технологічних зонах DT1–DT8 і на виході із зон випалювання й охолодження відповідно Tвв і Tво, тепловізори T1–T7, вологи DF1 і DF2, висоти шару окатишів DH, швидкості переміщення візків DV, тиску атмосферного повітря DP1 і DP2, маси DM1–DM6, перетворювачі частоти ПЧ1–ПЧ7, що управляють роботою димотягів D1–D7, датчик витрати електроенергії DE, датчик витрати природнього газу DB, блоки управління регулюючими органами і газотемпературним режимом в горні. Кожний перетворювач частоти ПЧ1–ПЧ7 складається з некерованого випрямляча й керованого інвертора напруги.

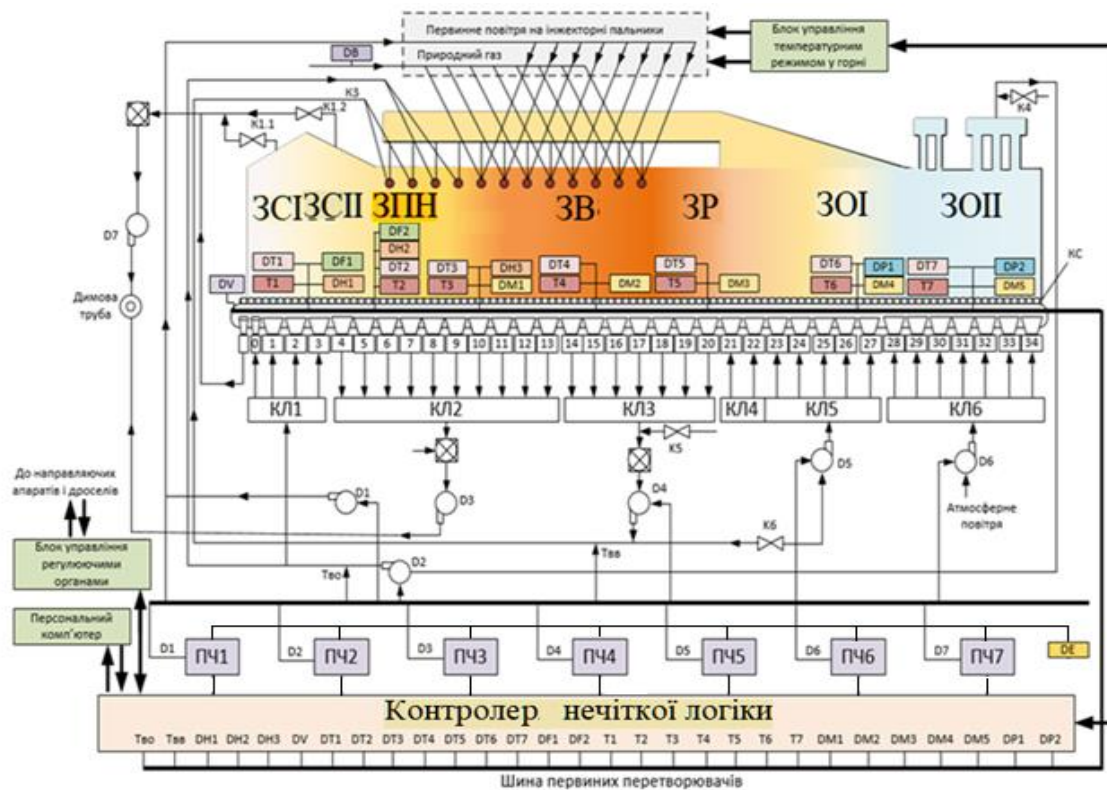


Рис. 4.1. Функціональна схема системи керування процесом термічного оброблення окатишів на конвеєрних машинах

Контролер нечіткої логіки реалізує алгоритми керування кожною технологічною зоною на основі нечітких множин. Первинні перетворювачі виходами зв'язані з контролерами, які підключені до персонального комп'ютера, що здійснює цифрову обробку зображень і має SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) систему. Ця система призначена для диспетчерського управління, збору даних, їх обробки, відображення та архівування інформації про термічне оброблення окатишів на ВМКТ у реальному часі. Система забезпечена вбудованими алгоритмами захисту від аварійних відключень живлення та алгоритмом автоматичного запуску при відновленні подачі електроенергії. Вона має зрозумілий та зручний інтерфейс із SCADA системою, яка не тільки відображає хід технологічного процесу, але й дозволяє перевести систему в ручний режим роботи. Це значно підвищує оперативність забезпечення виробництва окатишів, скоротити час простою, включити отриману інформацію в загальну інформаційну систему ФОГ. Система автоматичної ідентифікації входить

у комплекс заходів, який робить ВМКТ, щоб підвищити продуктивність процесу, полегшити керування обробленням окатишів, позбавити виробничий процес від помилок і пов'язаних з ними збитків.

Система має цифровий датчик швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки DV, який має дистанційну передачу показань. У ній датчик висоти шару окатишів DH є ультразвуковим з дистанційною передачею показань. Для датчиків температури газу DT1–DT8, Tво і Tвв використовують пірометри або безконтактні інфрачервоні термометри, якими вимірюють температуру за принципом реєстрації теплового випромінювання об'єкта в інфрачервоному діапазоні. Експрес-контроль основності та вологи окатишів проводиться шляхом атомно-емісійної спектроскопії – це метод визначення хімічного складу речовини за спектром випромінювання його атомів під впливом джерела збудження (лазер) і при цьому виконується їх автоматизований збір та обробка. У методі атомно-емісійної спектроскопії збудження лазером забезпечує високий дозвіл для елементного аналізу мікроелементів у окатишах за допомогою LIBS системи. Це є найпоширеніший експресний високочутливий метод ідентифікації та кількісного визначення мікроелементів домішок в окатишах. Важливою перевагою такого способу в порівнянні з іншими оптично-спектральними, а також багатьма хімічними та фізико-хімічними методами аналізу, є можливість безконтактного, експресного аналізу та визначення великої кількості елементів у широкому інтервалі концентрацій із задовільною точністю.

Інфрачервону термографію шару окатишів виконують за допомогою інфрачервоних аналізаторів-датчиків (тепловізорів) T1–T7, отримують значення температурного поля шару окатишів та їхньої вологості, виконують автоматизований збір та обробку цієї інформації й порівнюють із заданими значеннями і залежно від цих значень корегують термічний процес випалювання окатишів і газодинамічний режим шару окатишів за довжиною машини. Для вимірювання маси датчиками DM1–DM6 використовується установка NHS-M 150t [96]. Тиск газоповітряних потоків у технологічних зонах P1–P7 і атмосферного повітря DP1 і DP2 визначається за допомогою мікропроцесорних датчиків тиску

«Сафір М» [97], які призначені для безперервного перетворення абсолютного, надлишкового і гідростатичного тисків, тиску-розрідження, розрідження, різниці тисків газів (зокрема, газоподібного кисню та кисневмісних сумішей) в уніфікований електричний сигнал постійного струму.

Сигнали аналогових датчиків перетворюються в цифровий код, і вже перетворений сигнал передається на велику відстань по шині первинних перетворювачів. Електромагнітні наведення не впливають на показники датчиків, що збільшує ймовірність одержуваних результатів. Передача даних здійснюється за послідовним каналом зв'язку стандарту RS485. На основі даних про хімічний склад невипалених окатишів, температурне поле шару окатишів за технологічними зонами машини, вологості окатишів, визначених у режимі реального часу, виконуються й інші операції технологічного процесу. Так, наприклад, регулюється завантаження машини сирими окатишами, висота шару окатишів, тиск спалювання газу й повітря, електроприводи вентиляторів, димотягів, швидкість руху візків конвеєрної стрічки тощо.

Система працює так. До запуску ВМКТ включаються системи аспірації, транспортування окатишів і відсіву, охолодження й мастила. Бункер для ліжка заповнений повністю окатишами. У роботу запускаються димотяги D7, D6 і D1, забезпечуючи подачу на пальники атмосферного повітря. У візки конвеєрної стрічки завантажуються на постіль із випалених окатишів сирі окатиші. Після досягнення в зоні випалювання температури 500 °С на шарі постелі висотою 0,3 м починають рухатися візки зі швидкістю до 0,5 м/хв., які проходить через усі технологічні зони і виконується термічне оброблення окатишів. Після досягнення в зоні випалювання температури теплоносія газоповітряного потоку 800 °С запускаються димотяги D2 і D3. Швидкість переміщення візків DV вибирається на основі від датчиків отриманої висоти шару окатишів DH.

Газоповітряні колектори КЛ1–КЛ6 об'єднують відповідним чином форкамери 0–27. При виробництві термозміцнених залізородних окатишів, яке здійснюється у ВМКТ, теплоносії потоку зі збірних колекторів КЛ3–КЛ5, що об'єднують форкамери 10–14 зони випалювання і рекуперації, подають у другу

зону сушіння окатишів за допомогою димотягів D4 і D5. У дугтьовий колектор КЛ6 першої зони охолодження подають за допомогою димотяга D6 підмішене атмосферне повітря до теплоносія, що подається димотягом D2 в колектор КЛ1 пешої зони сушіння продувом шару окатишів знизу й шару окатишів зверху в другій зоні сушіння в регульованих співвідношеннях. У такий спосіб забезпечується повне використання відхідних із шару гарячих теплоносіїв потоку для повторного використання в технології. Димотяг D1 нагнітає атмосферне повітря на інжекторні пальники ЗПН і ЗВ. Димотяг D3 транспортує газоповітряний потік із ЗСІІ, ЗПН і ЗВ, а димотяг D7 із ЗСІ – у димову трубу.

На основі отриманих значень від датчиків: температури теплоносіїв DT1–DT8, тепловізорів T1–T7, вологи DF1 і DF2, тиску атмосферного повітря DP1 і DP2, маси DM1–DM6 контролерами нечіткої логіки здійснюється параметрична ідентифікація моделі об'єкта керування, яка виконується за алгоритмом керування процесом термічного оброблення окатишів на ВМКТ. Структурна схема підключення контролера НЛ представлена на рис. 4.2. Процес формування моделі відбувається до того моменту, коли точність ідентифікації, що визначається середньоквадратичною похибкою, не досягне визначеної величини. За умови відсутності помилок КНЛ починає виконувати функцію регулятора теплоносія з нечіткою моделлю. Перетворювачі частоти ПЧ1–ПЧ7 і блоки управління регулюючими органами й температурним режимом у горні, згідно із закладеним у контролері алгоритмом, формують керуючі дії для управління роботою димотягів D1–D7, направляючих апаратів та дроселів, подачею первинного повітря й природного газу.

Керувати швидкостями обертання двигунів димотягів пропонується шляхом зміни частоти напруги живлення, що підводиться до електричних машин у функції зміни температури теплоносія ГПП на виходах із шару окатишів ЗВ, ЗР, ЗОІ і ЗОІІ. Для цього використовуються силові напівпровідникові перетворювачі ПЧ1–ПЧ7 із керованими інверторами напруги, що виконані на біполярних транзисторах. Вибір частотного способу керування димотягами за допомогою ПЧ1–ПЧ7 обумовлений високою точністю регулювання й електроенергетичною

ефективністю. Керування теплоносіями ГПП залежить від роботи вентиляторів та димотягів, тому витрати електроенергії фіксуються за допомогою датчика DE.

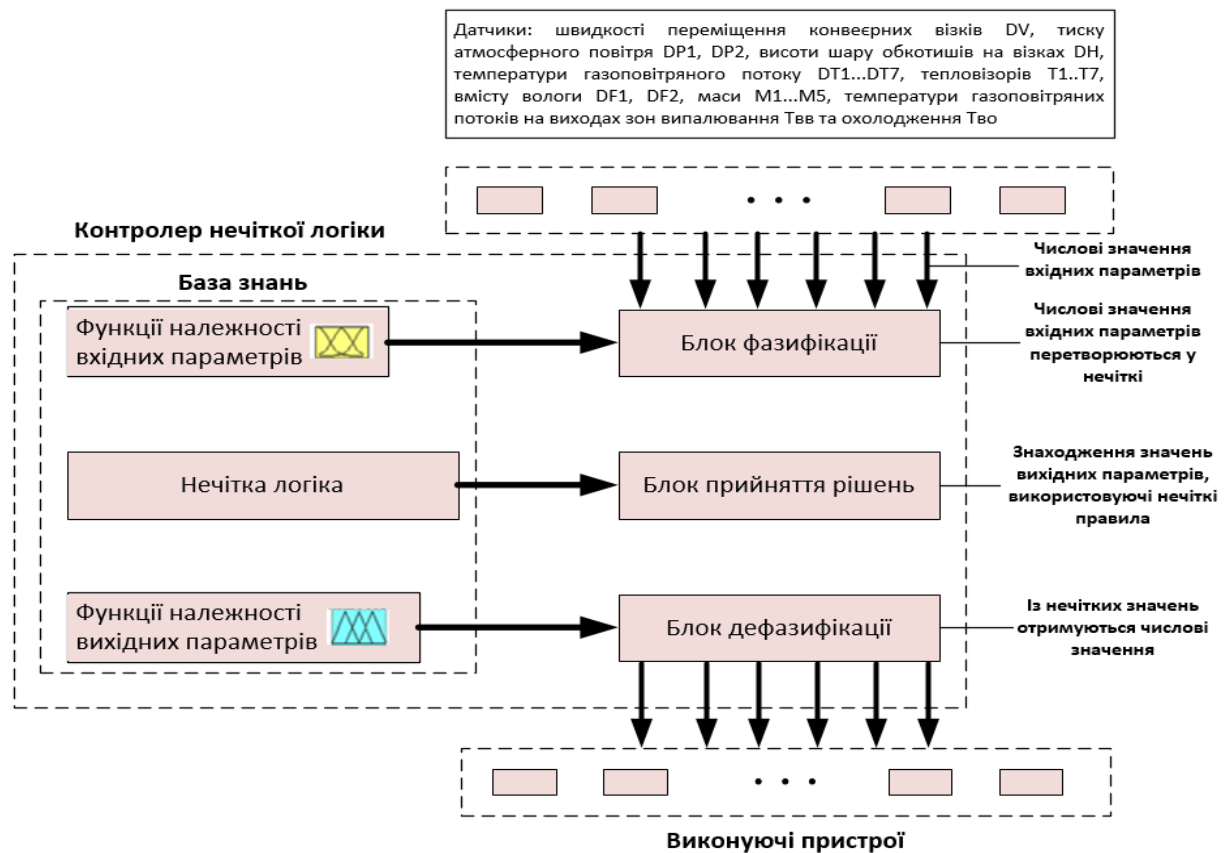


Рис. 4.2. Структурна схема підключення КНЛ

Запропонована функціональна схема автоматизації процесу керування термічного оброблення окатишів на ВМКТ (додаток И). Керування процесом виконується при нечітких технологічних параметрах електроприводами димотягів із перетворювачами частоти. Це необхідно для зміни робочого тиску теплоносіїв на їхніх вихідних колекторах і обумовлює необхідність управління продуктивністю димотягів для подачі використаного потоку теплоносія для оперативного реагування на коливання температури в технологічних зонах ВМКТ. Розділення функцій обробки інформації, що надходить із датчиків у контролери із використанням нечітких регуляторів та розподіл управління між персональним комп'ютером і блоками управління підвищує швидкодію замкненої системи через паралельне проведення обчислювальних операцій.

4.2. Алгоритм керування процесом термічного оброблення окатишів при нечітких і неповних параметрах технологічного процесу

Для розуміння алгоритму роботи системи автоматичного керування під час термічної обробки залізородних окатишів на конвеєрній машині розроблена блок-схема, детальний опис блоків системи наводиться в додатку Д. Для автоматичного керування температурним режимом та основними механізмами машини необхідно ввести дані про нормовані значення параметрів: швидкості візків КС V_{kv} , основності окатишів β , вмісту вологи в окатишах Ψ , висоти шару окатишів H , витрати природного газу b_p та витрати повітря A на його спалювання для виконання регламенту технологічного процесу в блоці 1. Оскільки існує ймовірність помилки оператора технологічного процесу (людського фактора) системою передбачені перевірка на введення всіх зазначених параметрів (блок 2) та перевірка коректності уведених даних (блок 3). Після успішної ініціалізації параметрів термічної обробки виконується блок 4, у якому вирішуються алгоритми перерахунку параметрів технологічного процесу з врахуванням ініціалізованих даних. Також до блоку 4 додається значення температури теплоносія другої зони охолодження.

Блоки 5–7 призначені для перевірки основних параметрів для ЗСІ, які мають безпосередній вплив на протікання сушіння окатишів. У випадку, коли значення нормовані, переходимо до підпрограми нечіткого алгоритму для ЗСІ, в іншому випадку – виконуються підпрограми стабілізації основних параметрів першої зони сушіння (блоки 8–10). Реалізація блоку 8 полягає в регулюванні швидкості конвеєрними візками V_{kv} , що дозволить збільшити/зменшити шар окатишів. Для стабілізації вологи Ψ_1 виконується розрахунок температурного режиму в камері для видалення частки вологи. ГПП T_{p1} , які потрапляють у першу зону сушіння перетічним колектором, регулюються клапанами вакуум-камер.

До блоку 11 подаються параметри температури верхнього шару окатишів T_{sh1} , вмісту вологи Ψ_2 , висоти шару окатишів H_2 та температури T_{p2} теплоносія ГПП із ЗВ, де технологічний процес виконується за підпрограмою нечіткого

алгоритму. Основними регулюючими параметрами зони попереднього нагрівання: є висота шару окатишів H_2 , їхня волога Ψ_2 , температура T_{p2} ГПП та температура верхнього шару T_{sh1} , перевірка значень яких відбувається в блоках 12–15 відповідно. У разі невідповідності нормованим значенням виконуються підпрограми стабілізації параметрів (блоки 16–19).

Вхідними параметрами в блок 20 нечіткого алгоритму для зони попереднього нагрівання є витрати повітря A_1 , витрати природного газу b_{p1} , температура верхнього шару окатишів T_{sh2} , вміст вологи Ψ_3 , висота шару окатишів H_3 та температура T_{p2} ГПП із зони випалювання. У блоках 21–24 виконується перевірка параметрів зони попереднього нагрівання. Якщо перевірка дає негативний результат, то виконуються підпрограми стабілізації параметрів зони П (блоки 25–28).

Після зони попереднього нагрівання переходимо до зони випалювання та блоку 29, де технологічний процес виконується за підпрограмою, що має нечіткий алгоритм для обчислення параметрів. Головними параметрами, що надходять у зони випалювання, є витрати повітря на спалювання природного газу A_2 , витрати природного газу b_{p2} , температура верхнього шару окатишів T_{sh3} , їхня маса m_1 на конвеєрному візку та температура теплоносія T_{p3} із першої зони охолодження. Оскільки в зоні випалювання відбувається вискотемпературне оброблення окатишів, виконується перевірка параметрів (блоки 30–32) температури верхнього шару окатишів T_{sh3} , їхньої маси m_1 та температури теплоносія T_{p3} із першої зони охолодження для запобігання спікання окатишів. Стабілізація незадовільних значень параметрів виконується у блоках 33–35, а після виконання підпрограм переходимо до блоку 36.

У зоні рекуперації до блоку 36 надходять параметри температури верхнього шару окатишів T_{sh4} , їхньої маси m_2 та температури теплоносія ГПП T_{p3} . Перевірка основних параметрів зони рекуперації виконується в блоках 37–39. У разі невідповідності регламентованим значенням виконуються підпрограми стабілізації параметрів (блоки 40–42).

У першій зоні охолодження відбувається інтенсивне охолодження шару окатишів, тому до підпрограми, де виконується технологічний процес, за нечітким алгоритмом надходять параметри температури верхнього шару окатишів T_{sh5} , їхньої маси m_3 та тиск атмосферного повітря P_{atm1} . У блоках 44–46 відбувається їх перевірка відповідності нормованим значенням, якщо це твердження невірне, то виконуються програми (блоки 47–49) стабілізації основних параметрів першої зони охолодження.

У другій зоні охолодження відбувається остаточне охолодження випалених окатишів, тому вхідними параметрами до блоку 40 будуть аналогічні вхідні параметри до першої зони охолодження. Перевірка основних параметрів виконується в блоках 51–53. Якщо параметри знаходяться не в нормі, то виконуються підпрограми стабілізації параметрів у блоках 54–56. Після виконання перевірки або підпрограм стабілізації переходимо до блоку 57, що означає завершення процесу керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині.

Створено програмне забезпечення автоматизованої системи управління, що дає можливість завантаження й компіляції коду до мікроконтролерів технологічного процесу конвеєрної машини. При програмуванні використовується мова C++, оскільки дозволяє достатньо швидко з'єднуватись від найнижчого рівня (апаратних засобів) до найвищого (рівня об'єктно-орієнтованого програмування). Розроблене програмне забезпечення на мові програмування C++ складається з декількох файлів (kvm.h, kvm.c, ert_main.c), програмний код наведений у додатку Е.

4.3. Технічна реалізація автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу

Значне ускладнення технологічного процесу, необхідність збільшення обсягів виробництва обпалених окатишів, ефективних процесів й економії енерговитрат і, як наслідок, формування жорстких вимог до забезпечення якості

виробництва окатишів призводять до необхідності проектування більш досконалих схем автоматизації. Відносна автономність роботи однотипних апаратів технологічних зон, високі вимоги до рівня автоматизації, обумовлені умовами виробництва окатишів і виробничого обладнання, територіальне розташування агрегатів призводять до доцільності використання децентралізованих систем автоматизації з ієрархічною структурою, представленою на рис. 4.3 [98].

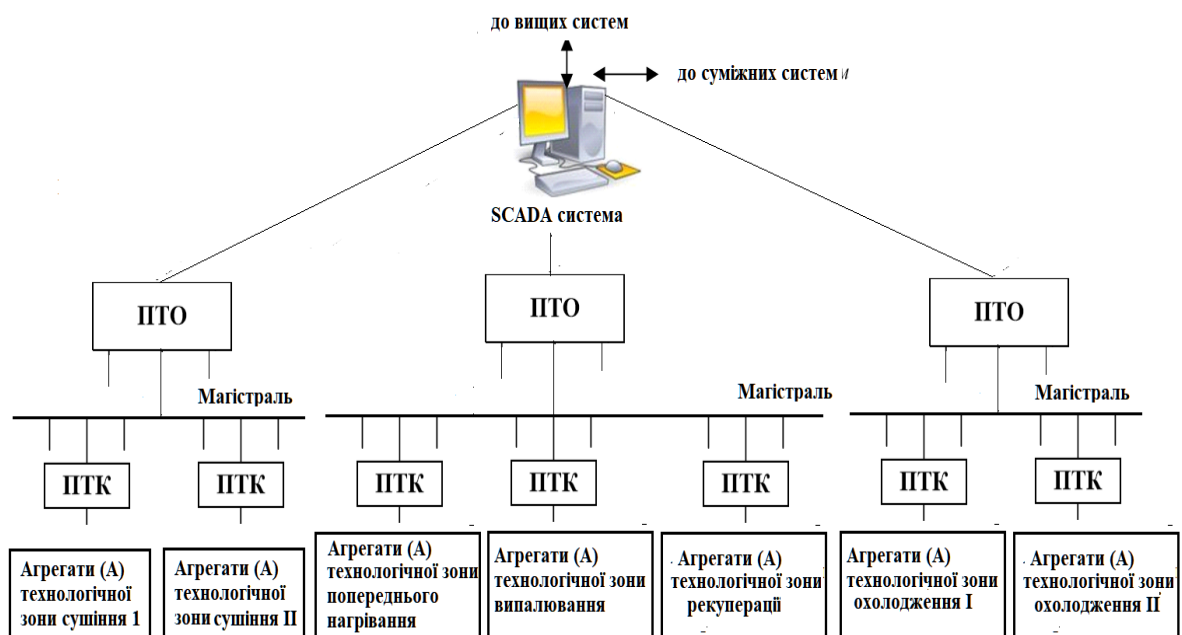


Рис. 4.3. Структура схеми автоматизації процесом керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу

Структура системи автоматизації включає в себе три рівні ієрархії управління. На першому рівні ієрархії розташовується польове обладнання, датчики для вимірювання й контролю таких параметрів: температури верхніх шарів окатишів у кожній технологічній зоні, температури теплоносіїв ГПП на виходах із зон випалювання й охолодження, основності, вологи, маси та висоти шару окатишів, швидкості переміщення візків, тиску атмосферного повітря, витрати електроенергії та природного газу, тощо. За допомогою перетворювачів інформація з цих датчиків надходить на пульт управління оператора.

На середньому рівні розташовуються програмовані логічні контролери, до функцій яких входить: реалізація алгоритмів керування технологічними зонами машини на основі нечітких множин, керування і виконання обміну даними між підсистемою введення / виводу і мережею управління. Підсистема введення / виведення необхідна для обробки інформації від датчиків і видачі керуючих команд на виконавчі пристрої.

На верхньому рівні схеми автоматизації розташовуються сервери і пульт управління оператора, які призначені для управління термічним процесом оброблення окатишів на ВМКТ та подання інформації на мнемосхему, на якій подається інформація про параметри введення / виведення, значення змінних технологічного процесу, події, дані діагностики системи тощо. На пульті управління передбачена можливість ручного управління виконавчими механізмами оператором.

Функції контролю та управління кожним агрегатом (АГР) на кожній стадії виробництва реалізовані на основі окремого програмно-технічного комплексу (ПТК). Кожен ПТК (рис. 4.3) включає регулюючий мікропроцесорний контролер нечіткої логіки й набір функціональних блоків для зв'язку з об'єктом управління й пультом технолога-оператора (ПТО), об'єднаних інтерфейсною магістраллю. Інформація про хід протікання технологічного процесу для кожної ТЗ у кожному АГР виводиться на ПТО. Мікропроцесорний контролер ПТО управляє мультиплексним обміном інформації з ПТК підгрупи АГР, надає інформацію технологу-оператору й здійснює взаємодію з вищим рівнем ієрархії управління.

У схемі автоматизації термічним обробленням окатишів при керуванні теплоносіями ГПП на основі нечіткої логіки в ролі ПТК використовуються восьмибітові мікроконтролери типу MC143150 фірми «Motorola» [99]. Максимальна кількість входів MC143150 дорівнює чотирьом і може програмуватися користувачем (додаток II). На кожен вхід припадає вісім функцій приналежності, які мають трапецеїдальний вид і, параметри яких визначаються користувачем. Для нечіткого контролера MC143150 розроблені засоби для

паралельного обміну з мікроконтролером TREI-5B-05. Зв'язок із ПЕОМ здійснюється через плату інтерфейсу MM3221EVK [100].

До складу схеми автоматизації виробництва окатишів, що використовується на ВМКТ, входять вимірювальні перетворювачі та регулятори з інтерфейсом, перетворювачі інтерфейсів та ін. Для вимірювання, регулювання та реєстрації (архівування) значень швидкості переміщення візків КС і струму електродвигунів електроприводів, вимірювання температури в горні машини та тиску теплоносіїв ГПП у ТЗ використовуються відеографічні реєстратори типу РМТ69 [101]. Вимір температури у вакуум-камерах виконується індикаторами типу ИТМ-11 [102], а витрати газу – реєстратором РМТ69. Зберігання інформації в РМТ69 реалізовано у внутрішній пам'яті. Перенесення інформації на контролери здійснюється за допомогою інтерфейсу RS-232. Вимірювальні канали РМТ 69 працюють з уніфікованими вхідними електричними сигналами у вигляді постійного струму 4–20 мА, перетворювачами термоелектричними (ТП) і вимірювачами напруги постійного струму до 100 мВ.

Датчик висоти шару окатишів є ультразвуковим з дистанційною передачею показань. Для датчиків температури теплоносія ГПП може бути використано пірометр або безконтактний інфрачервоний термометр, яким вимірюють температуру за принципом реєстрації теплового випромінювання об'єкта в інфрачервоному діапазоні.

Експрес-контроль основності окатишів проводиться шляхом атомно-емісійної спектроскопії – це метод визначення хімічного складу речовини за спектром випромінювання його атомів під впливом джерела збудження (лазер). Для цього використовується портативний лазерний спектрометр SciAps Laser-Z500 [103]. Він виконує аналіз хімічного складу в металах, сплавах, геологічних зразках хімічних елементів від Н (водню) до U (Урана), на можливих мінімальних концентраціях. У методі атомно-емісійної спектроскопії збудження лазером забезпечує високий дозвіл для елементного аналізу мікроелементів у окатишах за допомогою LIBS системи й раманівської спектроскопії комбінаційного розсіювання світла. Це є найпоширеніший експресний високочутливий метод

ідентифікації та кількісного визначення мікроелементів домішок в окатишах. Важливою перевагою такого способу в порівнянні з іншими оптичними – спектральними, є можливість безконтактного, експресного та кількісного визначення великої кількості елементів у широкому інтервалі концентрацій із задовільною точністю.

Інфрачервону термографію поверхні шару окатишів у ТЗ ВМКТ виконують за допомогою інфрачервоних аналізаторів-датчиків (тепловізорів). За допомогою тепловізора FLIR GF309 [104] отримують значення температурного поля шару окатишів та їхньої вологості, виконують автоматизований збір та обробку цієї інформації й порівнюють із значеннями технологічної карти та у функції від цих значень корегують термічний процес обпалювання окатишів і газодинамічний режим шару окатишів за довжиною ВМКТ. Для вимірювання маси візків з окатишами на КС використовується установка NHS-M 150t [105].

Засоби контролю з місцевим відліком параметрів і первинні вимірювальні перетворювачі з дистанційною передачею сигналу встановлюються за місцем. Вторинні перетворювачі та апаратура управління виконавчими механізмами розміщені в місцевій шафі управління, що підключаються до загальної шини передачі даних промислової мережі, яка за допомогою протоколу передає інформацію на автоматизоване робоче місце (АРМ) оператора. До складу АРМ входить комп'ютер із встановленим на ньому програмним забезпеченням SCADA-системи.

4.4. Експериментальне дослідження процесу керування обробленням окатишів на віртуальній моделі

Поява сучасних систем програмування останнього покоління призначена для програмістів непрофесіоналів, зокрема тих, які займаються автоматизацією виробничих процесів, та дозволяє проводити практичні апробації запропонованих алгоритмічних й апаратно-програмних розробок. До таких нових розробок відносяться технології віртуальних пристроїв, для побудови яких

використовується програмне середовище графічного програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) компанії National Instruments, яке має дуже зручний, призначений для користувача, інтерфейс і потужні засоби графічного програмування [106, 107]. Це зробило можливим їх використання фахівцями безпосередньо, не звертаючись за допомогою до професійних програмістів [108–114].

Для розробки моделі керування процесом маємо два поля: фронтальної панелі та блок-діаграми. Фронтальна панель дає змогу обирати вигляд приладу, тип вводу даних та їх виведення, як графічної, так і символічної форми. Блок-діаграма дає уявлення про роботу приладу, тобто виконує обробку тих самих даних. Для обробки даних використовуються функції, які LabVIEW має у своєму розпорядженні, для роботи з цифрами, символами, матрицями тощо. Більш детальний опис роботи в LabVIEW надано в посібнику [114].

Модель представлена як фронтальна панель ВМКТ (рис. 4.4). На фронтальній панелі моделі ВМКТ знаходяться: панель завдання вхідних параметрів швидкості КС V_{kv} , висоти шару окатишів H , їх основність B , вміст вологи Psi , витрати природного газу b_p та повітря A . Окрім того, на ній розміщені кнопки запуску машини (кнопка «START») та її зупинки (кнопка «STOP»).

Введення даних у панель має алгоритми перевірки наявності даних та їх адекватності до регламентованих значень технологічного процесу, який представлений на рис. 4.5.

Перевірка адекватності даних здійснюється за регламентованими діапазонами параметрів: швидкість переміщення візків V_{kv} – 0,72–2,52 м/с; висота шару окатишів H – 150–400 мм; основність окатишів B – 0,77–1,56 од.; вміст вологи в окатишах Psi – 7–11 %; витрати природного газу b_p – 175–275 м³/год.; витрати повітря A – 1750–2750 м³/год. Також враховується значення кнопки «START»: якщо всі умови виконуються, візки КС починають рухатись із заданою швидкістю V_{kv} . Створена анімація руху візків КС, руху теплоносіїв ГПП із колекторів (КЛ1–КЛ6) у вакуум-камери та навпаки, а також спалювання природного газу у форкамерах ВМКТ.

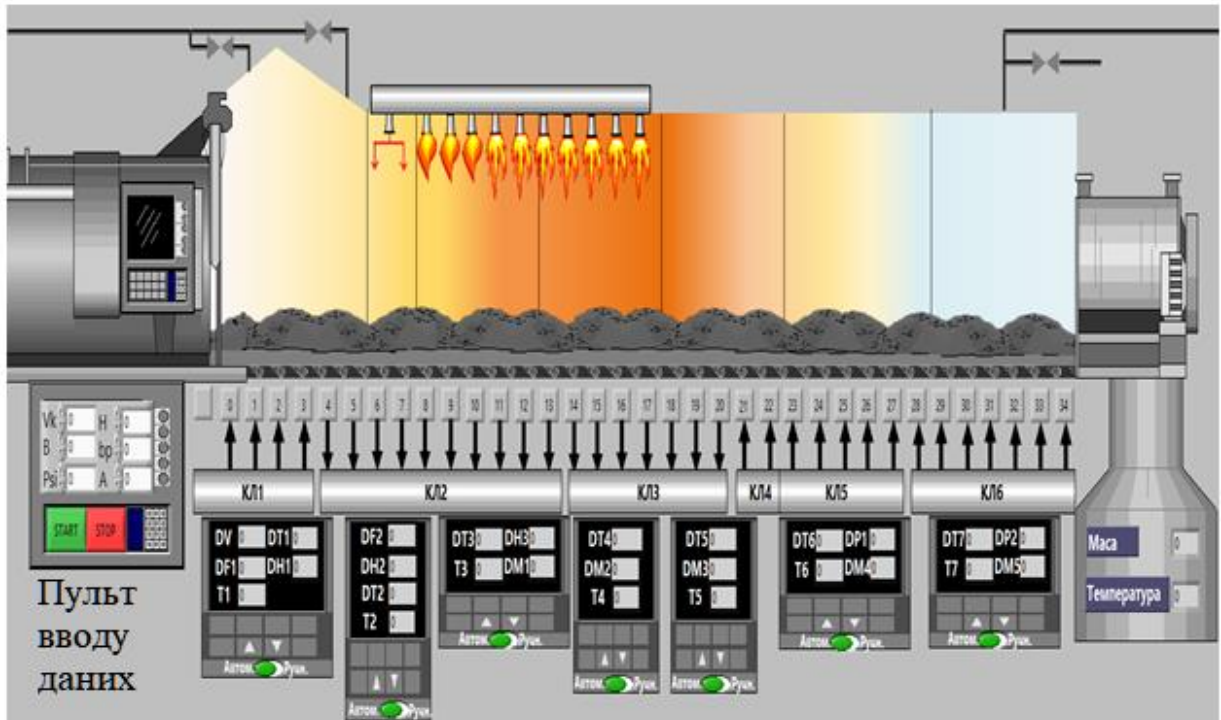


Рис. 4.4. Фронтальная панель модели ВМКТ

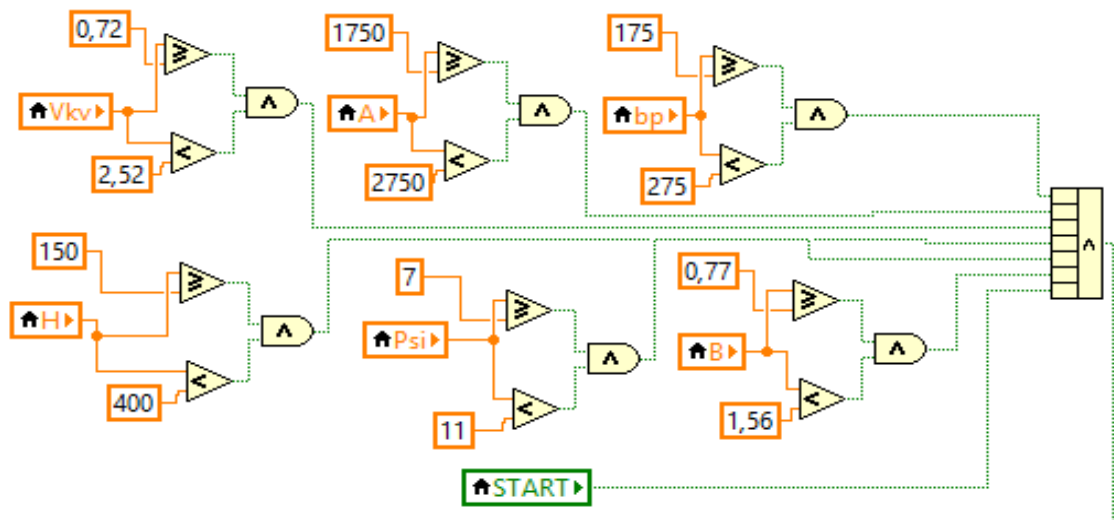


Рис. 4.5. Алгоритм проверки введенных данных

Використання Case Structure обґрунтовано перевіркою введених даних та їхньої відповідності регламентованим значенням. При позитивному результаті перевірки та натисканні кнопки «START» виконується анімація в селекторі «True» з певною затримкою в часі для більшої наочності.

Для кожної технологічної зони ВМКТ використовуються панелі з виведенням головних параметрів цієї зони. Існує два режими роботи для кожної з

технологічних зон машини: автоматичний і ручний. Тумблер, який змінює режим роботи, знаходиться на кожній панелі й призначений тільки для зміни режиму роботи однієї зони. Панелі для виведення даних технологічних зон (ЗСІ, ЗСП, ЗПН, ЗВ, ЗР, ЗОІ і ЗОІІ) представлені на рис. 4.6. У даній моделі розроблено три режими швидкості протікання термічного процесу оброблення окатишів: низький, середній та високий.

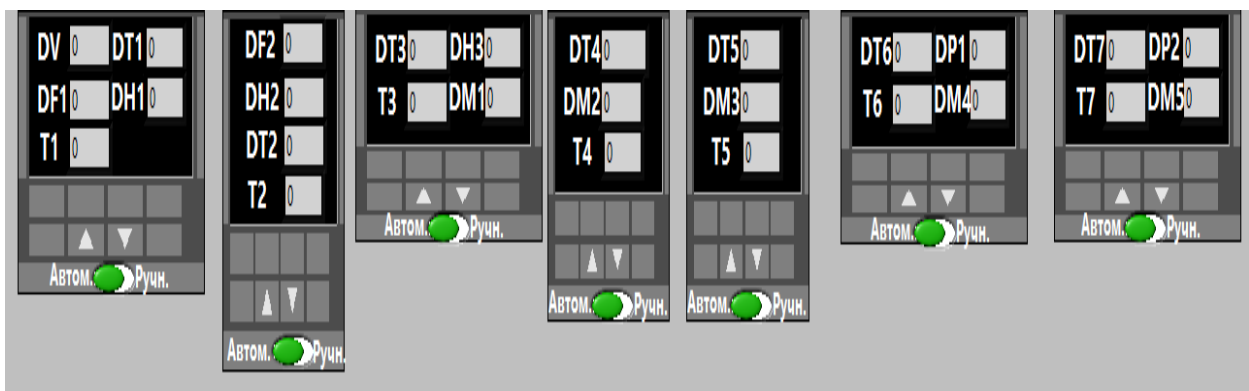


Рис. 4.6. Панелі виведення параметрів технологічних зон

Фрагмент блок-діаграми алгоритму швидкості виконання ТП представлено на рис. 4.7. Використання Case Structure дозволяє застосовувати бульову логіку, що спрощує побудову алгоритму. Великий вплив на зміну швидкості протікання термічного процесу оброблення окатишів на ВМКТ здійснюють зміни висоти шару окатишів та вміст у них вологи.

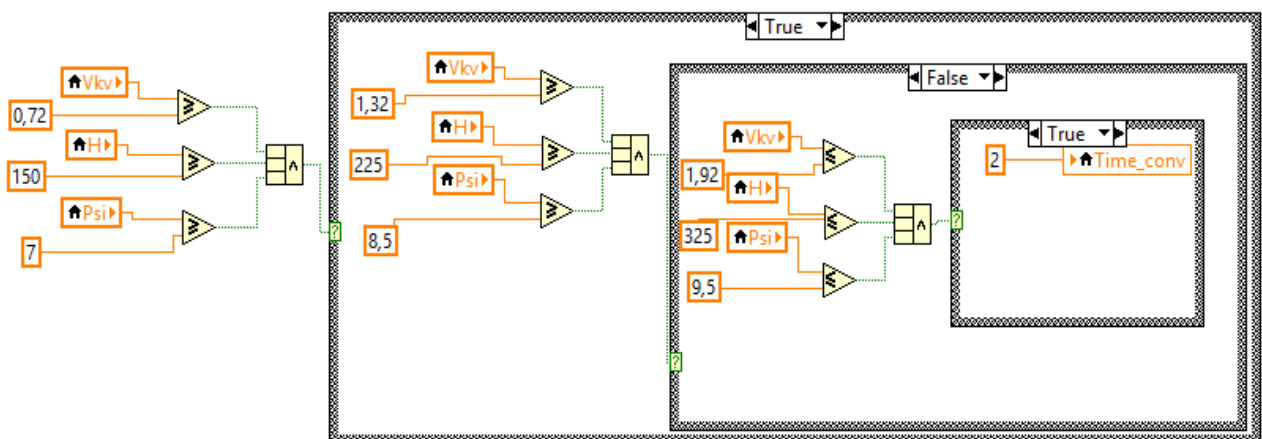


Рис. 4.7. Блок-діаграма алгоритму виконання технологічного процесу

За допомогою програми Fuzzy Logic VI (рис. 4.8), в якій використовується КНЛ, для кожної зони машини виконана автоматизація термічного процесу оброблення окатишів при використанні нечіткої логіки.

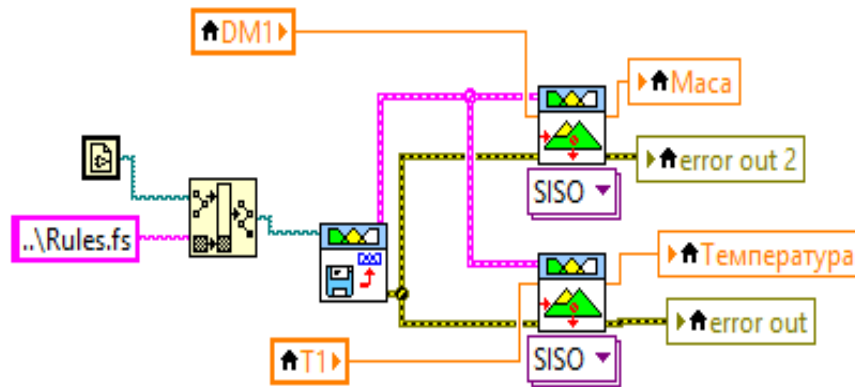


Рис. 4.8. Блок-діаграма використання КНЛ

Усі нечіткі правила для технологічних зон машини зберігаються у файлі Rules.fis (додаток Б) і завантажуються до КНЛ за допомогою Load Fuzzy System VI. На виході КНЛ отримуємо значення маси окатишів та їхньої температури на виході з ВМКТ. Перед початком термічної обробки окатишів оператором вводяться параметри: фізико-хімічні властивості сирих окатишів, витрати природного газу та повітря на його повне спалювання. Якщо введені значення коректні, то при натисканні кнопки «START» починається термічний процес оброблення окатишів: рухаються візки КС, вентилятори та димотяги приводяться в дію, спалюється природний газ у форкамерах високотемпературних зон. Під час протікання термічної обробки окатишів можливе використання ручного режиму, завдяки якому здійснюється завдання бажаних параметрів процесу в ТЗ. Аналіз роботи ТДП ВМКТ та транспортування теплоносіїв ГПП дозволяє провести аналіз використання електроенергії на віртуальному приладі. Проведений експеримент використання електроенергії при роботі вентиляторів та димотягів при різних параметрах ТП. Дані експерименту представлені в табл. 4.1 за показниками: швидкості візків КС V_{kv} , висоті шару окатишів H , основності B та вологи Ψ ,

кількості теплоти C повторного використання для ЗСІ, ЗСІІ та ЗПН, витрат палива b_p , питомої витрати електроенергії E .

Таблиця 4.1

Експериментальні дані витрати енергоспоживання при випалюванні газу й роботі димотягів із повторним використанням теплоносіїв високотемпературних зон

№	Vkv, м/хв.	H, мм	ЗВ	Ψ , %	C, кДж			b_p , м ³ /год	E, кВт·год/т
					ЗСІ	ЗСІІ	ЗПН		
1	2,22	295	1,02	9,5	113	270	780	210	31,5
2	2,6	400	0,79	10,2	195	210	580	259	32,4
3	1,95	375	0,77	8,9	165	234	615	234	28,9
4	1,24	380	0,85	9,1	198	200	569	189	29,1

Як показали результати досліджень, регламентні параметри термічної обробки окатишів забезпечують мінімум витрат електроенергії. Як видно з табл. 4.1, експеримент 3 має показник ведення ТП 28,9 кВт·год/т – зниження використання електроенергії на 3,5 кВт·год/т. Дані показники експерименту обумовлюють ефективне використання теплоносіїв ГПП. Зниження висоти шару окатишів на 25–55 мм та збільшення вмісту вологи в окатишах обумовлюється інтенсивною передачею теплоносія вентиляторами, що призводить до збільшення витрат електричної енергії. Для рівномірного продування шару окатишів або відсмоктування димотягом теплоносія з технологічних зон необхідно враховувати й швидкість візків і фізико-хімічні властивості окатишів, тому існує пропорційна залежність між швидкістю візків і роботою димотягів. В експерименті 2 збільшення витрати палива на випалювання 400 мм шару окатишів призводить до збільшення споживання електроенергії, оскільки вентилятори та димотяги транспортують більше теплоносія. Розглянемо результати моделювання термічного процесу за критерієм витрати природного палива у високотемпературних зонах машини конвеєрного типу. Дані експерименту надані в табл. 4.2 за показниками швидкості візків конвеєрної стрічки Vkv, висоти шару

окатишів H , їхньої основності B та вологи Ψ , об'єму атмосферного повітря P_{atm} , питомої витрати електроенергії E , витрат палива b_p .

Таблиця 4.2

Експериментальні дані витрати природного палива при роботі інжекційних пальників

№	V_{kv} , м/хв.	H , мм	B	Ψ , %	b_p , м ³ /т
1	2	326	0,95	9,5	15,64
2	1,5	350	0,79	10	18,19
3	2,25	375	0,77	8,9	16,6
4	1,9	390	0,85	8,5	12,2

Графік зміни кількості теплоти теплоносіїв ГПП від питомих витрат природного газу представлені графіком на рис. 4.9.

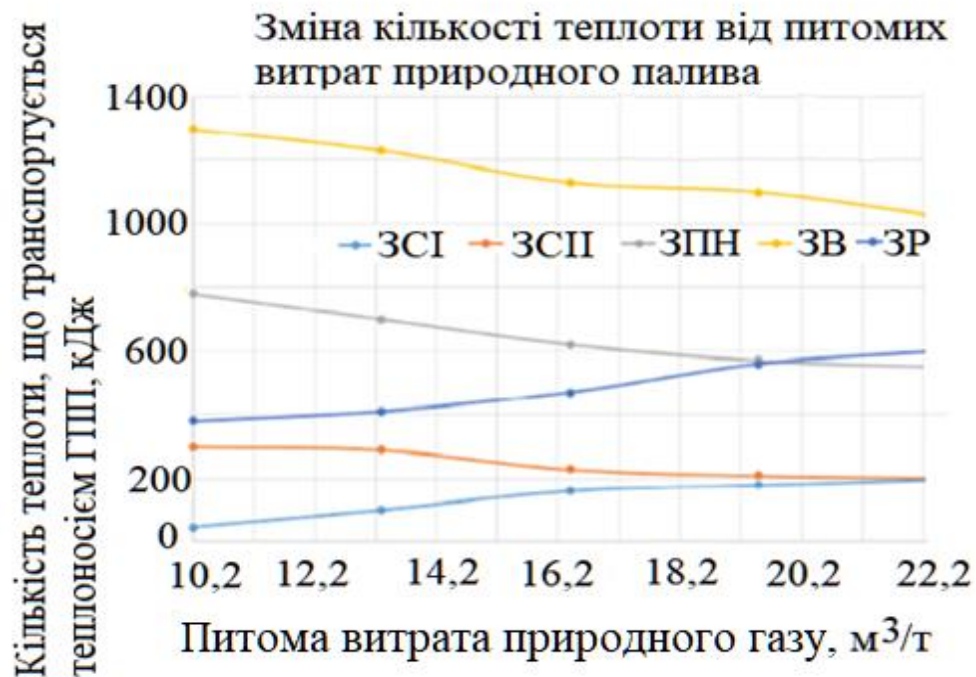


Рис. 4.9. Графік зміни кількості теплоти залежно від питомої витрати природного газу за технологічними зонами ВМКТ

Результати досліджень показали, що кількості теплоти теплоносіїв ГПП лінійно залежить від питомих витрат природного газу. Зона випалювання

потребує найбільшої, а перша зона сушки найменшої кількості теплоти, що транспортується теплоносієм газоповітряного потоку при менших питомих витратах природного газу за технологічними зонами ВМКТ. При збільшенні питомих витрат природного газу за технологічними зонами зменшується до кількості теплоти, що транспортується теплоносієм газоповітряного потоку. Так кількість теплоти для зони випалювання зменшуються на 23 %, зони попереднього нагрівання на 13 %, другої зони сушіння на 26 % і збільшуються для першої зони сушіння у 4 рази, а зони рекуперації у 1,5 раз.

Виконані дослідження дозволяють стверджувати, що інтенсивне використання газу в зонах високотемпературного режиму призводить до збільшення витрат природного газу та більш інтенсивного переміщення теплоносія газоповітряного потоку, що зумовлює зменшення теплоти теплоносія.

За допомогою віртуального пристрою моделі в LabVIEW продемонстровано графік зміни температури теплоносія ГПП у функції зміни швидкості переміщення візків КС, який представлено на рис. 4.10.

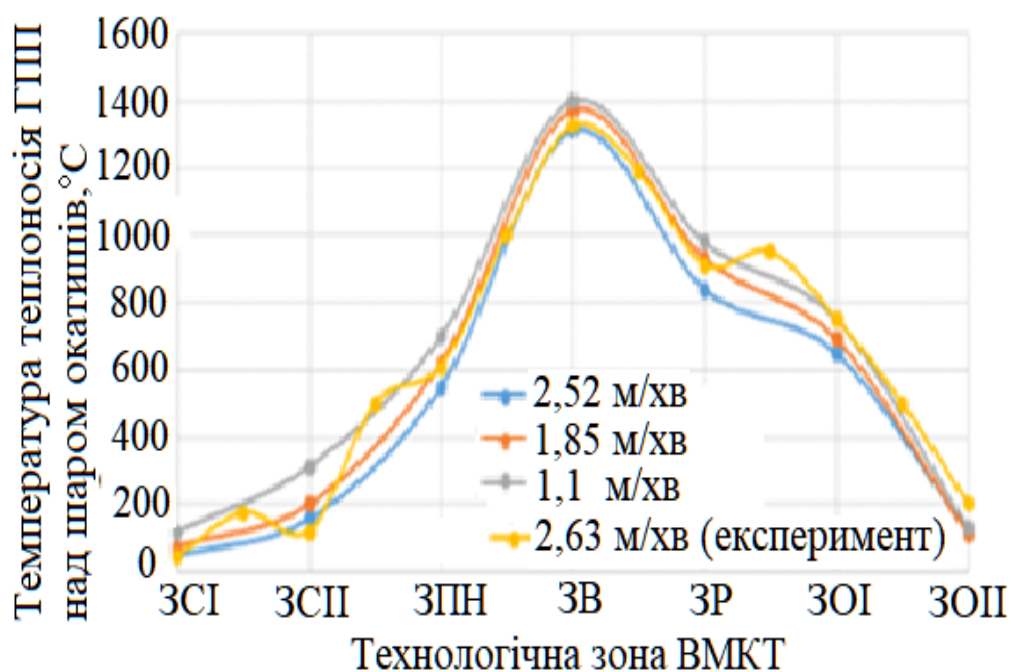


Рис. 4.10. Графік впливу швидкості переміщення візків КС на температуру теплоносія ГПП за технологічними зонами ВМКТ

Збільшення у два рази (від 1,1 до 2,52 м/хв.) швидкості переміщення візків КС, обумовлює зміну температури теплоносія ГПП у ЗВ на 100 °С (від 1400 °С до 1300 °С). Ця тенденція підтверджується еспериментальними даними. Тому, для підтримки регламентованих температурних режимів у зоні машини швидкість переміщення візків при значенні 1,85 м/хв. є найбільш ефективною для ведення технологічного процесу випалювання окатишів у високотемпературній зоні. Графік впливу швидкості переміщення візків КС на температуру теплоносія за технологічними зонами ВМКТ при проведенні експерименту на діючому обладнанні машини показав, що перехід від однієї зони до іншої має коливальний характер.

Результати дослідження впливу швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки на температуру теплоносія за технологічними зонами випалювальної машини конвеєрного типу при моделюванні показують, що у зонах сушіння, попереднього нагрівання, випалювання, рекуперації і охолодження температури теплоносіїв газоповітряних потоків прямо пропорційно зміні швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки, а при проведенні експериментальних досліджень в умовах експлуатації автоматизованої системи керування швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки у цих технологічних зонах температура теплоносіїв газоповітряних потоків змінюється непропорційно. Отже, дотримання максимального значення висоти шару окатишів у 390 мм дозволяє зменшити витрати природного газу на 1,1 м³/т окатишів (експеримент 4) на відміну від регламентованого середнього значення висоти шару (350 мм) (експеримент 2) (табл. 4.1). В експерименті 2 при низькому значенні швидкості візків КС та максимальному вмісту вологи спостерігаються значні витрати палива, тому можна стверджувати, що середнє значення швидкості має бути більшим ніж 1,85 м/хв. при вологості в 10 % в окатишах для запобігання перевитрати палива.

Аналіз отриманих даних показує, що зменшення питомої витрати палива для високотемпературних зон ВМКТ можливе за умови дотримання максимального значення висоти окатишів, яке регламентоване, вмісту вологи в сирих окатишах від 8 до 9,5 % та середньої швидкості візків КС. Економічна

ефективність розробленої системи може заощадити природного палива від 0,5 до 1,1 м³/т окатишів.

Висновки до розділу 4

Внаслідок розробки й впровадження у виробництво системи автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу з використанням технології віртуальних пристроїв, для побудови яких використано програмне середовище графічного програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) компанії National Instruments, встановлено наступне:

– система керування технологічними зонами реалізується як централізована система керування, що формує уставки й дискретні команди для локальних систем керування окремими взаємопов'язаними технологічними зонами, що беруть участь у керуванні процесом термічного обпалювання залізородних окатишів;

– для забезпечення регламентних значень температури у взаємопов'язаних технологічних зонах раціональним науково-технічним рішенням є керування по експоненціальному закону димотягами теплоносіїв газоповітряних потоків й атмосферного повітря вентиляторами по трубопроводам у технологічні зони випалювальної конвеєрної машини при переміщенні шару окатишів на візках конвеєрної стрічки вздовж зон при швидкості 1,85 м/хв., яка є ефективною для забезпечення регламентних значень температурних режимів у цих зонах при обпаленні окатишів;

– для раціонального користування енергетичними ресурсами за рахунок регулювання швидкості подачі використаного теплоносія газоповітряних потоків при використанні технології віртуальних пристроїв комплекс технічних засобів складається із: датчиків висоти, маси, температури теплоносіїв обліку електроенергії і природного газу, блоків управління з контролером нечіткої логіки, регулюючими органами й перетворювачами частоти;

– для перевірки коректності даних, достатності вибору кількості вхідних і вихідних параметрів та змінення їхніх діапазонів, що потребують системи керування взаємопов'язаними технологічними зонами, які мають регулятори нечіткої логіки, уточнені алгоритми, програмне забезпечення й схемо-технічні рішення, що забезпечує перевірку та обчислення вхідних і вихідних значень кожної технологічної зони за нечіткими правилами, перевірено працездатність програмного забезпечення, яке написано на мові програмування C, що описує декларування функцій, типів, макросів, локальних та глобальних змінних, функції оцінки наслідків правил, функції тестування, функції обчислення вихідних значень технологічних зон за нечіткими правилами;

– для апроксимації динаміки термічного процесу оброблення окатишів у технологічних зонах машин конвеєрного типу на основі вирішення систем нечітких функцій і принципу параметричної ідентифікації в програмне забезпечення системи керування термічним процесом оброблення окатишів додатково введено віртуальну модель машини зі схемою автоматизації, виконану в програмному середовищі LabVIEW;

– промислова експлуатація автоматизованої системи керування взаємопов'язаними технологічними зонами випалювальної конвеєрної машини підтвердила зниження електроспоживання на 5,73 %, а витрати природного газу до 1,1 м³/т із забезпеченням регламентних режимів роботи технологічних зон.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі дано вирішення актуальної задачі підвищення ефективності автоматизованого керування процесами термічного оброблення залізорудних окатишів на випалювальній машині конвеєрного типу шляхом розробки моделей та методів керування на основі методології нечіткої логіки. Інтегрування розробленої автоматизованої системи керування з нечіткою логікою в металургійний комплекс дозволяє стабілізувати термічне оброблення залізорудних окатишів шляхом регулювання температури газоповітряних потоків у кожній технологічній зоні з керованими регуляторами з нечіткою логікою, забезпечуючи усунення локального перегріву або недогріву шару окатишів, що забезпечує підвищення якості термічного оброблення, знизити споживання електроенергії, що припадає на роботу вентиляторів та димотягів, та витрати природного газу, що спалюється для підтримання температурного режиму у високотемпературних зонах випалювальної машини конвеєрного типу.

Наукові положення й науково-технічні рішення з керування взаємозалежними системами технологічних зон, що забезпечують керування процесом термічного оброблення залізорудних окатишів на випалювальних машинах конвеєрного типу підтверджені експлуатацією відповідної системи керування, впровадженої на ФОГ ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбіна» і підприємстві АТ «НВАО «ВНДІкомпресормаш».

Отримано такі наукові результати:

1) аналіз стану автоматизації процесу випалювання окатишів показав, що існуючі САК в цілому не забезпечують регламентні режими обробки окатишів у технологічних зонах з урахуванням значень параметрів взаємопов'язаних з ними зонами;

2) на основі аналізу експериментальних даних виконано дослідження моделей та методів оперативної ідентифікації процесів термічної обробки окатишів, в результаті якого обґрунтовано перспективність використання математичних моделей з нечіткою логікою;

3) розроблено концепцію автоматизованого керування процесом термічного оброблення окатишів, згідно до якої здійснюється періодична ідентифікація процесів температурної обробки окатишів в окремих технологічних зонах і на основі нечітких моделей виконується підвищення енергоефективності технологічного процесу в режимі реального часу, що підвищує точність дотримання регламентних значень параметрів технологічного процесу оброблення окатишів та збільшує продуктивність машини за рахунок зменшення долі некондиційних окатишів.

4) підтверджено умови, за яких головною проблемою синтезу систем управління технологічними процесами у теорії управління термічного оброблення окатишів на випалюваних машинах конвеєрного типу є складність математичного опису фізико-механічних, теплових і хімічних процесів, параметри яких часто неточно відомі та змінюються з часом, тому для вирішення цієї проблеми використана нелінійна багатомірна комплексна математична модель із застосуванням логічних рівнянь нечіткої логіки;

5) удосконалено процес керування термічним обробленням окатишів на конвеєрній машині, який характеризується наявністю складних зв'язків між технологічними зонами, просторовим розподілом параметрів, багатомірністю, нелінійністю, нестационарністю, наявністю значних запізнь у каналах керування, шляхом використання неповної і нечіткої інформації про параметри окатишів і взаємопов'язаних технологічних зон при неможливості безперервного контролю деяких технологічних показників, оскільки існуючі САК загалом не достатньо забезпечують дотримання регламентного температурного режиму обробки окатишів на машинах конвеєрного типу;

6) уперше обґрунтовано підхід керування технологічною зоною шляхом застосування нечіткої і неповної інформації про її стан, який полягає в підтримці температурного й газоповітряного режимів, що на відміну від відомих законів дозволяє запобігти некондиційному обробленню окатишів і врахувати вплив на параметри взаємопов'язаних технологічних зон;

7) набув подальшого розвитку науковий підхід автоматичного керування термічним процесом оброблення окатишів на конвеєрних машинах у

взаємопов'язаних технологічних зонах, який впливає на результати протікання термічного процесу в технологічних зонах і машини загалом, що забезпечує регламентні параметри високотемпературних і низькотемпературних технологічних зон, враховуючи фізико-хімічні властивості окатишів, швидкість переміщення візків конвеєрної стрічки;

8) на основі підтримання регламентних параметрів технологічних зон, середньої швидкості переміщення візків конвеєрної стрічки і близького до максимуму значення висоти шару окатишів за рахунок вдосконалення керування процесу термічного оброблення окатишів при використанні нечітких контролерів з нечіткою логікою в кожній технологічній зоні дає можливість знизити використання електроенергії на 5,73 кВт·год/т і заощадити природного палива від 0,5 м³ до 1,1 м³ на тону обпалених окатишів.

Цільова спрямованість дослідження дозволила одержати такі практичні результати:

1) для фабрики огрудкування ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» створено систему автоматизації процесу керування термічним обробленням окатишів на машині конвеєрного типу з використанням нечіткої логіки і технології віртуальних пристроїв, для побудови яких використано програмне середовище графічного програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) компанії National Instruments, що дозволяє покращити теплообмін і газодинаміку в шарі залізородних окатишів і раціонально використовувати перерозподіл газоповітряних потоків між технологічними зонами;

2) розроблені моделі та алгоритми керування на основі нечіткої логіки дозволили виконати синтез системи автоматичного керування термічними процесами обробки окатишів у взаємопов'язаних технологічних зонах випалювальної машини конвеєрного типу, що мають низьку чутливість до параметричних збурень;

3) методики, алгоритми та програмне забезпечення з дисертації використовуються в навчальному процесі в Криворізькому національному університеті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савельев С. Г., Губин Г. В., Стойкова Я. А. Современное состояние и перспективы развития производства железорудных окатышей. *Сталь*. 2013. №8. С. 2–7.
2. Украинская металлургия в 2030: что ждет отрасль через 10 лет... Режим доступа до ресурсу: <http://uaprom.info/article/8217-ukrainskaya-metallurgiya-2030-zhdet-otrasl-cherez-10-let.html>
3. Ефименко Г. Г., Игнатов Н. В., Ковалев Д. А. Состояние, проблемы, перспективы железорудной промышленности и производства окускованного металлургического сырья. *Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти: наукові праці всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчю з дня народження Георгія Григоровича Єфіменка*. 4–5 квітня 2017 р. Дніпро, 2017. С. 14–29.
4. Гончаров Ю. Г., Дримбо А. В., Ищенко А. Д. Автоматизация процессов окускования железных руд. М.: Металлургия, 1983. 190 с.
5. Бокав В. И., Борисов В. В., Дли М. И., Мешалкин В. П. Многокритериальная оптимизация энергоэффективности технологических процессов термической подготовки сырья. *Теоретические основы химической технологии*. 2015. №6. С. 842–846.
6. Юрьев Б. П., Брук Л. Б., Спирин Н. А. и др. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей: научная монография / Министерство образования и науки Российской Федерации, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий, Нижнетагильский технологический институт (филиал). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – 310 с.
7. Технологическая инструкция по обжигу железорудных окатышей на обжиговой машине ОК-1-324/336. Система качества. ДСТУ ISO 9001-2001.СТП ЦГОК-11-2010. – 19 с.

8. Буткарев А. А. Исследование и оптимизация теплотехнических схем обжиговых конвейерных машин и режимов термообработки железорудных окатышей : автореф. дис. ... доктора техн. наук : 05.16.02. Екатеринбург. 2012. 46 с.
9. 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.
10. Жежера Н. И., Сабанчин В. Р. Туннельная печь для обжига керамических изделий как объект автоматического управления по разрежению продуктов горения // Интернет-журнал «Науковедение» 2014. №6. Режим доступа до ресурсу: <http://naukovedenie.ru/PDF/166TVN614.pdf>.
11. Пирматов Д. С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. Воронеж, 2010. С. 88–89.
12. Rudobashta S. P. (2010) Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 4, P. 753–759.
13. 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.
14. Редько А. А., Компан А. И., Редько А. Ф., Голышев А. М. Когенерационная энергетическая установка в тепловой схеме обжиговой машины железорудных окатышей. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2013. №3. С. 18–24.
15. Pomerleau D., Desbiens A., Hodouin D. (2013) A first principle simulator of an iron oxide pellet induration furnace – an application to optimal. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 44. P. 571–582.
16. Абзалов В. М., Горбачев В. А., Евстюгин С. Н., Клейн В. И., Леонтьев Л. И., Юрьев Б.П. Физико-химические и теплотехнические основы

производства железорудных окатышей / Под ред. академика Л. И. Леонтьева. Екатеринбург, 2015. 304 с.

17. Варичев А. В., Угаров А. А., Эфендиев Н. Т., Кретов С. И., Козуб А. В., Пузаков П. В., Солодухин А. А., Лавриненко А. А., Кузнецов А. Л., Брагин В. В., Груздев А. И. Разработка и ввод в эксплуатацию современной обжиговой машины мок-1-592 в ПАО «Михайловский ГОК». *Горная Промышленность*. 2017. №3. С. 16–20.

18. Варичев А. В., Угаров А. А., Эфендиев Н. Т. и др. Инновационные решения в производстве железорудного сырья на Михайловском ГОКе. *Обобщение полезных ископаемых*. ФТПРПИ №5. 2017. С. 141–153.

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

20. Про затвердження Порядку розрахунку нормативних витрат електроенергії підприємствами теплоенергетики при виробництві, транспортуванні та постачанні (розподілі) теплової енергії. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 23 лютого 2009 р. за №172/16188. Режим доступу до ресурсу: [www https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0172-09#Text](http://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0172-09#Text).

21. Буткарев А. А., Ащеулов В. Н., Жомирук П. А. и др. Оптимизация работы тракта эксгаустера обжиговой машины ОК-108 АО «ССГПО» для увеличения производства окатышей. *Сталь*. 2015. №3. С. 12–15.

22. Купин А. И., Рубан С. А. Исследование инверсных моделей нейроконтроллера для систем интерактуального управления ТП горнорудных предприятий. *Вісник Криворізького технічного університету*. 2007. Вип. 18. С. 157–161.

23. Рубан С. А., Лобов В. Й. Использование нечетких регуляторов для автоматизации технологического процесса обжига окатышей на конвейерных обжиговых машинах. *Разработка рудных месторождений*. 2007. Вып. 91. С. 188–193.

24. Кривоносов В. А., Пирматов Д. С. Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2010. №5. С. 128–132.
25. Лобов В. Й., Котляр М. О. Моделювання розподілу температур у шарі залізородних окатишів газоповітряної камери в конвеєрних печах фабрики огрудкування. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. №2. С. 109–117.
26. Игонин В. И., Стратунов О. В. Особенности первичной структурной идентификации энтропийной модели электротеплогидравлического типа. *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. №3. С. 428–438.
27. Савельев С. Г., Стойкова Я. А. Математическое моделирование в исследовании процессов производства окускованного железородного сырья. *Гірничий вісник : наук.-техн. зб.* 2012. Вип. 95 (1). С. 99–104.
28. Боковиков Б. А., Брагин В. В., Малкин В. М. и др. Математическая модель обжиговой конвейерной машины как инструмент для оптимизации тепловой схемы агрегата. *Сталь*. 2010. №9. С. 84–87.
29. Лисиенко В. Г., Дюгай П. А., Волков В. В. и др. Моделирование и автоматизированное управление : учебное пособие / под ред. В. Г. Лисиенко. Новоуральск : ГОУ ВПО НГТИ, 2009. 179 с.
30. Иванчина Э. Д., Чеканцев Н. В., Чузлов В. А., Смольянова Ю. А. Оптимизация состава углеводородного сырья в процессе изомеризации пентан-гексановой фракции с использованием комплексной математической модели Nysys-izomer. *Известия ТПУ*. 2012. №3. С. 130–132.
31. Бойко А. В., Усатый А. П. Комплексная математическая модель процессов в турбине с регулируемыми отборами пара. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2016. №8. С. 28–36.
32. Демидова Г. Л., Лукичев Д. В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. СПб : Университет ИТМО, 2017. 81 с.

33. Шайхутдинов Д. В., Дубров В. И., Леухин Р. И., Наракидзе Н. Д., Щучкин Д. А., Январев С. Г. К выбору типа регулятора для решения задачи управления электромагнитным приводом. *Фундаментальные исследования*. 2015. №10 (часть 1). С. 107–116.

34. Веремей Е. И., Еремеев В. В. Введение в задачи управления на основе предсказаний. Всероссийская научная конференция «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB». М., 2004. С. 98–115.

35. Сотникова М. В. Вопросы устойчивости движений в системах управления с прогнозирующими моделями // Вестник ВГТУ. Воронеж, 2012. №1. С. 72–79.

36. Ковалёв Д. А., Ванюкова Н. Д., Бойко М. Н. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей. *Системні технології : регіон. міжвуз. зб. наук. праць*. Дніпропетровськ : Системні технології, 2008. №1. С. 93–102.

37. Бойко М. М. Вдосконалення технологічного режиму обпалу залізорудних окатишів з метою підвищення їх якості та зниження енерговитрат : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.02. Дніпропетровськ, 2008. 147 с.

38. Боковиков Б. А., Брагин В. В., Евстюгин С. Н. и др. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование). Екатеринбург : Уральский центр академического обслуживания, 2013. 200 с.

39. Butkarev A. A. (2011) Improving the control of pellet heat treatment in conveyer roasting machines. *Steel in Translation*. 41, P. 395–399.

40. Лобов В. Й., Єфіменко Л. І., Тиханський М. П., Рубан С. А. Автоматизовані системи керування процесами термічної обробки окатишів на конвеєрній випалювальній машині. Кривий Ріг : Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2015. 236 с.

41. Рубан С. А., Лобов В. Й. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням

прогнозуючих ANFIS-моделей. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2008. С. 69–74.

42. Рубан С. А. Автоматизація процесу керування термічною обробкою залізородних окатишів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07.Кривий Ріг. 2011.

43. Barati M. (2008) Dynamic simulation of pellet induration process in straight – grate system / *International Journal of Mineral Processing*. 89, P. 30–39.

44. Panic B., Janiszewski K. (2014) Model investigations 3D of gas-powder two phase flow in descending packed bed in metallurgical shaft furnaces / *Metalurgija*, 53, P. 331–334.

45. Dai C., Lei Z., Li Q., Chen B. (2012) Pressure drop and mass transfer study in structured catalytic packings / *Separation and Purification Technology*, 98, P. 78–87.

46. Liu H., Jonsson L. T. I., Olofsson U., Jönsson P. G. (2016) A Simulation Study of Particles Generated from Pellet Wear Contacts during a Laboratory Test. *ISIJ International*, 56, P. 1910–1919.

47. Guo L., Morita K., Tobita Y. (2012) Numerical Simulation of Three-Phase Flows With Rich Solid Particles by Coupling Multi-Fluid Model With Discrete Element Method. 20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME 2012 Power Conference, 4, P. 371–382

48. 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.

49. Лобов В. Й., Котляр М. О. Дослідження термічної обробки шара окатишів у газоповітряній камері обпалювальної машини конвеєрного типу. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 3. С. 131–136.

50. Lobov V., Lobova K., Koltiar M. (2015) Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / *Metallurgical and Mining Industry*, 4, P. 34–38.

51. Чумак А. С., Данилова М. Г. Дискретная система нечеткого управления электроприводом обжиговой машины. *Вестник ВГТУ*. 2012. №9. С. 95–97.
52. Матвеев А. И. Исследование распределения тяжелых фракций в колеблющейся сыпучей бреде. *Наука и образование*. 2016. №2 (82). С. 21–26.
53. Кривонос В. А., Пирматов Д. С. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины. *Инженерный вестник Дона*. 2013. 7 с.
54. Юсфин Ю. С., Малышева Т. Я., Плотников С. В. Критерии качества железорудных окатышей из концентратов руд магнетитовых кварцитов. *Известия высших учебных заведений. Чёрная металлургия*. 2009. №5. С. 7–10.
55. Марков А. В. Применение UML-диаграмм и сетей Петри для проектирования ПО технологического процесса обжига окатышей. *Сборник научных трудов НГТУ*. 2014. №3. С. 99–118.
56. Спосіб зміцнення випалених залізорудних котунів на випалювальній машині: пат. 128679 Україна: МПК (2006) C22B 1/24 (2006.01) C22B 1/02 (2006.01); заявл. 13.10.2017; опубл. 10.10.2018, Бюл. №19.
57. Poddubny B., Kupin A., Muzyka I., Savytskyi O., Ruban S., Kharlamenko V. (2017) Information Technology for Processing of Industrial Big Data with Distributed Infrastructure on the Basis of Smart Agents and Parallel Algorithms. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 1, P. 25–28.
58. 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.
59. Патент109810 Україна, МПК (2016.01) C22B 1/02 (2006.01). Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / Лобов В. Й., Лобова К. В., Кривенко Т. А.; заявник і власник патенту Криворізький національний університет. – №201601988, заявл. 29.02.2016; опубл. 12.09.2016, Бюл. №17.

60. Патент 134140 Україна, МПК С22В 1/02 (2006.01). Спосіб керування процесом випалювання котунів на конвеєрній машині / Лобов В. Й., Жосан А. А., Лобова К. В., Кірсань Є. С.; заявник і власник патенту Криворізький національний університет. – №201803141, заявл. 26.03.2018; опубл. 10.05.2019, Бюл. №9.

61. Андриюшкевич С. К., Ковалёв С. П. Интеллектуальный мониторинг распределенных технологических объектов с использованием информационных моделей состояния. *Известия ТПУ*. 2010. №5. С. 35–39.

62. Ковалев Д. А., Ванюкова Н. Д., Бойко М. Н. Разработка динамической математической модели для управления обжигом углеродсодержащих железорудных окатышей. *Систем. технології*. 2008. №1. С. 93–102.

63. Бойко М. Н., Ковалев Д. А., Ванюкова Н. Д. Комплексный расчет основных параметров и качества углеродсодержащих окатышей при обжиге на конвейерной машине. *Систем. технології*. 2008. №3, т.2. С. 3–8.

64. Шелудько Е. І. Розвиток промислового інжинірингу як ключова умова комплексної модернізації промислових підприємств. *Економічний вісник університету*. 2017. №34. С. 112–122.

65. Малышева Т. Я., Юсфин Ю. С., Плотников С. В. Технологические аспекты производства окатышей из магнетитовых руд. *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия*. 2011. №9. С. 3–5.

66. 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.

67. Бокав В. И., Борисов В. В., Дли М. И. Подход к исследованию теплопроводности нечеткими численными методами в условиях неопределенности теплофизических характеристик. *Системы управления, связи и безопасности*. 2017. №3. С. 73–83.

68. 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.

69. 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.

70. Рубан С. А., Лобов В. И. Комп'ютерне моделювання алгоритму оптимального керування температурним режимом випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей. *Вісник КТУ: зб. наук. праць*. Кривий Ріг. 2008. №21. С. 150.

71. Мных А. С. К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. №7. С. 36–42.

72. Буткарев А. П. Математические модели управления процессом производства окатышей на конвейерной машине. *Сталь*. 2000. №3. С. 10–13.

73. Lobova K. (2015) Pellets temperature distribution on a conveyor roasting machine. *Metallurgical and Mining Industry*, 8, P. 12–15.

74. Спирин Н. А., Лавров В. В., Рыболовлев В. Ю. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП. Екатеринбург : ООО «УИПЦ». 2014. 558 с.

75. Полковникова Н. А., Курейчик В. М. Разработка модели экспертной системы на основе нечёткой логики. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2014. №1. С. 83–92.

76. Пирматов Д. С. Автоматизация процесса обжига окатышей на основе наблюдателя состояния : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Орел, 2013. 16 с.

77. Брагин В. В., Боковиков Б. А., Найдич М. И., Груздев А. И., Швыдкий В. С. О взаимосвязи производительности обжиговой машины и удельного расхода топлива. *Сталь*. 2014. №8. С. 38–42.

78. Сарапулов О. А. Комплексная математическая модель электро–механо–температурной системы участка охлаждения стана 150 ОАО «Белорецкий МК». *ЭС и К.* 2010. №1. С. 6–9.

79. Гончаров К. А., Денисов И. А. Комплексная математическая модель функциональной эффективности грузоподъемного крана. *Научно-технический вестник Брянского государственного университета.* 2017. №4. С. 389–399.

80. Яловая Е. Н., Болотов В. Ю. Разработка математической модели плавления металлошихты в дуговой сталеплавильной печи при исследовании влияния режимов работы энерготехнологического оборудования на продолжительность плавки. *Математическое моделирование.* 2007. №3. С. 211–216.

81. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. М74 Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2010. 260 с.

82. Буткарев А. А., Буткарев А. П., Лисиенко В. Г., Майзель Г. М. Математическая модель теплообмена в плотном слое и ее использование для оптимизации конструктивных и технологических параметров процессов в термообработке. *Материалы международной конференции.* Екатеринбург : УГТУ, 1998. С. 144–150.

83. Бураков М. В., Коновалов А. С. Синтез нечетких логических регуляторов. *Информационно–управляющие системы.* 2011. №1. С. 22–27.

84. Лобов В. Й., Лобова К. В. Нечітке управління режимом термічної обробки залізородних котунів на конвеєрній машині. *Вісник приазовського державного технічного університету.* 2017. №34. С. 182–191.

85. 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.

86. Бажанов А. Г., Магергут В. З. Нечеткая диаграмма поведения узла нагрузки главного привода цементной печи. *Известия ТПУ*. 2012. №5. С. 163–166.

87. Козак Ю. А., Михайленко В. С. Нечеткая адаптивная система управления обжигом Клинкера во вращающейся печи. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград : КНТУ, 2012. №17. С. 257–264.

88. Ващенко Р. А. Советующая система управления цементной печью на основе нечетких диаграмм поведения ее узлов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06. Белгород, 2018. 17 с.

89. Zade L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1, 2, 3 // *Information Sciences*, n. 8 pp.199–249, pp.301–357; n. 9 pp. 43–80.

90. Пивкин В. Я., Бакулин Е. П., Кореньков Д. И. Нечеткие множества в системах управления. – Режим доступа до ресурсу: http://idisys.iae.nsk.su/fuzzy_book/

91. Усков А. А. Системы с нечеткими моделями объектов управления : монография. Смоленск : СФРУК, 2013. 153 с.

92. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб. : БХВ Петербург, 2005. 736 с.

93. Арсеньев Г. Н., Шалыгин А. А. Математическое моделирование нечётких регуляторов на основе MATLAB. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2011. Т.9. №5. С. 26–37.

94. Malleshham G., Rajani A. Automatic tuning of PID controller using fuzzy logic // 8th International Conference on Development and application system, Suceava (Romania), – 2006. Pp. 120–127.

95. Ramot D., Friedman M., Langholz G., Kandel A. Complex fuzzy logic // *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 2003, vol . 11, issue 4, pp. 450–461.

96. Халафян А. А., Боровиков В. П., Калайдина Г. В. Теория вероятностей, математическая статистика и анализ данных : Основы теории и практика на компьютере : изд-во URSS, 2017. 320 с.
97. Installation unit NHS-M 150t (C) [Electronic resource] – Mode of Access: – Режим доступа до ресурсу: <https://keli.com.ua/product/uzel-vstrojki-nhs-m-150t-c/>
98. Датчик тиску [Електронний ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://wiki.tntu.edu.ua/%D0%94%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA_%D1%82%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%83
99. Пушкар М. С., Проценко С.М. Проектування систем автоматизації [Текст] : навч. посіб. Д.: Національний гірничий університет. 2013. 268 с.
100. Motorola MC143150 MC143120 Neuron Chip Processors. – Режим доступа до ресурсу: https://archive.org/details/bitsavers_motoroladaaMC143150MC143120NeuronChipProcessors_12118346/page/n1/mode/2up.
101. Чернов В. Г. Нечеткие контроллеры. Основы теории и построения : Учеб. пособие по курсу «Интеллектуальные системы управления» / Владим. гос. ун-т., 2003. 148 с.
102. Регистратор многоканальный технологический РМТ 69. Руководство по эксплуатации НКГЖ.411124.003-10РЭ.
103. Индикатор микропроцессорный ИТМ-11 ИТМ-11В. Руководство по эксплуатации ПРМК.421457.401 РЭ. Украина, г. Ивано-Франковск. 2012.
104. Портативный лазерный спектрометр SciAps Laser-Z500. URL: Режим доступа до ресурсу: https://www.souz-pribor.ru/catalog/nerazrush_control/lazernye-analizatory-metallov/laser-z-500/.
105. Тепловизор FLIR GF309. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.geo-ndt.ru/pribor-1485-teplovizor-flir-gf309.htm>.
106. Узел встройки NHS-M 150t (C). – Режим доступа до ресурсу: <https://keli.com.ua/product/uzel-vstrojki-nhs-m-4-7t-s/>.
107. Трэвис Д., Кринг Д. LabVIEW для всех. 4-е изд., перераб. и доп. М. : ДМК Пресс, 2011. 905 с.

108. Пейч Л. И., Точилин Д. А., Подлак Б. П. LabVIEW для новичков и специалистов. М. : Горячая линия Телеком, 2004. 383 с.
109. Примеры программ с дополнениями к имеющимся функциям LabVIEW. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.labview.narod.ru>
110. Магда Ю. С. LabVIEW : практический курс для инженеров и разработчиков. М. : ДМК Пресс, 2012. 208 с.
111. Вопросы программирования. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.labviewportal.eu>
112. Блюм П. LabVIEW. Стиль программирования. М. : ДМК Пресс, 2008. 400 с.
113. Суранов А. Я., Задоя А. Я. LabVIEW 8.20 Справочник по функциям. М. : ДМК Пресс, 2007. 536 с.
114. Bitter Richard, Mohiuddin Taqi, Nawrocki Matthew R. (2006) LabVIEW: advanced programming techniques. CRC Pres, 520 p.
115. Лобов В. Й., Лобова К. В., Митрофанов О. В. Технологія віртуальних пристроїв для автоматизації виробничих процесів : навчальний посібник. Кривий Ріг. 2019. 326 с.
116. 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.

Додаток А

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 залізородних 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.

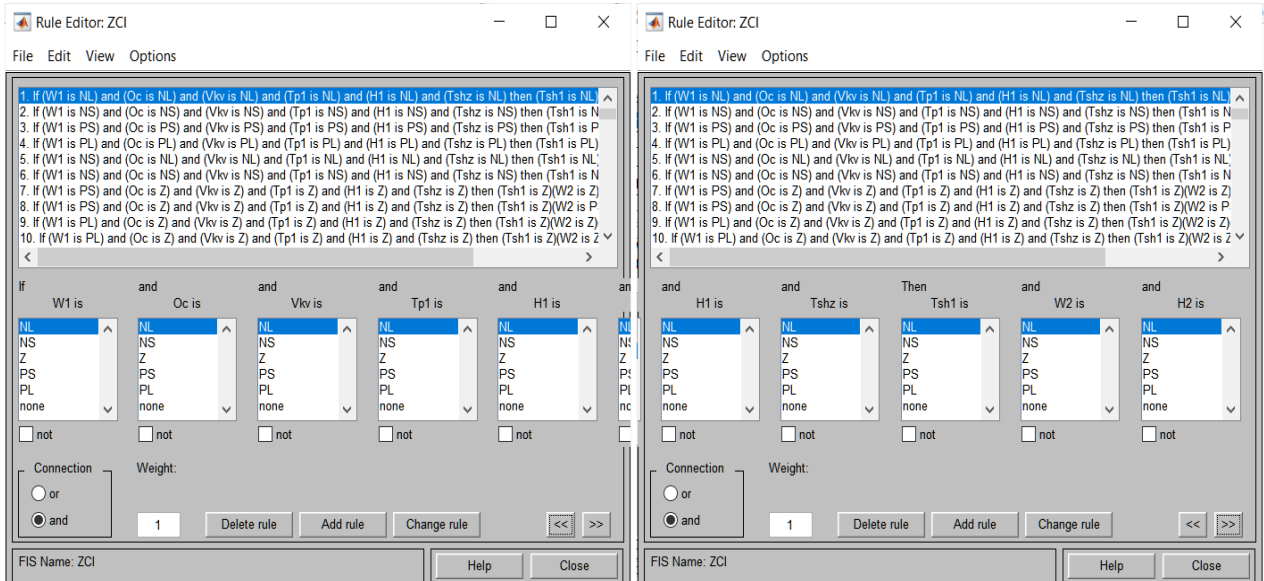
9. Митрофанов О.В. Керування термічним процесом оброблення залізорудних обкотишів у зоні випалювання машини конвеєрного типу. *Научные исследования: парадигма инновационного развития: збірник тез доповідей Міжнародної наукової конференції*. 28 грудня 2020 р. Прага, Чехія, 2020. С. 102 – 108.

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.

Додаток Б

Равила нечіткої логіки для технологічних зон машини



а)

б)

Рис. Б.1. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої вологості й рівня висоти на виході першої зони сушіння:

а – початок і б – продовження

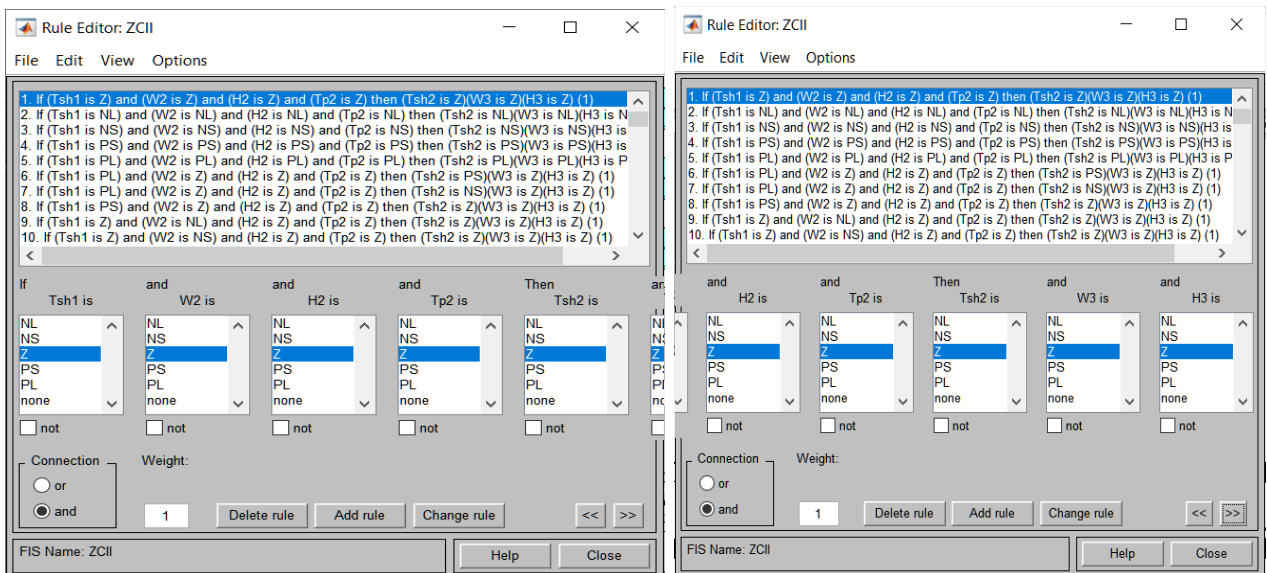


Рис. Б.2. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої вологості й рівня висоти на виході другої зони сушіння:

а – початок і б – продовження

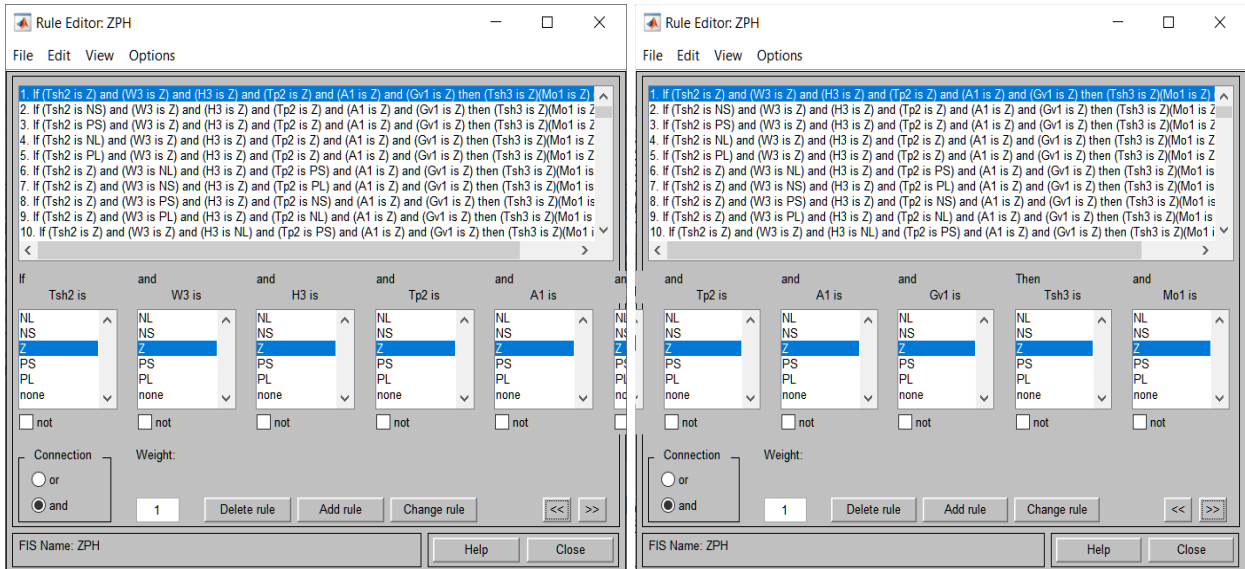


Рис. Б.3. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої вологості й рівня висоти на виході зони попереднього нагрівання: а – початок і б – продовження

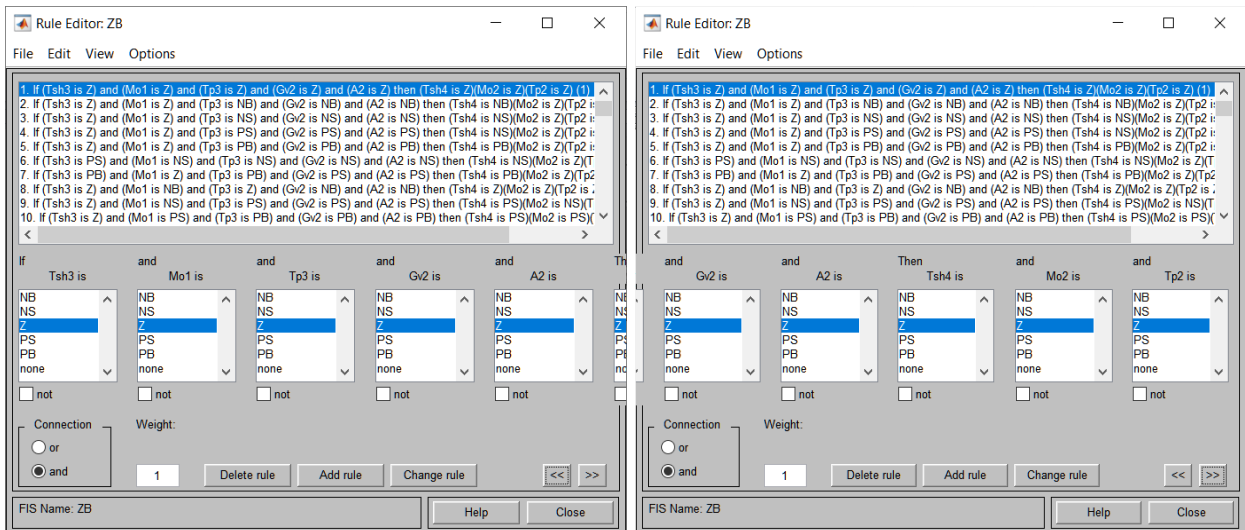


Рис. Б.4. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої маси і температури теплоносіїв на виході зони випалювання: а – початок і б – продовження

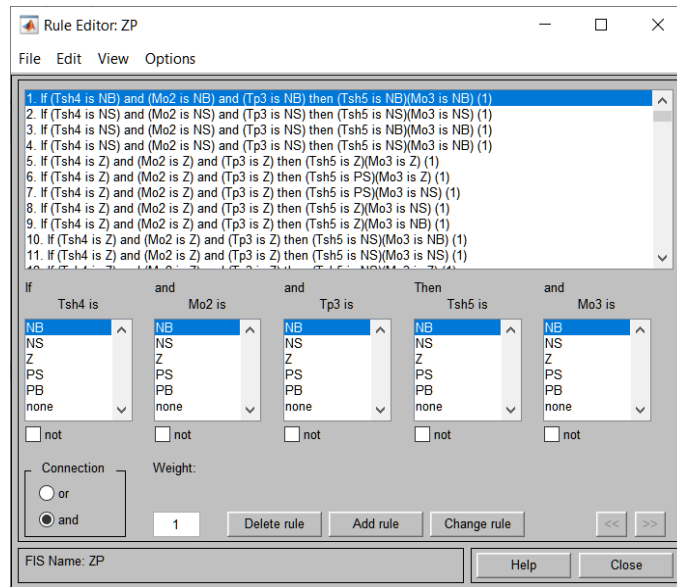


Рис. Б.5. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої маси на візках і температури теплоносіїв на виході зони рекуперації

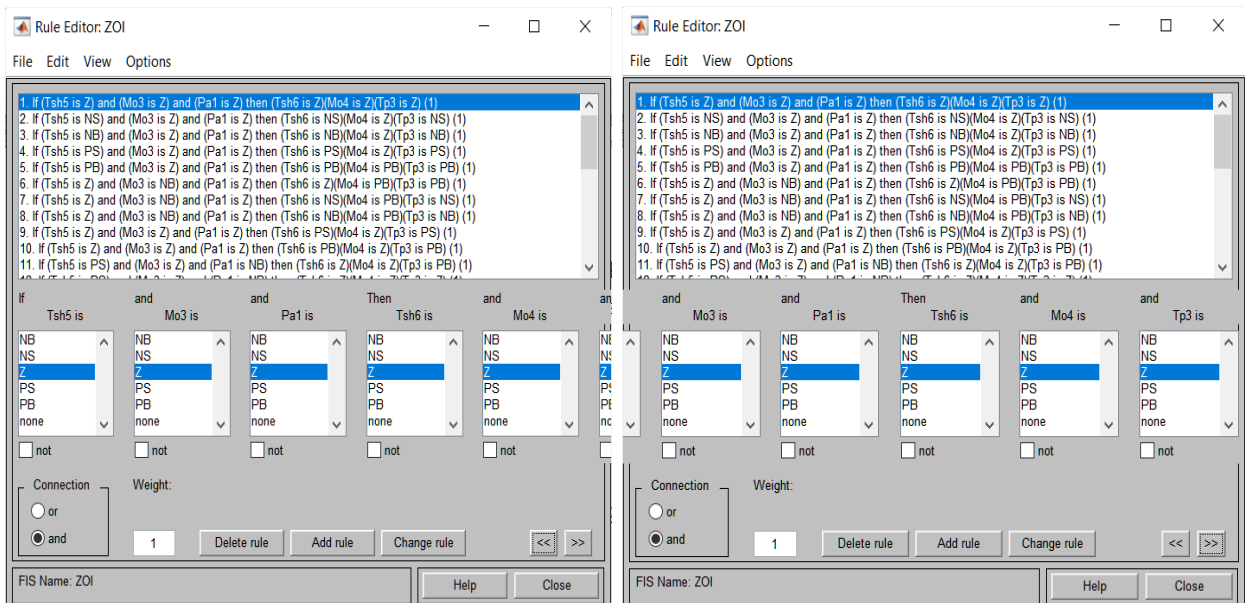


Рис. Б.6. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої маси на візках і температури теплоносіїв на виході першої зони охолодження: а – початок і б – продовження

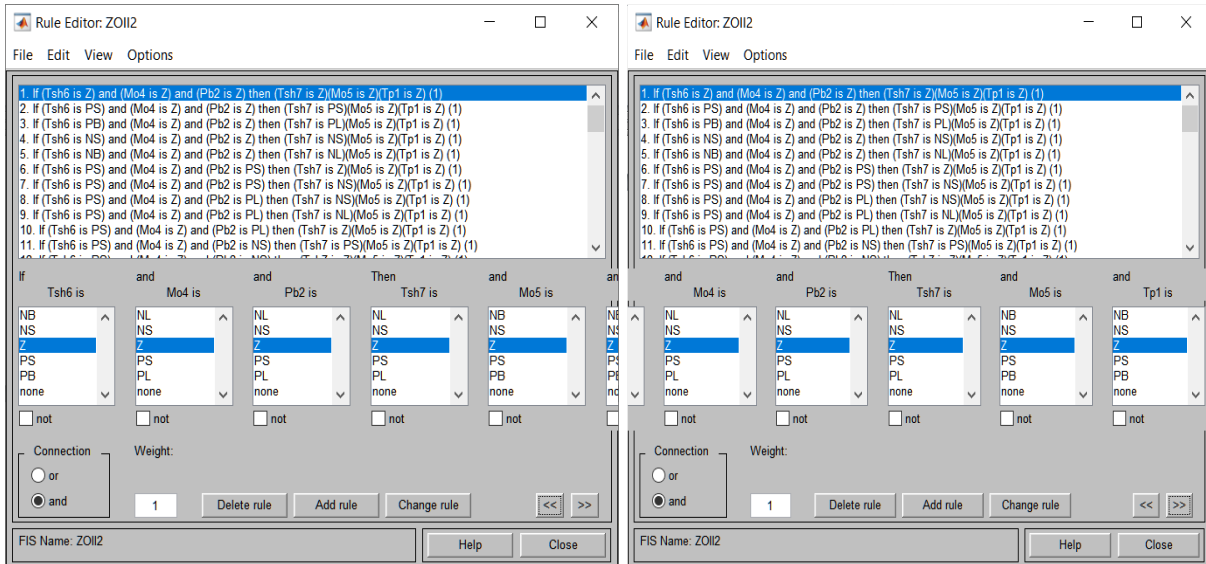


Рис. Б.7. База правил нечіткої логіки для визначення температури верхнього шару окатишів, їхньої маси на візках і температури теплоносіїв на виході другої зони охолодження: а – початок і б – продовження

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P3, даПа	192	200	202	201	199	202	202	198	208	213	203	201	188	216
t2, °C	383	373	383	380	375	369	381	379	363	366	371	382	378	311
I2, А	65	66	67	66	66	66	66	66	67	68	67	67	65	68
P4, даПа	-58	-63	-65	-65	-66	-64	-62	-64	-64	-63	-65	-65	-65	-65
Др. 2.1, %	19.5	8.7	8.7	8.7	8.7	8.6	8.7	8.7	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6
t3, °C	251	248	254	254	242	240	249	249	237	240	238	260	252	252
P5, даПа	192	191	193	191	188	191	191	188	197	202	193	190	178	207
K7, %	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4
t3, C ⁰	452	442	457	454	443	434	455	454	431	436	442	459	423	365
P6, даПа	1.6	2.0	1.8	1.9	1.8	1.7	1.8	1.9	2.1	2.1	2.3	2.0	1.4	2.3
t4, °C	963	961	957	964	961	952	961	961	946	952	946	944	955	934
t5, °C	1007	999	999	1013	1010	1001	1010	1009	993	1002	995	995	1019	978
P7, даПа	-0.4	-0.3	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.7	-0.3	-0.1	-0.2	-0.4	-0.7	-1.0	-0.1
Пальник 2, °C	531	533	526	531	523	521	527	526	525	529	531	515	517	507
Пальник 4, °C	555	557	548	553	545	541	549	548	543	549	552	538	540	521

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Пальник 6, °С	898	899	887	894	891	885	894	893	887	895	892	877	887	873
Пальник 8, °С	983	981	978	979	977	978	979	978	982	983	980	976	976	970
Пальник 10, °С	1097	1091	1088	1089	1090	1086	1089	1088	1091	1091	1092	1095	1094	1081
Пальник 12, °С	1198	1192	1190	1191	1192	1187	1192	1191	1189	1190	1191	1192	1196	1177
Пальник 14, °С	1255	1250	1248	1248	1249	1248	1251	1251	1251	1253	1254	1254	1253	1244
Пальник 16, °С	1240	1235	1233	1232	1229	1231	1238	1236	1234	1235	1236	1239	1239	1235
Пальник 18, °С	1247	1242	1239	1241	1241	1237	1246	1247	1236	1239	1242	1239	1250	1235
Пальник 20, °С	1230	1226	1230	1229	1231	1232	1235	1237	1232	1233	1233	1230	1229	1218
Пальник 22, °С	1265	1259	1266	1265	1266	1267	1268	1269	1266	1267	1271	1266	1266	1250
Пальник 24, °С	1272	1271	1277	1275	1269	1273	1276	1274	1273	1274	1278	1276	1272	1262
t ₆ , °С	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19	-19
t ₇ , °С	208	182	196	191	195	187	198	199	168	173	183	205	213	126
t ₈ , С ⁰	46	44	44	44	44	45	44	44	45	45	45	46	45	46
K1, т/год	367	385	364	340	377	359	369	361	369	350	367	354	360	375
K2, т/год	79	68	76	73	74	67	75	76	64	70	69	80	85	81

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P8, даПа	-2	-3	-3	-4	-4	-2	-3	-3	-3	-3	-4	-4	-4	-4
t9, °C	228	225	226	222	222	224	225	224	222	221	220	218	215	211
P9, даПа	-1.7	-1.6	-2.3	-1.3	-1.9	-1.3	-2.0	-1.3	-1.7	-1.2	-1.2	-2.3	-3.3	-1.8
P10, даПа	-0	0	-1	-0	0	-0	-1	-0	-0	0	0	-0	-1	0
P11, даПа	-1.3	-0.5	-1.3	-0.6	-1.0	-0.9	-0.9	-0.6	-0.3	-0.2	0.0	-0.5	-2.2	-0.4
P12, даПа	-7.0	-5.8	-7.1	-6.1	-6.8	-6.6	-6.4	-6.3	-5.3	-5.0	-5.0	-5.3	-7.2	-4.9
P13, даПа	-7.4	-6.1	-7.7	-6.6	-7.1	-6.9	-6.8	-6.8	-5.9	-5.4	-5.1	-5.5	-7.8	-5.2
t10, C°	938	939	943	943	947	945	946	944	945	947	935	932	929	923
P14, даПа	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-3	-3	-2
t11, C°	923	901	905	315	914	906	909	918	873	868	891	907	943	874
P15, даПа	2	3	2	3	2	2	2	2	2	3	3	3	1	2
t12, °C	594	550	558	531	580	550	557	561	534	519	571	590	609	440
t13, °C	230	197	206	207	207	201	220	218	176	163	186	210	248	131
P16, даПа	-29	-26	-25	-30	-27	-29	-23	-25	-31	-27	-27	-24	-16	-22
P0, даПа	612	658	665	683	667	672	684	679	657	647	659	663	651	639

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T1, °C	153	143	140	141	140	142	139	141	144	145	152	157	160	161
T2, °C	154	144	141	142	141	143	140	142	145	146	153	158	161	161
T43, °C	152	141	139	141	139	138	136	139	141	140	147	151	156	162
T4, °C	136	129	126	127	128	126	125	127	127	128	133	137	140	145
T5, °C	114	109	107	108	109	109	108	108	110	110	113	116	117	116
T6, °C	106	102	101	101	103	101	101	102	102	103	106	109	109	111
T7, °C	105	101	100	101	102	100	101	100	102	103	106	108	110	110
T8, °C	88	85	84	85	86	84	85	84	87	87	89	89	91	89
T9, °C	84	81	80	81	82	80	80	80	81	81	83	83	87	82
T10, °C	75	73	72	72	74	72	72	72	72	72	74	74	77	72
T11, °C	91	88	86	86	86	85	85	86	86	86	88	89	93	85
T12, °C	76	76	75	74	75	74	73	74	73	73	74	74	78	76
T13, °C	63	60	60	59	60	61	60	61	59	60	59	60	62	57
T14, °C	77	72	71	71	71	69	69	70	74	74	78	80	96	93
T15, C ⁰	110	94	94	96	87	85	86	35	90	91	93	98	122	118

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
T16, °C	168	139	138	144	135	123	123	133	124	121	131	143	163	190
T17, °C	199	157	167	173	158	139	150	160	142	139	142	160	179	213
T18, °C	227	186	202	208	188	166	183	195	170	171	169	188	204	245
T19, °C	266	238	240	250	239	207	221	243	211	207	211	231	256	303
T20, °C	265	236	238	249	238	205	220	241	209	205	208	228	254	300
T21, °C	178	176	179	179	181	181	182	182	181	181	180	180	180	180
D1, даПа	553	579	583	607	591	588	605	602	575	564	585	586	577	564
D2, даПа	538	584	588	612	596	593	609	607	579	569	589	591	582	569
D3, даПа	532	578	581	606	590	587	603	601	573	562	583	584	576	563
D4, даПа	-70	-71	-72	-71	-70	-71	-73	-68	-71	-70	-74	-74	-73	-73
D5, даПа	-70	-71	-71	-70	-69	-70	-73	-68	-70	-69	-73	-73	-71	-72
D6, даПа	-72	-72	-73	-72	-71	-72	-74	-69	-71	-71	-75	-75	-73	-74
D7, даПа	-71	-72	-72	-71	-70	-71	-74	-69	-71	-71	-74	-74	-72	-74
D8, даПа	-66	-67	-71	-70	-70	-71	-72	-70	-71	-72	-75	-75	-73	-73
D9, даПа	-67	-68	-69	-67	-67	-69	-69	-69	-67	-68	-72	-72	-71	-69

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D10, даПа	-66	-66	-67	-66	-65	-66	-68	-64	-66	-66	-69	-69	-67	-68
D11, даПа	-65	-65	-66	-65	-64	-65	-67	-63	-64	-64	-68	-68	-66	-67
D12, даПа	-65	-66	-66	-65	-64	-65	-68	-63	-65	-65	-68	-68	-66	-67
D13, даПа	-53	-65	-54	-53	-52	-53	-55	-54	-53	-54	-55	-56	-54	-55
D14, даПа	-187	-191	-192	-187	-196	-190	-184	-192	-196	-196	-196	-174	-182	-167
D15, даПа	-208	-209	-208	-204	-209	-210	-204	-215	-215	-216	-211	-192	-194	-187
D16, даПа	-214	-213	-213	-207	-214	-213	-211	-219	-218	-220	-215	-196	-196	-193
D17, даПа	-212	-212	-212	-205	-212	-212	-208	-216	-215	-215	-211	-192	-191	-189
D18, даПа	-212	-218	-214	-207	-213	-215	-210	-220	-219	-220	-215	-196	-199	-192
D19, даПа	-210	-217	-214	-206	-214	-214	-207	-217	-218	-218	-215	-195	-195	-189
D20, даПа	-211	-215	-211	-204	-209	-212	-209	-214	-209	-215	-205	-185	-184	-181
D21, даПа	208	229	218	222	205	218	211	196	222	216	208	205	164	195
D22, даПа	237	251	252	251	269	273	265	253	282	282	271	260	212	238
D23, даПа	234	247	250	248	266	270	263	250	278	280	269	258	209	235
D24, даПа	226	237	237	235	240	241	239	227	253	250	241	232	189	212

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
D25, даПа	210	223	223	221	200	199	199	185	210	212	202	195	167	181
P17, даПа	612	658	665	683	667	672	684	679	657	647	659	663	651	639
P18, даПа	-81	-82	-82	-81	-80	-81	-83	-80	-80	-81	-84	-85	-83	-84
t14, °C	157	143	139	142	139	137	134	140	140	140	148	155	164	176
P19, даПа	-302	-312	-318	-306	-307	-298	-310	-291	-307	-312	-299	-294	-288	-275
t15, °C	197	191	199	197	192	185	199	198	181	185	187	196	179	156
P20, даПа	235	250	254	251	272	278	269	258	286	286	276	262	214	242
P21, даПа	347	339	360	340	357	346	343	349	350	341	349	338	337	324
D-59, %	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
P22, даПа	-181	-179	-181	-181	-181	-182	-185	-178	-182	-181	-183	-181	-179	-182
t16, °C	86	83	86	86	86	83	83	82	82	82	83	86	87	89
P23, даПа	-95	-94	-96	-95	-94	-95	-97	-92	-95	-94	-98	-97	-96	-97
V, %	5.4	7.9	5.3	5.5	12.00	5.1	5.4	5.4	5.3	7.1	5.2	13.1	28.7	15.3
Др.1, %	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4
I2.1, А	124	125	124	124	125	125	124	125	124	125	124	123	124	122

Додаток Г

Лістинг скрипт-програми тестування за Фішером

```

1 function fisher_test(P, Y, Yr)
2     l1 = length(Y);
3     l2 = length(Yr);
4
5     if l1 > l2
6         fprintf('Error!!!\n Y vector size is %4.0f more than Yr is %4.0f\n',l1,l2)
7         return;
8     elseif l1 < l2
9         fprintf('Error!!!\n Y vector size is %4.0f less than Yr is %4.0f\n',l1,l2)
10        return;
11    end
12
13    m = 1;
14    n = length(Y);
15    F = finv(P, m, n-2);
16
17    format_p = 'Fr is %4.2f more than F is %4.2f\n';
18    format_n = 'Fr is %4.2f less than F is %4.2f\n';
19
20    Ysr_r = mean(Yr);
21    eq1 = zeros(1,n);
22    eq2 = zeros(1,n);
23
24    for i = 1:n
25        eq1(i) = (Yr(i) - Ysr_r)^2;
26        eq2(i) = (Y(i) - Yr(i))^2;
27    end
28
29    ch = sum(eq1);
30    zn = sum(eq2);
31
32    Fr = (ch / m) * ((n - m - 1) / zn);
33
34    if Fr > F
35        fprintf(format_p,Fr,F);
36        disp('System is adequate according to Fishers criterion!');
37        disp(' ');
38    elseif Fr <= F
39        fprintf(format_n,Fr,F);
40        disp('System is non adequate according to Fishers criterion!');
41        disp(' ');
42    end
43 end

```

Додаток Д

**Блок-схема алгоритму роботи автоматизованої системи керування
термічною обробкою окатишів на ВМКТ**

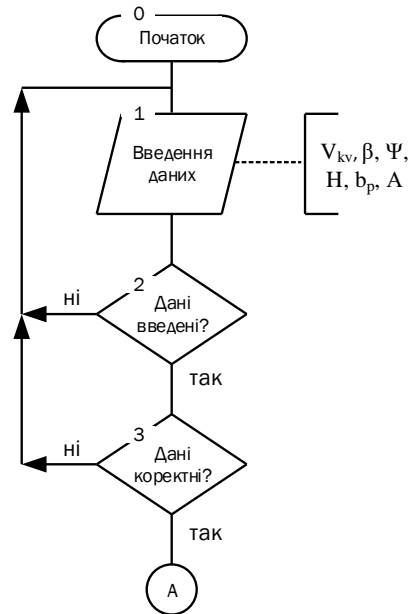


Рис. Д.1. Блоки 0–3

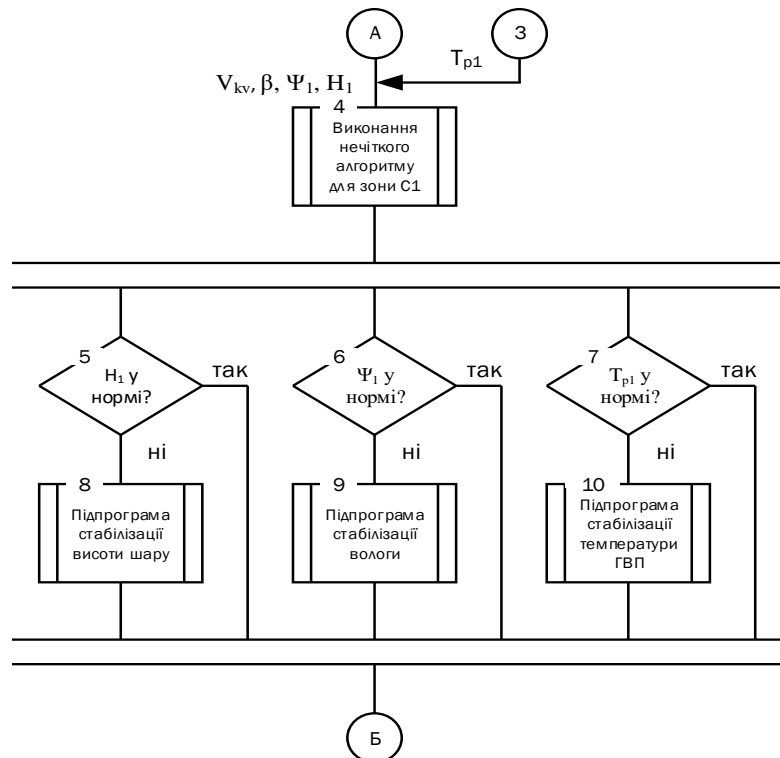


Рис. Д.2. Блоки 4–10

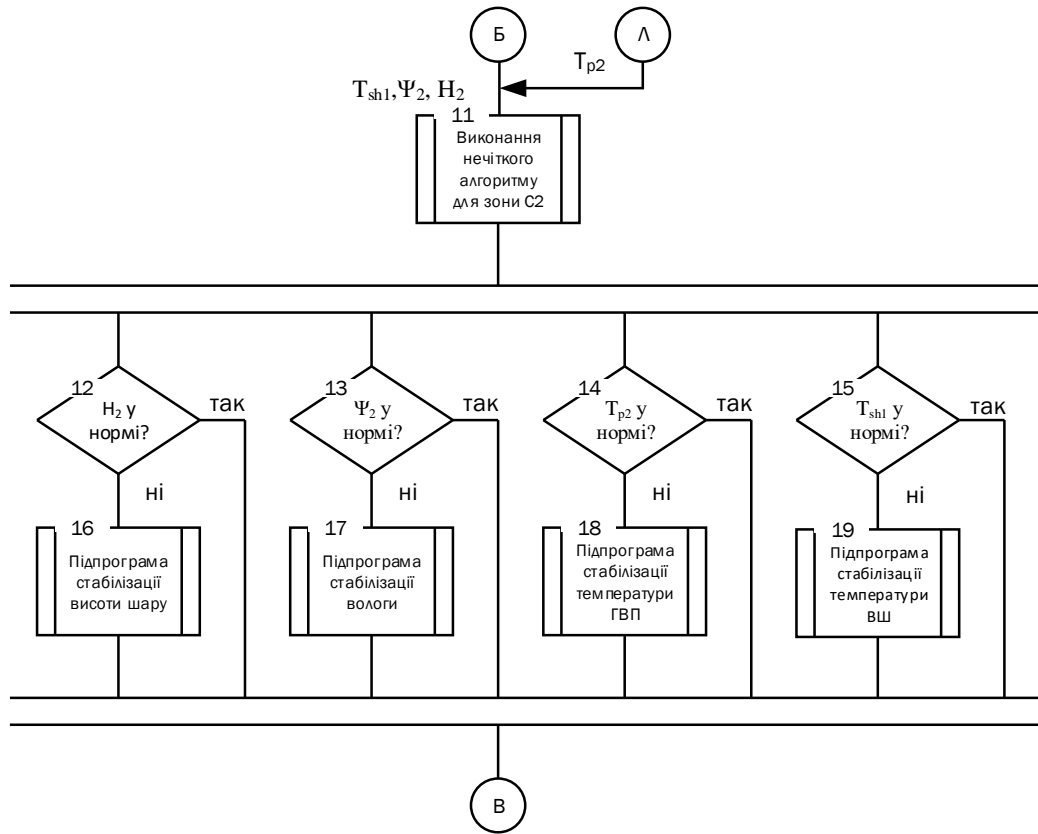


Рис. Д.3. Блоки 11–19

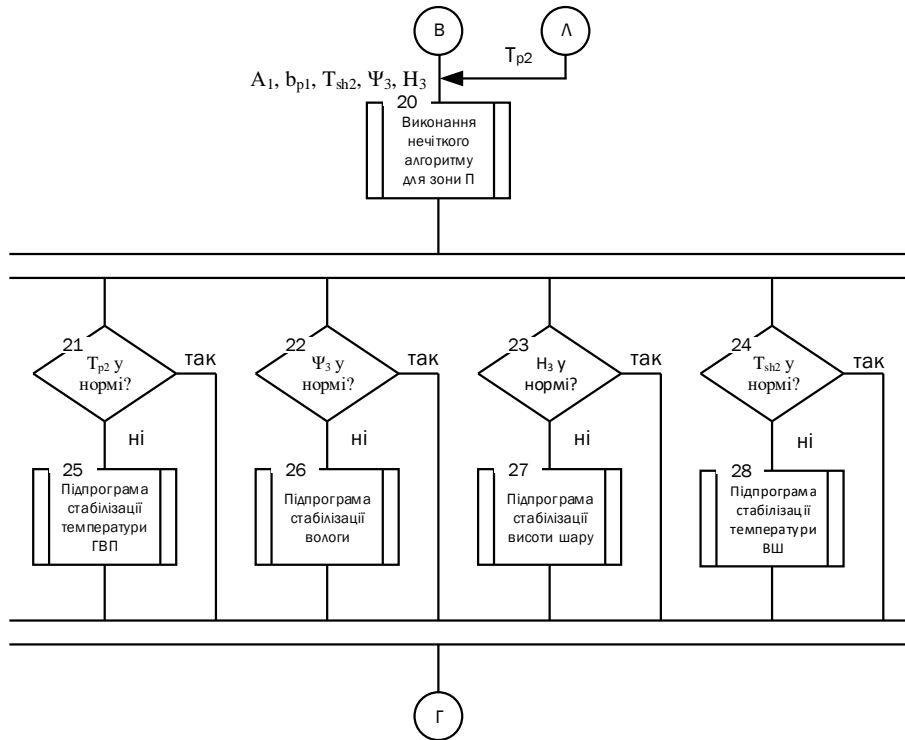


Рис. Д.4. Блоки 20–28

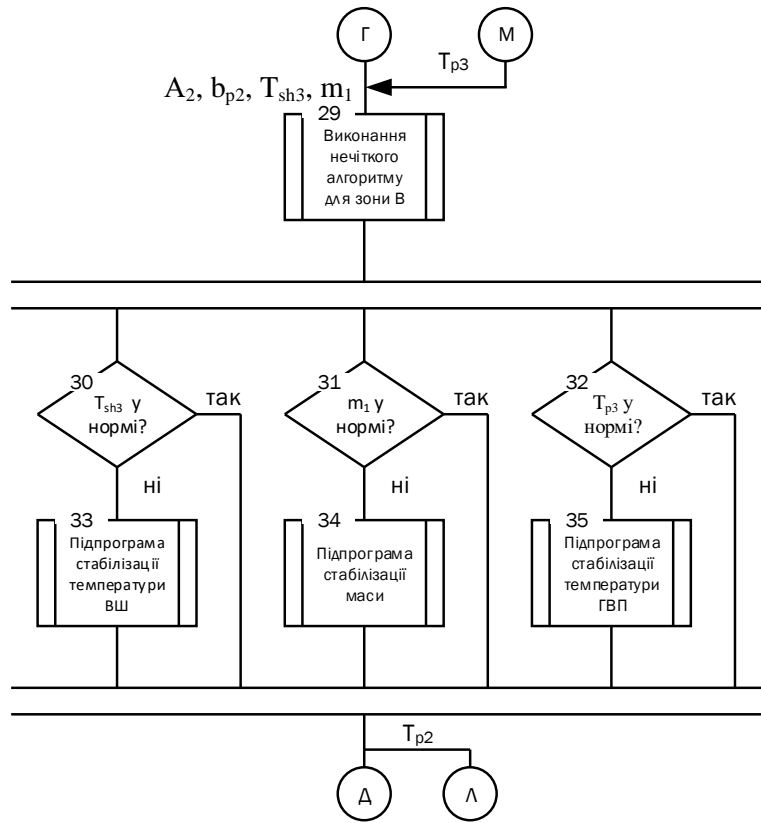


Рис. Д.5. Блоки 29–35

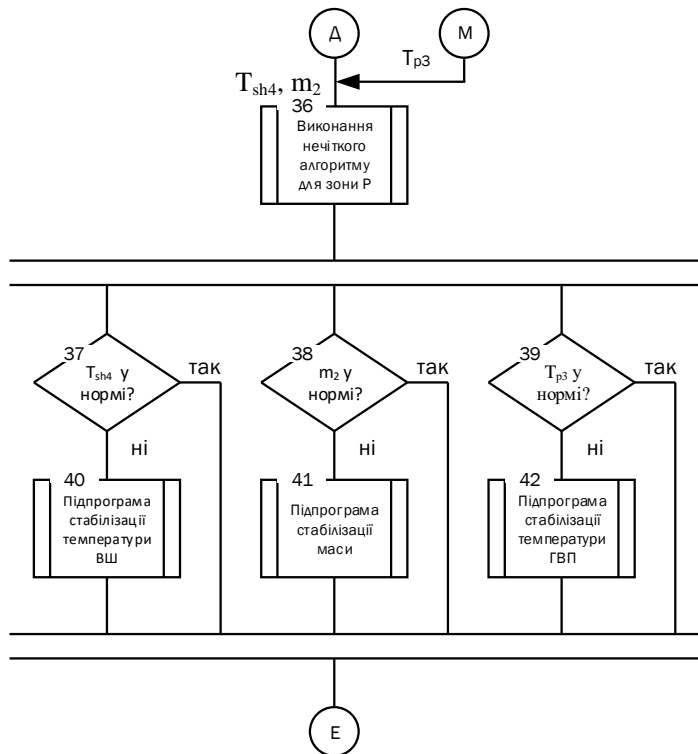


Рис. Д.6. Блоки 36–42

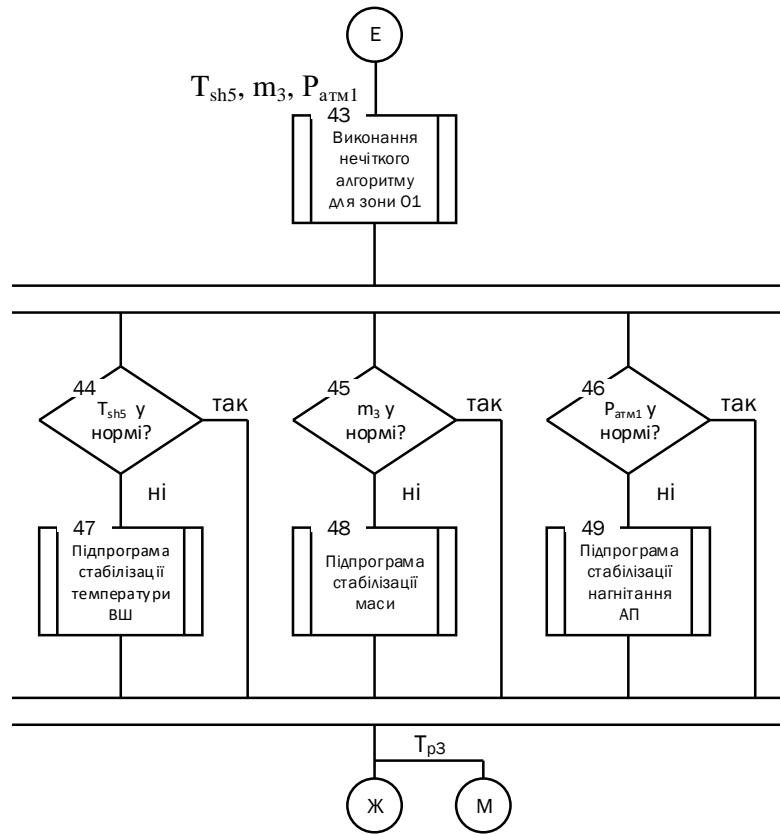


Рис. Д.7. Блоки 43–49

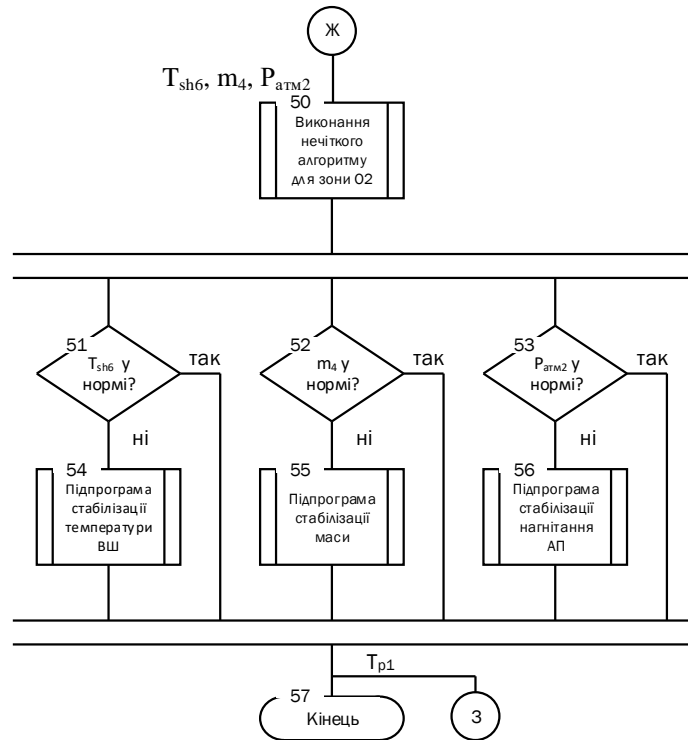


Рис. Д.8. Блоки 50–56

Призначення блоків

Блок «0» – початок технологічного процесу термічної обробки окатишів.

Блок «1» – введення нормованих значень параметрів швидкості конвеєрних візків V_{kv} , основності окатишів β , вмісту вологи в окатишах Ψ , висоти шару окатишів H , витрат природного газу b_p та витрат повітря на його спалювання A .

Блок «2» – перевірка введення всіх даних, зазначених у блоці «1», якщо перевірка успішно виконана, то переходимо до блоку «3», в іншому разі – повертаємося до блоку «1».

Блок «3» – перевірка коректності введених даних, якщо перевірка успішно виконана, то переходимо до блоку «4», в іншому разі – повертаємося до блоку «1».

Блок «4» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗСІ з урахуванням вхідних параметрів: швидкості конвеєрних візків V_{kv} , основності окатишів β , вмісту вологи в окатишах Ψ_1 , висоти шару окатишів H_1 , температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p1} , що відходить із ЗОП.

Блок «5» – перевірка задовільності значення параметру висоти шару окатишів H_1 . Якщо заданий параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «11», в іншому разі – до блоку «8».

Блок «6» – перевірка задовільності значення параметру вмісту вологи в окатишах Ψ_1 . Якщо заданий параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «11», в іншому разі – до блоку «9».

Блок «7» – перевірка задовільності значення параметру температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p1} . Якщо заданий параметр перебуває у нормі, то переходимо до блоку «11», в іншому разі – до блоку «10».

Блок «8» – виконання підпрограми стабілізації висоти шару H_1 , яка полягає в регулюванні швидкістю конвеєрних візків для нормалізації висоти шару окатишів на конвеєрних візках.

Блок «9» – виконання підпрограми стабілізації вологи Ψ_1 , яка полягає в регулюванні температурного режиму в камері для нормалізації процесу видалення вологи з шару окатишів та запобігання перезволоження.

Блок «10» – виконання підпрограми стабілізації температури газоповітряного потоку T_{p1} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок.

Блок «11» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗСП з урахуванням вхідних параметрів: температури верхнього шару окатишів T_{sh1} , вмісту вологи в окатишах Ψ_2 , висоти шару окатишів H_2 , температури газоповітряного потоку T_{p2} , що відходить із ЗВ.

Блок «12» – перевірка задовільності значення параметру висоти шару окатишів H_2 . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «20», в іншому разі – до блоку «16».

Блок «13» – перевірка задовільності значення параметру вмісту вологи в окатишах Ψ_2 . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «20», в іншому разі – до блоку «17».

Блок «14» – перевірка задовільності значення параметру температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p2} . Якщо даний параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «20», в іншому разі – до блоку «18».

Блок «15» – перевірка задовільності значення параметру температури верхнього шару окатишів T_{sh1} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «20», в іншому разі – до блоку «19».

Блок «16» – виконання підпрограми стабілізації висоти шару H_2 , яка полягає в регулюванні швидкості конвеєрних візків для нормалізації висоти шару окатишів на конвеєрних візках.

Блок «17» – виконання підпрограми стабілізації вологи Ψ_2 , яка полягає в регулюванні температурного режиму в камері для нормалізації процесу видалення вологи з шару окатишів та запобігання їх перезволоження.

Блок «18» – виконання підпрограми стабілізації температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p2} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок.

Блок «19» – виконання підпрограми стабілізації температури верхнього шару окатишів T_{sh1} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок.

Блок «20» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗПН з урахуванням вхідних параметрів: витрати повітря на спалювання палива A_1 , витрати палива b_{p1} , температури верхнього шару окатишів T_{sh2} , вмісту вологи в окатишах Ψ_3 , висоти шару окатишів H_3 , температури газоповітряного потоку T_{p2} , що відходить із ЗВ.

Блок «21» – перевірка задовільності значення параметру температури газоповітряного потоку T_{p2} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «29», в іншому разі – до блоку «25».

Блок «22» – перевірка задовільності значення параметру вмісту вологи в окатишах Ψ_3 . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «29», в іншому разі – до блоку «26».

Блок «23» – перевірка задовільності значення параметру висоти шару окатишів H_3 . Якщо даний параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «29», в іншому разі – до блоку «27».

Блок «24» – перевірка задовільності значення параметру температури верхнього шару окатишів T_{sh2} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «29», в іншому разі – до блоку «28».

Блок «25» – виконання підпрограми стабілізації температури газоповітряного потоку T_{p2} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок.

Блок «26» – виконання підпрограми стабілізації вологи Ψ_3 , яка полягає в регулюванні температурним режимом в камері для нормалізації процесу видалення вологи з шару окатишів та запобігання їх перезводнення.

Блок «27» – виконання підпрограми стабілізації висоти шару H_3 , яка полягає в регулюванні швидкості конвеєрних візків для нормалізації висоти шару окатишів на конвеєрних візках.

Блок «28» – виконання підпрограми стабілізації температури верхнього шару окатишів T_{sh2} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок та кількості спалюваного палива b_{p1} .

Блок «29» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗВ з урахуванням вхідних параметрів: витрати повітря на спалювання палива A_2 , витрати палива b_{p2} , температури верхнього шару окатишів T_{sh3} , маси окатишів m_1 , температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p3} , що відходить із ЗОІ.

Блок «30» – перевірка задовільності значення параметру температури верхнього шару окатишів T_{sh3} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «36», в іншому разі – до блоку «33».

Блок «31» – перевірка задовільності значення параметру маси окатишів m_1 . Якщо даний параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «36», в іншому разі – до блоку «34».

Блок «32» – перевірка задовільності значення параметру температури газоповітряного потоку T_{p3} . Якщо цей параметр перебуває у нормі, то переходимо до блоку «36», в іншому випадку – до блоку «35».

Блок «33» – виконання підпрограми стабілізації температури верхнього шару окатишів T_{sh3} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок та кількості спалюваного палива b_{p2} .

Блок «34» – виконання підпрограми стабілізації маси окатишів m_1 , яка полягає в регулюванні інтенсивності температурного режиму в камері.

Блок «35» – виконання підпрограми стабілізації температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p3} , яка полягає в регулюванні ступенів відкриття заслінок.

Блок «36» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗР з урахуванням вхідних параметрів: температури верхнього шару окатишів T_{sh4} , маси

окатишів m_2 , температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p3} , що відходить із ЗОІ.

Блок «37» – перевірка задовільності значення параметру температури верхнього шару окатишів T_{sh4} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «43», в іншому разі – до блоку «40».

Блок «38» – перевірка задовільності значення параметру маси окатишів m_2 . Якщо даний параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «43», в іншому разі – до блоку «41».

Блок «39» – перевірка задовільності значення параметру температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p3} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «43», в іншому разі – до блоку «42».

Блок «40» – виконання підпрограми стабілізації температури верхнього шару окатишів T_{sh4} , яка полягає в регулюванні ступенями відкриття заслінок.

Блок «41» – виконання підпрограми стабілізації маси окатишів m_2 , яка полягає в регулюванні інтенсивності температурного режиму в камері.

Блок «42» – виконання підпрограми стабілізації температури теплоносія газоповітряного потоку T_{p3} , яка полягає в регулюванні ступенями відкриття заслінок.

Блок «43» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗОІ з урахуванням вхідних параметрів: температури верхнього шару окатишів T_{sh5} , маси окатишів m_3 та тиску атмосферного повітря $P_{амм1}$.

Блок «44» – перевірка задовільності значення параметру температури верхнього шару окатишів T_{sh5} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «50», в іншому разі – до блоку «47».

Блок «45» — перевірка задовільності значення параметру маси окатишів m_3 . Якщо даний параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «50», в іншому разі — до блоку «48».

Блок «46» – перевірка задовільності значення параметру тиску атмосферного повітря $P_{амм1}$. Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «50», в іншому разі – до блоку «49».

Блок «47» – виконання підпрограми стабілізації температури верхнього шару окатишів T_{sh5} , яка полягає в регулюванні ступенями відкриття заслінок.

Блок «48» – виконання підпрограми стабілізації маси окатишів m_3 , яка полягає в регулюванні інтенсивності температурного режиму в камері.

Блок «49» – виконання підпрограми стабілізації тиску атмосферного повітря $P_{атм1}$, яка полягає в регулюванні роботі вентилятора.

Блок «50» – підпрограма виконання нечіткого алгоритму для ЗОП з урахуванням вхідних параметрів: температури верхнього шару окатишів T_{sh6} , маси окатишів m_4 та тиску атмосферного повітря $P_{атм2}$.

Блок «51» – перевірка задовільності значення параметру температури верхнього шару окатишів T_{sh6} . Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «57», в іншому разі – до блоку «54».

Блок «52» – перевірка задовільності значення параметру маси окатишів m_4 . Якщо даний параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «57», в іншому разі – до блоку «55».

Блок «53» – перевірка задовільності значення параметру тиску атмосферного повітря $P_{атм2}$. Якщо цей параметр перебуває в нормі, то переходимо до блоку «57», в іншому разі – до блоку «56».

Блок «54» – виконання підпрограми стабілізації температури верхнього шару окатишів T_{sh6} , яка полягає у регулюванні ступенями відкриття заслінок.

Блок «55» – виконання підпрограми стабілізації маси окатишів m_4 , яка полягає у регулюванні інтенсивності температурного режиму в камері.

Блок «56» – виконання підпрограми стабілізації тиску атмосферного повітря $P_{атм2}$, яка полягає в регулюванні роботи вентилятора.

Блок «57» – завершення технологічного процесу термічної обробки окатишів та вивантаження випалених окатишів у бункер.

Додаток Е

Лістинги програм

Лістинг Д.1 – Лістинг програми на мові С++, файл kvm.h:

```

1  #ifndef RTW_HEADER_kvm_h_
2  #define RTW_HEADER_kvm_h_
3  #include "rtwtypes.h"
4  #include <stddef.h>
5  #include <float.h>
6  #include <math.h>
7  #include <string.h>
8  #ifndef kvm_COMMON_INCLUDES_
9  # define kvm_COMMON_INCLUDES_
10 #include "rtwtypes.h"
11 #include "rtw_continuous.h"
12 #include "rtw_solver.h"
13 #endif                                     /* kvm_COMMON_INCLUDES_ */
14
15 #include "math.h"
16 #include "rt_matrixlib.h"
17
18 /* Macros for accessing real-time model data structure */
19 #ifndef rtmGetErrorStatus
20 # define rtmGetErrorStatus(rtm)           ((rtm)->errorStatus)
21 #endif
22
23 #ifndef rtmSetErrorStatus
24 # define rtmSetErrorStatus(rtm, val)      ((rtm)->errorStatus = (val))
25 #endif
26
27 #ifndef rtmGetStopRequested
28 # define rtmGetStopRequested(rtm)        ((rtm)->Timing.stopRequestedFlag)
29 #endif
30
31 #ifndef rtmSetStopRequested
32 # define rtmSetStopRequested(rtm, val)    ((rtm)->Timing.stopRequestedFlag =
33 (val))
34 #endif
35
36 #ifndef rtmGetStopRequestedPtr
37 # define rtmGetStopRequestedPtr(rtm)      (&((rtm)-
38 >Timing.stopRequestedFlag))
39 #endif
40
41 #ifndef rtmGetT
42 # define rtmGetT(rtm)                    (rtmGetTPtr((rtm))[0])
43 #endif
44
45 #ifndef rtmGetTPtr
46 # define rtmGetTPtr(rtm)                 ((rtm)->Timing.t)
47 #endif
48
49 /* Forward declaration for rtModel */
50 typedef struct tag_RTM RT_MODEL;
51
52 #ifndef DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_tq5jKkZqM4ZoKk7qoUFICG_
53 #define DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_tq5jKkZqM4ZoKk7qoUFICG_
54

```



```

55 | typedef struct {
56 |     uint8_T SimulinkDiagnostic;
57 |     uint8_T Model[53];
58 |     uint8_T Block[59];
59 |     uint8_T OutOfRangeInputValue;
60 |     uint8_T NoRuleFired;
61 |     uint8_T EmptyOutputFuzzySet;
62 | } struct_tq5jKkZqM4ZoKk7qoUFICG;
63 |
64 | #endif
65 |
66 | #ifndef DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_RCP1oovUDF2zF6C9vcJmtG_
67 | #define DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_RCP1oovUDF2zF6C9vcJmtG_
68 |
69 | typedef struct {
70 |     uint8_T type[5];
71 |     int32_T origTypeLength;
72 |     real_T params[3];
73 |     int32_T origParamLength;
74 | } struct_RCP1oovUDF2zF6C9vcJmtG;
75 |
76 | #endif
77 |
78 | #ifndef DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_uXA5no8jYojFZ6apA0EJAF_
79 | #define DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_uXA5no8jYojFZ6apA0EJAF_
80 |
81 | typedef struct {
82 |     struct_RCP1oovUDF2zF6C9vcJmtG mf[11];
83 |     int32_T origNumMF;
84 | } struct_uXA5no8jYojFZ6apA0EJAF;
85 |
86 | #endif
87 |
88 | #ifndef DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_M2DXg0yccs4QvICqTa4sp_
89 | #define DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_M2DXg0yccs4QvICqTa4sp_
90 |
91 | typedef struct {
92 |     uint8_T type[7];
93 |     int32_T origTypeLength;
94 |     real_T params[3];
95 |     int32_T origParamLength;
96 | } struct_M2DXg0yccs4QvICqTa4sp;
97 |
98 | #endif
99 |
100 | #ifndef DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_Z4PjWkBDol6nkm52kPwfgC_
101 | #define DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_Z4PjWkBDol6nkm52kPwfgC_
102 |
103 | typedef struct {
104 |     struct_M2DXg0yccs4QvICqTa4sp mf[11];
105 |     int32_T origNumMF;
106 | } struct_Z4PjWkBDol6nkm52kPwfgC;
107 |
108 | #endif
109 |
110 | #ifndef DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_5LoGN45I0L0jgp8olxbQ8B_
111 | #define DEFINED_TYPEDEF_FOR_struct_5LoGN45I0L0jgp8olxbQ8B_
112 |
113 | typedef struct {
114 |     uint8_T type[7];
115 |     uint8_T andMethod[4];
116 |     uint8_T orMethod[6];
117 |     uint8_T defuzzMethod[8];

```

```

118 | uint8_T impMethod[4];
119 | uint8_T aggMethod[6];
120 | real_T inputRange[8];
121 | real_T outputRange[2];
122 | struct_uXA5no8jYojFZ6apA0EJAF inputMF[4];
123 | struct_Z4PjWkBDol6nkm52kPwfgC outputMF;
124 | real_T antecedent[104];
125 | real_T consequent[26];
126 | real_T connection[26];
127 | real_T weight[26];
128 | int32_T numSamples;
129 | int32_T numInputs;
130 | int32_T numOutputs;
131 | int32_T numRules;
132 | int32_T numInputMFs[4];
133 | int32_T numCumInputMFs[4];
134 | int32_T numOutputMFs;
135 | int32_T numCumOutputMFs;
136 | real_T outputSamplePoints[101];
137 | int32_T orrSize[2];
138 | int32_T aggSize[2];
139 | } struct_5LoGN45I0L0jgp8olxbQ8B;
140 |
141 | #endif
142 |
143 | /*struct_tag_sXa089UIJFqxq3bYywqjE75C*/
144 |
145 | #ifndef typedef_sXa089UIJFqxq3bYywqjE75C
146 | #define typedef_sXa089UIJFqxq3bYywqjE75C
147 |
148 | typedef struct tag_sXa089UIJFqxq3bYywqjE75C sXa089UIJFqxq3bYywqjE75C;
149 |
150 | #endif /*typedef_sXa089UIJFqxq3bYywqjE75C*/
151 |
152 | /* Custom Type definition for Function: '<S219>/Evaluate Rule Consequents'
153 | */
154 | #ifndef struct_tag_sTohsHfcc6R2teRT5o0XNVG
155 | #define struct_tag_sTohsHfcc6R2teRT5o0XNVG
156 |
157 | struct tag_sTohsHfcc6R2teRT5o0XNVG
158 | {
159 |     sDfM9XCdU9DLkphJPFDDl1C mf[7];
160 |     int32_T origNumMF;
161 | };
162 |
163 | #endif
164 |
165 | /* Custom Type definition for Function: '<S158>/Evaluate Rule Consequents'
166 | */
167 | #ifndef struct_tag_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF
168 | #define struct_tag_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF
169 |
170 | struct tag_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF
171 | {
172 |     uint8_T type[7];
173 |     uint8_T andMethod[4];
174 |     uint8_T orMethod[6];
175 |     uint8_T defuzzMethod[8];
176 |     uint8_T impMethod[4];
177 |     uint8_T aggMethod[6];
178 |     real_T inputRange[6];
179 |     real_T outputRange[2];
180 |     sTohsHfcc6R2teRT5o0XNVG inputMF[3];

```

```

181 | s5jURx8oVKm8wGaoDe5zFaF outputMF;
182 | real_T antecedent[51];
183 | real_T consequent[17];
184 | real_T connection[17];
185 | real_T weight[17];
186 | int32_T numSamples;
187 | int32_T numInputs;
188 | int32_T numOutputs;
189 | int32_T numRules;
190 | int32_T numInputMFs[3];
191 | int32_T numCumInputMFs[3];
192 | int32_T numOutputMFs;
193 | int32_T numCumOutputMFs;
194 | real_T outputSamplePoints[101];
195 | int32_T orrSize[2];
196 | int32_T aggSize[2];
197 | };
198 |
199 | #endif
200 | /*struct_tag_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF*/
201 |
202 | #ifndef typedef_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF
203 | #define typedef_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF
204 |
205 | typedef struct tag_sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF sdDe4gON7JX5UPPlvEwNXsF;
206 |
207 | #endif
208 | /*struct_tag_s6M494Fo7mmZxUP7VQE00xD*/
209 |
210 | #ifndef typedef_s6M494Fo7mmZxUP7VQE00xD
211 | #define typedef_s6M494Fo7mmZxUP7VQE00xD
212 |
213 | typedef struct tag_s6M494Fo7mmZxUP7VQE00xD s6M494Fo7mmZxUP7VQE00xD;
214 |
215 | #endif
216 | /*struct_tag_sA6fTsSvNdsEf4E725x6rxD*/
217 |
218 | #ifndef typedef_sA6fTsSvNdsEf4E725x6rxD
219 | #define typedef_sA6fTsSvNdsEf4E725x6rxD
220 |
221 | typedef struct tag_sA6fTsSvNdsEf4E725x6rxD sA6fTsSvNdsEf4E725x6rxD;
222 |
223 | #endif
224 |
225 | /* Block signals and states (default storage) for system '<Root>' */
226 | typedef struct {
227 |     struct {
228 |         real_T modelTStart;
229 |         real_T TUbufferArea[2048];
230 |     } TransportDelay_RWORK; /* '<S45>/Transport Delay' */
231 |
232 |     real_T outputMFCache[707];
233 |     real_T RandomNumber; /* '<S210>/Random Number' */
234 |     real_T Step; /* '<S210>/Step' */
235 |     real_T Step_p; /* '<S213>/Step' */
236 |     real_T Product1_p; /* '<S212>/Product1' */
237 |     real_T Product2; /* '<S211>/Product2' */
238 |     real_T defuzzifiedOutputs; /* '<S218>/Defuzzify Outputs' */
239 |     real_T Product_h; /* '<S178>/Product' */
240 |     real_T Product1_m; /* '<S179>/Product1' */
241 |     real_T Product2_m; /* '<S177>/Product2' */
242 |     real_T RandomNumber_i; /* '<S180>/Random Number' */
243 |     real_T Step_e; /* '<S180>/Step' */

```

```

244 | real_T Product2_c;                /* '<S181>/Product2' */
245 | real_T defuzzifiedOutputs_h;     /* '<S186>/Defuzzify Outputs' */
246 | real_T Step_i;                   /* '<S152>/Step' */
247 | real_T Step_h;                   /* '<S151>/Step' */
248 | real_T Step_g;                   /* '<S126>/Step' */
249 | real_T Step_f;                   /* '<S125>/Step' */
250 | real_T Step_a;                   /* '<S79>/Step' */
251 | real_T RandomNumber_a;          /* '<S45>/Random Number' */
252 | real_T Step_ar;                  /* '<S45>/Step' */
253 | real_T Step_g0;                 /* '<S21>/Step' */
254 | real_T Step_m;                  /* '<S20>/Step' */
255 | real_T NextOutput;              /* '<S210>/Random Number' */
256 | real_T NextOutput_j;            /* '<S212>/Random Number1' */
257 | real_T NextOutput_n;           /* '<S211>/Random Number2' */
258 | real_T NextOutput_p;           /* '<S178>/Random Number' */
259 | real_T NextOutput_pt;          /* '<S179>/Random Number1' */
260 | real_T NextOutput_b;           /* '<S177>/Random Number2' */
261 | real_T NextOutput_e;           /* '<S180>/Random Number' */
262 | real_T NextOutput_g;           /* '<S181>/Random Number2' */
263 | real_T NextOutput_d;           /* '<S147>/Random Number' */
264 | real_T NextOutput_l;           /* '<S152>/Random Number' */
265 | real_T NextOutput_nc;          /* '<S151>/Random Number1' */
266 | real_T NextOutput_eu;          /* '<S119>/Random Number' */
267 | real_T NextOutput_jh;          /* '<S126>/Random Number' */
268 | real_T PrevYA;                  /* '<S126>/Rate Limiter' */
269 | real_T PrevYB;                  /* '<S126>/Rate Limiter' */
270 | real_T LastMajorTimeA;         /* '<S126>/Rate Limiter' */
271 | real_T LastMajorTimeB;         /* '<S126>/Rate Limiter' */
272 | real_T NextOutput_lt;          /* '<S125>/Random Number' */
273 | real_T PrevYA_n;               /* '<S125>/Rate Limiter' */
274 | real_T PrevYB_k;               /* '<S125>/Rate Limiter' */
275 | real_T LastMajorTimeA_p;        /* '<S125>/Rate Limiter' */
276 | real_T LastMajorTimeB_c;        /* '<S125>/Rate Limiter' */
277 | real_T NextOutput_a;           /* '<S124>/Random Number' */
278 | real_T NextOutput_bz;          /* '<S123>/Random Number' */
279 | real_T NextOutput_jb;          /* '<S74>/Random Number' */
280 | real_T NextOutput_h;           /* '<S79>/Random Number' */
281 | real_T PrevYA_i;               /* '<S79>/Rate Limiter' */
282 | real_T PrevYB_j;               /* '<S79>/Rate Limiter' */
283 | real_T LastMajorTimeA_a;        /* '<S79>/Rate Limiter' */
284 | real_T LastMajorTimeB_j;        /* '<S79>/Rate Limiter' */
285 | real_T NextOutput_nh;          /* '<S78>/Random Number' */
286 | real_T NextOutput_gg;          /* '<S40>/Random Number' */
287 | real_T NextOutput_c;           /* '<S44>/Random Number' */
288 | real_T NextOutput_hk;          /* '<S45>/Random Number' */
289 | real_T NextOutput_a3;          /* '<S15>/Random Number' */
290 | real_T NextOutput_hj;          /* '<S21>/Random Number' */
291 | real_T NextOutput_gy;          /* '<S20>/Random Number1' */
292 | real_T NextOutput_k;           /* '<S19>/Random Number' */
293 | struct {
294 |     int_T Tail;
295 |     int_T Head;
296 |     int_T Last;
297 |     int_T CircularBufSize;
298 | } TransportDelay_IWORK;        /* '<S45>/Transport Delay' */
299 |
300 | uint32_T RandSeed;              /* '<S210>/Random Number' */
301 | uint32_T RandSeed_o;           /* '<S212>/Random Number1' */
302 | uint32_T RandSeed_ou;          /* '<S211>/Random Number2' */
303 | uint32_T RandSeed_i;           /* '<S178>/Random Number' */
304 | uint32_T RandSeed_f;           /* '<S179>/Random Number1' */
305 | uint32_T RandSeed_l;           /* '<S177>/Random Number2' */
306 | uint32_T RandSeed_a;           /* '<S180>/Random Number' */

```

```

307 | uint32_T RandSeed_n;          /* '<S181>/Random Number2' */
308 | uint32_T RandSeed_b;          /* '<S147>/Random Number' */
309 | uint32_T RandSeed_lm;         /* '<S152>/Random Number' */
310 | uint32_T RandSeed_c;          /* '<S151>/Random Number1' */
311 | uint32_T RandSeed_i2;         /* '<S119>/Random Number' */
312 | uint32_T RandSeed_j;          /* '<S126>/Random Number' */
313 | uint32_T RandSeed_k;          /* '<S125>/Random Number' */
314 | uint32_T RandSeed_p;          /* '<S124>/Random Number' */
315 | uint32_T RandSeed_c4;         /* '<S123>/Random Number' */
316 | uint32_T RandSeed_lk;         /* '<S74>/Random Number' */
317 | uint32_T RandSeed_e;          /* '<S79>/Random Number' */
318 | uint32_T RandSeed_ez;         /* '<S78>/Random Number' */
319 | uint32_T RandSeed_ev;         /* '<S40>/Random Number' */
320 | uint32_T RandSeed_ir;         /* '<S44>/Random Number' */
321 | uint32_T RandSeed_bh;         /* '<S45>/Random Number' */
322 | uint32_T RandSeed_lb;         /* '<S15>/Random Number' */
323 | uint32_T RandSeed_pu;         /* '<S21>/Random Number' */
324 | uint32_T RandSeed_ah;         /* '<S20>/Random Number1' */
325 | uint32_T RandSeed_li;         /* '<S19>/Random Number' */
326 | struct {
327 |     void *TUbufferPtrs[2];
328 | } TransportDelay_PWORK;      /* '<S45>/Transport Delay' */
329 | } DW;
330 |
331 | /* Continuous states (default storage) */
332 | typedef struct {
333 |     real_T TransferFcn_CSTATE; /* '<S207>/Transfer Fcn' */
334 |     real_T TransferFcn_CSTATE_d; /* '<S210>/Transfer Fcn' */
335 |     real_T TransferFcn_CSTATE_p; /* '<S213>/Transfer Fcn' */
336 |     real_T TransferFcn_CSTATE_e; /* '<S180>/Transfer Fcn' */
337 |     real_T TransferFcn_CSTATE_h; /* '<S11>/Transfer Fcn' */
338 |     real_T TransferFcn_CSTATE_he; /* '<S152>/Transfer Fcn' */
339 |     real_T TransferFcn_CSTATE_i; /* '<S151>/Transfer Fcn' */
340 |     real_T TransferFcn_CSTATE_l; /* '<S126>/Transfer Fcn' */
341 |     real_T TransferFcn_CSTATE_b; /* '<S125>/Transfer Fcn' */
342 |     real_T TransferFcn1_CSTATE; /* '<S79>/Transfer Fcn1' */
343 |     real_T TransferFcn1_CSTATE_k; /* '<S45>/Transfer Fcn' */
344 |     real_T TransferFcn1_CSTATE_e; /* '<S45>/Transfer Fcn1' */
345 |     real_T TransferFcn_CSTATE_ir; /* '<S21>/Transfer Fcn' */
346 |     real_T TransferFcn_CSTATE_n; /* '<S20>/Transfer Fcn' */
347 | } X;
348 |
349 | /* State derivatives (default storage) */
350 | typedef struct {
351 |     real_T TransferFcn_CSTATE; /* '<S207>/Transfer Fcn' */
352 |     real_T TransferFcn_CSTATE_d; /* '<S210>/Transfer Fcn' */
353 |     real_T TransferFcn_CSTATE_p; /* '<S213>/Transfer Fcn' */
354 |     real_T TransferFcn_CSTATE_e; /* '<S180>/Transfer Fcn' */
355 |     real_T TransferFcn_CSTATE_h; /* '<S11>/Transfer Fcn' */
356 |     real_T TransferFcn_CSTATE_he; /* '<S152>/Transfer Fcn' */
357 |     real_T TransferFcn_CSTATE_i; /* '<S151>/Transfer Fcn' */
358 |     real_T TransferFcn_CSTATE_l; /* '<S126>/Transfer Fcn' */
359 |     real_T TransferFcn_CSTATE_b; /* '<S125>/Transfer Fcn' */
360 |     real_T TransferFcn1_CSTATE; /* '<S79>/Transfer Fcn1' */
361 |     real_T TransferFcn1_CSTATE_k; /* '<S45>/Transfer Fcn' */
362 |     real_T TransferFcn1_CSTATE_e; /* '<S45>/Transfer Fcn1' */
363 |     real_T TransferFcn_CSTATE_ir; /* '<S21>/Transfer Fcn' */
364 |     real_T TransferFcn_CSTATE_n; /* '<S20>/Transfer Fcn' */
365 | } XDot;
366 |
367 | /* State disabled */
368 | typedef struct {
369 |     boolean_T TransferFcn_CSTATE; /* '<S207>/Transfer Fcn' */

```

```

370 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_d;          /* '<S210>/Transfer Fcn' */
371 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_p;          /* '<S213>/Transfer Fcn' */
372 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_e;          /* '<S180>/Transfer Fcn' */
373 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_h;          /* '<S11>/Transfer Fcn' */
374 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_he;         /* '<S152>/Transfer Fcn' */
375 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_i;          /* '<S151>/Transfer Fcn' */
376 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_l;          /* '<S126>/Transfer Fcn' */
377 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_b;          /* '<S125>/Transfer Fcn' */
378 | boolean_T TransferFcn1_CSTATE;           /* '<S79>/Transfer Fcn1' */
379 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_k;          /* '<S45>/Transfer Fcn' */
380 | boolean_T TransferFcn1_CSTATE_e;         /* '<S45>/Transfer Fcn1' */
381 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_ir;         /* '<S21>/Transfer Fcn' */
382 | boolean_T TransferFcn_CSTATE_n;          /* '<S20>/Transfer Fcn' */
383 | } XDis;
384 |
385 | #ifndef ODE14X_INTG
386 | #define ODE14X_INTG
387 |
388 | /* ODE14X Integration Data */
389 | typedef struct {
390 |     real_T *x0;
391 |     real_T *f0;
392 |     real_T *x1start;
393 |     real_T *f1;
394 |     real_T *Delta;
395 |     real_T *E;
396 |     real_T *fac;
397 |     real_T *DFDX;
398 |     real_T *W;
399 |     int_T *pivots;
400 |     real_T *xtmp;
401 |     real_T *ztmp;
402 |     real_T *M;
403 |     real_T *M1;
404 |     real_T *Edot;
405 |     real_T *xdot;
406 |     real_T *fminusMxdot;
407 |     boolean_T isFirstStep;
408 | } ODE14X_IntgData;
409 |
410 | #endif
411 |
412 | /* Constant parameters (default storage) */
413 | typedef struct {
414 |     /* Expression: fis.outputSamplePoints
415 |      * Referenced by: '<S186>/Output Sample Points'
416 |      */
417 |     real_T OutputSamplePoints_Value_l[101];
418 |
419 |     /* Expression: fis.outputSamplePoints
420 |      * Referenced by: '<S218>/Output Sample Points'
421 |      */
422 |     real_T OutputSamplePoints_Value_m[101];
423 | } ConstP;
424 |
425 | /* Real-time Model Data Structure */
426 | struct tag_RTM {
427 |     const char_T *errorStatus;
428 |     RTWSolverInfo solverInfo;
429 |     X *contStates;
430 |     int_T *periodicContStateIndices;
431 |     real_T *periodicContStateRanges;
432 |     real_T *derivs;

```

```

433 | boolean_T *contStateDisabled;
434 | boolean_T zCCacheNeedsReset;
435 | boolean_T derivCacheNeedsReset;
436 | boolean_T CTOutputIncnstWithState;
437 | real_T odeX0[14];
438 | real_T odeF0[14];
439 | real_T odeX1START[14];
440 | real_T odeF1[14];
441 | real_T odeDELTA[14];
442 | real_T odeE[4*14];
443 | real_T odeFAC[14];
444 | real_T odeDFDX[14*14];
445 | real_T odeW[14*14];
446 | int_T odePIVOTS[14];
447 | real_T odeXTMP[14];
448 | real_T odeZTMP[14];
449 | ODE14X_IntgData intgData;
450 |
451 | /*
452 |  * Sizes:
453 |  * The following substructure contains sizes information
454 |  * for many of the model attributes such as inputs, outputs,
455 |  * dwork, sample times, etc.
456 |  */
457 | struct {
458 |     int_T numContStates;
459 |     int_T numPeriodicContStates;
460 |     int_T numSampTimes;
461 | } Sizes;
462 |
463 | /*
464 |  * Timing:
465 |  * The following substructure contains information regarding
466 |  * the timing information for the model.
467 |  */
468 | struct {
469 |     uint16_T clockTick0;
470 |     time_T stepSize0;
471 |     uint16_T clockTick1;
472 |     struct {
473 |         uint8_T TID[7];
474 |     } TaskCounters;
475 |
476 |     SimTimeStep simTimeStep;
477 |     boolean_T stopRequestedFlag;
478 |     time_T *t;
479 |     time_T tArray[7];
480 | } Timing;
481 | };
482 |
483 | #endif

```

Лістинг Д.2 – Лістинг програми мовою С, файл kvm.c:

```

1 | #include "kvm.h"
2 | #define NumBitsPerChar          8U
3 |
4 | /* Private macros used by the generated code to access rtModel */
5 | #ifndef rtmIsMajorTimeStep
6 | # define rtmIsMajorTimeStep(rtm)      (((rtm)->Timing.simTimeStep) ==
7 | MAJOR_TIME_STEP)

```

```

8  #endif
9
10 #ifndef rtmIsMinorTimeStep
11 # define rtmIsMinorTimeStep(rtm)          (((rtm)->Timing.simTimeStep) ==
12 MINOR_TIME_STEP)
13 #endif
14
15 #ifndef rtmSetTPtr
16 # define rtmSetTPtr(rtm, val)             ((rtm)->Timing.t = (val))
17 #endif
18
19 /* Continuous states */
20 X rtX;
21
22 /* Block signals and states (default storage) */
23 DW rtDW;
24
25 /* Real-time model */
26 RT_MODEL rtM;
27 RT_MODEL *const rtM = &rtM;
28 extern real_T rt_urand_Upu32_Yd_f_pw_snf(uint32_T *u);
29 extern real_T rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(uint32_T *u);
30 real_T rt_TDelayInterpolate(
31     real_T tMinusDelay,                    /* tMinusDelay = currentSimTime -
32 delay */
33     real_T tStart,
34     real_T *tBuf,
35     real_T *uBuf,
36     int_T bufSz,
37     int_T *lastIdx,
38     int_T oldestIdx,
39     int_T newIdx,
40     real_T initOutput,
41     boolean_T discrete,
42     boolean_T minorStepAndTAtLastMajorOutput)
43     ;
44
45 /* private model entry point functions */
46 extern void kvm_derivatives(void);
47
48 /* Forward declaration for local functions */
49 static real_T trimf(real_T x, const real_T params[3]);
50 static void trimf_k(const real_T x[101], const real_T params[3], real_T
51 y[101]);
52 static void createMamdaniOutputMFCache_dc(const real_T
53 outputSamplePoints[101],
54     real_T outputMFCache[707]);
55 static int32_T abs_hm(int32_T x);
56 static real_T evaluateAndMethod_nl(const real_T x[2]);
57 static void evaluateCommonMembershipFcn_f(const real_T x[101], real_T
58 y[101]);
59 static void createMamdaniOutputMFCache_d3(const real_T
60 outputSamplePoints[101],
61     real_T outputMFCache[707]);
62 static void rate_scheduler(void);
63 extern real_T rtGetInf(void);
64 extern real32_T rtGetInfF(void);
65 extern real_T rtGetMinusInf(void);
66 extern real32_T rtGetMinusInfF(void);
67 extern real_T rtInf;
68 extern real_T rtMinusInf;
69 extern real_T rtNaN;
70 extern real32_T rtInfF;

```



```

71 extern real32_T rtMinusInfF;
72 extern real32_T rtNaNF;
73 extern void rt_InitInfAndNaN(size_t realSize);
74 extern boolean_T rtIsInf(real_T value);
75 extern boolean_T rtIsInfF(real32_T value);
76 extern boolean_T rtIsNaN(real_T value);
77 extern boolean_T rtIsNaNF(real32_T value);
78 typedef struct {
79     struct {
80         uint32_T wordH;
81         uint32_T wordL;
82     } words;
83 } BigEndianIEEEDouble;
84
85 typedef struct {
86     struct {
87         uint32_T wordL;
88         uint32_T wordH;
89     } words;
90 } LittleEndianIEEEDouble;
91
92 typedef struct {
93     union {
94         real32_T wordLreal;
95         uint32_T wordLuint;
96     } wordL;
97 } IEEESingle;
98
99 real_T rtInf;
100 real_T rtMinusInf;
101 real_T rtNaN;
102 real32_T rtInfF;
103 real32_T rtMinusInfF;
104 real32_T rtNaNF;
105 extern real_T rtGetNaN(void);
106 extern real32_T rtGetNaNF(void);
107
108 /*
109  * Initialize rtInf needed by the generated code.
110  * Inf is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
111  */
112 real_T rtGetInf(void)
113 {
114     size_t bitsPerReal = sizeof(real_T) * (NumBitsPerChar);
115     real_T inf = 0.0;
116     if (bitsPerReal == 32U) {
117         inf = rtGetInfF();
118     } else {
119         union {
120             LittleEndianIEEEDouble bitVal;
121             real_T fltVal;
122         } tmpVal;
123
124         tmpVal.bitVal.words.wordH = 0x7FF00000U;
125         tmpVal.bitVal.words.wordL = 0x00000000U;
126         inf = tmpVal.fltVal;
127     }
128
129     return inf;
130 }
131
132 /*
133  * Initialize rtInfF needed by the generated code.

```

```

134 | * Inf is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
135 | */
136 | real32_T rtGetInfF(void)
137 | {
138 |     IEEEFloat infF;
139 |     infF.wordL.wordLuint = 0x7F800000U;
140 |     return infF.wordL.wordLreal;
141 | }
142 |
143 | /*
144 | * Initialize rtMinusInf needed by the generated code.
145 | * Inf is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
146 | */
147 | real_T rtGetMinusInf(void)
148 | {
149 |     size_t bitsPerReal = sizeof(real_T) * (NumBitsPerChar);
150 |     real_T minf = 0.0;
151 |     if (bitsPerReal == 32U) {
152 |         minf = rtGetMinusInfF();
153 |     } else {
154 |         union {
155 |             LittleEndianIEEEDouble bitVal;
156 |             real_T fltVal;
157 |         } tmpVal;
158 |
159 |         tmpVal.bitVal.words.wordH = 0xFFF00000U;
160 |         tmpVal.bitVal.words.wordL = 0x00000000U;
161 |         minf = tmpVal.fltVal;
162 |     }
163 |
164 |     return minf;
165 | }
166 |
167 | /*
168 | * Initialize rtMinusInfF needed by the generated code.
169 | * Inf is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
170 | */
171 | real32_T rtGetMinusInfF(void)
172 | {
173 |     IEEEFloat minfF;
174 |     minfF.wordL.wordLuint = 0xFF800000U;
175 |     return minfF.wordL.wordLreal;
176 | }
177 |
178 | /*
179 | * Initialize the rtInf, rtMinusInf, and rtNaN needed by the
180 | * generated code. NaN is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
181 | */
182 | void rt_InitInfAndNaN(size_t realSize)
183 | {
184 |     (void) (realSize);
185 |     rtNaN = rtGetNaN();
186 |     rtNaNF = rtGetNaNF();
187 |     rtInf = rtGetInf();
188 |     rtInfF = rtGetInfF();
189 |     rtMinusInf = rtGetMinusInf();
190 |     rtMinusInfF = rtGetMinusInfF();
191 | }
192 |
193 | /* Test if value is infinite */
194 | boolean_T rtIsInf(real_T value)
195 | {
196 |     return (boolean_T)((value==rtInf || value==rtMinusInf) ? 1U : 0U);

```

```

197 }
198
199 /* Test if single-precision value is infinite */
200 boolean_T rtIsInfF(real32_T value)
201 {
202     return (boolean_T)((value)==rtInfF || (value)==rtMinusInfF) ? 1U : 0U;
203 }
204
205 /* Test if value is not a number */
206 boolean_T rtIsNaN(real_T value)
207 {
208     boolean_T result = (boolean_T) 0;
209     size_t bitsPerReal = sizeof(real_T) * (NumBitsPerChar);
210     if (bitsPerReal == 32U) {
211         result = rtIsNaNF((real32_T)value);
212     } else {
213         union {
214             LittleEndianIEEEDouble bitVal;
215             real_T fltVal;
216         } tmpVal;
217
218         tmpVal.fltVal = value;
219         result = (boolean_T)((tmpVal.bitVal.words.wordH & 0x7FF00000) ==
220 0x7FF00000 &&
221             (tmpVal.bitVal.words.wordH & 0x000FFFFFF) != 0
222             ||
223             (tmpVal.bitVal.words.wordL != 0) );
224     }
225
226     return result;
227 }
228
229 /* Test if single-precision value is not a number */
230 boolean_T rtIsNaNF(real32_T value)
231 {
232     IEEESingle tmp;
233     tmp.wordL.wordLreal = value;
234     return (boolean_T)( (tmp.wordL.wordLuInt & 0x7F800000) == 0x7F800000 &&
235         (tmp.wordL.wordLuInt & 0x007FFFFFF) != 0 );
236 }
237
238 /*
239  * Initialize rtNaN needed by the generated code.
240  * NaN is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
241  */
242 real_T rtGetNaN(void)
243 {
244     size_t bitsPerReal = sizeof(real_T) * (NumBitsPerChar);
245     real_T nan = 0.0;
246     if (bitsPerReal == 32U) {
247         nan = rtGetNaNF();
248     } else {
249         union {
250             LittleEndianIEEEDouble bitVal;
251             real_T fltVal;
252         } tmpVal;
253
254         tmpVal.bitVal.words.wordH = 0xFFF80000U;
255         tmpVal.bitVal.words.wordL = 0x00000000U;
256         nan = tmpVal.fltVal;
257     }
258
259     return nan;

```

```

260 }
261
262 /*
263  * Initialize rtNaNF needed by the generated code.
264  * NaN is initialized as non-signaling. Assumes IEEE.
265  */
266 real32_T rtGetNaNF(void)
267 {
268     IEEESingle nanF = { { 0 } };
269
270     nanF.wordL.wordLuint = 0xFFC00000U;
271     return nanF.wordL.wordLreal;
272 }
273
274 /*
275  * Time delay interpolation routine
276  * The linear interpolation is performed using the formula:
277  *
278  *          (t2 - tMinusDelay)          (tMinusDelay - t1)
279  * u(t) =  ----- * u1 + ----- * u2
280  *          (t2 - t1)                  (t2 - t1)
281  */
282 real_T rt_TDelayInterpolate(
283     real_T tMinusDelay, /* tMinusDelay = currentSimTime - delay */
284     real_T tStart,
285     real_T *tBuf,
286     real_T *uBuf,
287     int_T bufSz,
288     int_T *lastIdx,
289     int_T oldestIdx,
290     int_T newIdx,
291     real_T initOutput,
292     boolean_T discrete,
293     boolean_T minorStepAndTAtLastMajorOutput)
294 {
295     int_T i;
296     real_T yout, t1, t2, u1, u2;
297
298     /*
299     * Use Lagrange's interpolation formula. Exact outputs at t1, t2.
300     */
301     yout = f1*u1 + f2*u2;
302 }
303 }
304
305 return(yout);
306 }
307
308 /*
309  * This function updates active task flag for each subrate.
310  * The function is called at model base rate, hence the
311  * generated code self-manages all its subrates.
312  */
313 static void rate_scheduler(void)
314 {
315     /* Compute which subrates run during the next base time step. Subrates
316     are an integer multiple of the base rate counter. Therefore, the subtask
317     counter is reset when it reaches its limit (zero means run). */
318     (rtM->Timing.TaskCounters.TID[2])++;
319     if ((rtM->Timing.TaskCounters.TID[2]) > 1) { /* Sample time: [5.0s, 0.0s]
320     */
321         rtM->Timing.TaskCounters.TID[2] = 0;
322     }

```

```

323
324     (rtM->Timing.TaskCounters.TID[3])++;
325     if ((rtM->Timing.TaskCounters.TID[3]) > 3) { /* Sample time: [10.0s,
326 0.0s] */
327         rtM->Timing.TaskCounters.TID[3] = 0;
328     }
329
330     (rtM->Timing.TaskCounters.TID[4])++;
331     if ((rtM->Timing.TaskCounters.TID[4]) > 7) { /* Sample time: [20.0s,
332 0.0s] */
333         rtM->Timing.TaskCounters.TID[4] = 0;
334     }
335
336     (rtM->Timing.TaskCounters.TID[5])++;
337     if ((rtM->Timing.TaskCounters.TID[5]) > 9) { /* Sample time: [25.0s,
338 0.0s] */
339         rtM->Timing.TaskCounters.TID[5] = 0;
340     }
341
342     (rtM->Timing.TaskCounters.TID[6])++;
343     if ((rtM->Timing.TaskCounters.TID[6]) > 11) { /* Sample time: [30.0s,
344 0.0s] */
345         rtM->Timing.TaskCounters.TID[6] = 0;
346     }
347 }
348
349 /* Simplified version of numjac.cpp, for use with RTW. */
350 void local_numjac( RTWSolverInfo *si, real_T *y, const real_T *Fty, real_T
351 *fac,
352                 real_T *dFdy )
353 {
354     /* constants */
355     real_T THRESH = 1e-6;
356     real_T EPS = 2.2e-16; /* utGetEps(); */
357     real_T BL = pow(EPS, 0.75);
358     real_T BU = pow(EPS, 0.25);
359     real_T FACMIN = pow(EPS, 0.78);
360     real_T FACMAX = 0.1;
361     int_T nx = 14;
362     real_T *x = rtsiGetContStates(si);
363     real_T del;
364     real_T difmax;
365     real_T FdelRowmax;
366     real_T temp;
367     real_T Fdiff;
368     real_T maybe;
369     real_T xscale;
370     real_T fscale;
371     real_T *p;
372     int_T rowmax;
373     int_T i,j;
374     if (x != y)
375         (void) memcpy(x, y,
376                     (uint_T)nx*sizeof(real_T));
377     rtsiSetSolverComputingJacobian(si,true);
378     for (p = dFdy, j = 0; j < nx; j++, p += nx) {
379         /* Select an increment del for a difference approximation to
380         column j of dFdy. The vector fac accounts for experience
381         gained in previous calls to numjac. */
382         xscale = fabs(x[j]);
383         if (xscale < THRESH)
384             xscale = THRESH;
385         temp = (x[j] + fac[j]*xscale);

```

```

386 del = temp - y[j];
387 while (del == 0.0) {
388     if (fac[j] < FACMAX) {
389         fac[j] *= 100.0;
390         if (fac[j] > FACMAX)
391             fac[j] = FACMAX;
392         temp = (x[j] + fac[j]*xscale);
393         del = temp - x[j];
394     } else {
395         del = THRESH;           /* thresh is nonzero */
396         break;
397     }
398 }
399
400 /* Keep del pointing into region. */
401 if (Fty[j] >= 0.0)
402     del = fabs(del);
403 else
404     del = -fabs(del);
405
406 /* Form a difference approximation to column j of dFdy. */
407 temp = x[j];
408 x[j] += del;
409 kvm_step();
410 rtsiSetdX(si,p);
411 kvm_derivatives();
412 x[j] = temp;
413 difmax = 0.0;
414 rowmax = 0;
415 FdelRowmax = p[0];
416 temp = 1.0 / del;
417 for (i = 0; i < nx; i++) {
418     Fdiff = p[i] - Fty[i];
419     maybe = fabs(Fdiff);
420     if (maybe > difmax) {
421         difmax = maybe;
422         rowmax = i;
423         FdelRowmax = p[i];
424     }
425
426     p[i] = temp * Fdiff;
427 }
428
429 /* Adjust fac for next call to numjac. */
430 if (((FdelRowmax != 0.0) && (Fty[rowmax] != 0.0)) || (difmax == 0.0))
431 {
432     fscale = fabs(FdelRowmax);
433     if (fscale < fabs(Fty[rowmax]))
434         fscale = fabs(Fty[rowmax]);
435     if (difmax <= BL*fscale) {
436         /* The difference is small, so increase the increment. */
437         fac[j] *= 10.0;
438         if (fac[j] > FACMAX)
439             fac[j] = FACMAX;
440     } else if (difmax > BU*fscale) {
441         /* The difference is large, so reduce the increment. */
442         fac[j] *= 0.1;
443         if (fac[j] < FACMIN)
444             fac[j] = FACMIN;
445     }
446 }
447 }
448

```

```

449     rtsiSetSolverComputingJacobian(si,false);
450 }                                     /* end local_numjac */
451
452 /* Function: '<S28>/Evaluate Rule Antecedents' */
453 static real_T trimf(real_T x, const real_T params[3])
454 {
455     real_T y;
456     y = 0.0;
457     if ((params[0] != params[1]) && (params[0] < x) && (x < params[1])) {
458         y = 1.0 / (params[1] - params[0]) * (x - params[0]);
459     }
460
461     if ((params[1] != params[2]) && (params[1] < x) && (x < params[2])) {
462         y = 1.0 / (params[2] - params[1]) * (params[2] - x);
463     }
464
465     if (x == params[1]) {
466         y = 1.0;
467     }
468
469     return y;
470 }
471
472 /* Function: '<S28>/Evaluate Rule Consequents' */
473 static void trimf_k(const real_T x[101], const real_T params[3], real_T
474 y[101])
475 {
476     real_T a;
477     real_T b;
478     real_T c;
479     int32_T i;
480     a = params[0];
481     b = params[1];
482     c = params[2];
483     for (i = 0; i < 101; i++) {
484         y[i] = 0.0;
485         if ((a != b) && (a < x[i]) && (x[i] < b)) {
486             y[i] = 1.0 / (b - a) * (x[i] - a);
487         }
488
489         if ((b != c) && (b < x[i]) && (x[i] < c)) {
490             y[i] = 1.0 / (c - b) * (c - x[i]);
491         }
492
493         if (x[i] == b) {
494             y[i] = 1.0;
495         }
496     }
497 }
498
499 /* Function : '<S186>/Evaluate Rule Consequents' */
500 static void createMamdaniOutputMFCache_dc(const real_T
501 outputSamplePoints[101],
502     real_T outputMFCache[707])
503 {
504     static const real_T b[3] = { 300.0, 316.7, 333.3 };
505
506     static const real_T c[3] = { 316.7, 333.3, 350.0 };
507
508     static const real_T d[3] = { 350.0, 366.7, 383.3 };
509
510     static const real_T e[3] = { 366.7, 383.3, 400.0 };
511

```

```

512 |   real_T tmp[101];
513 |   real_T tmp_0[101];
514 |   real_T tmp_1[101];
515 |   real_T tmp_2[101];
516 |   real_T tmp_3[101];
517 |   real_T tmp_4[101];
518 |   real_T tmp_5[3];
519 |   real_T tmp_6[101];
520 |   int32_T i;
521 |   tmp_5[0] = 283.3;
522 |   tmp_5[1] = 300.0;
523 |   tmp_5[2] = 316.7;
524 |   trimf_k(outputSamplePoints, tmp_5, tmp_6);
525 |   trimf_k(outputSamplePoints, b, tmp_4);
526 |   trimf_k(outputSamplePoints, c, tmp_3);
527 |   tmp_5[0] = 333.3;
528 |   tmp_5[1] = 350.0;
529 |   tmp_5[2] = 366.7;
530 |   trimf_k(outputSamplePoints, tmp_5, tmp_2);
531 |   trimf_k(outputSamplePoints, d, tmp_1);
532 |   trimf_k(outputSamplePoints, e, tmp_0);
533 |   tmp_5[0] = 383.3;
534 |   tmp_5[1] = 400.0;
535 |   tmp_5[2] = 416.7;
536 |   trimf_k(outputSamplePoints, tmp_5, tmp);
537 |   for (i = 0; i < 101; i++) {
538 |       outputMFCache[7 * i] = tmp_6[i];
539 |       outputMFCache[1 + 7 * i] = tmp_4[i];
540 |       outputMFCache[2 + 7 * i] = tmp_3[i];
541 |       outputMFCache[3 + 7 * i] = tmp_2[i];
542 |       outputMFCache[4 + 7 * i] = tmp_1[i];
543 |       outputMFCache[5 + 7 * i] = tmp_0[i];
544 |       outputMFCache[6 + 7 * i] = tmp[i];
545 |   }
546 | }
547 |
548 | /* Function: '<S186>/Evaluate Rule Consequents' */
549 | static int32_T abs_hm(int32_T x)
550 | {
551 |     int32_T y;
552 |     if (x < 0) {
553 |         if (x <= MIN_int32_T) {
554 |             y = MAX_int32_T;
555 |         } else {
556 |             y = -x;
557 |         }
558 |     } else {
559 |         y = x;
560 |     }
561 |
562 |     return y;
563 | }
564 |
565 | /* Function: '<S186>/Evaluate Rule Consequents' */
566 | static real_T evaluateAndMethod_nl(const real_T x[2])
567 | {
568 |     return x[0] * x[1];
569 | }
570 |
571 | /* Function: '<S218>/Evaluate Rule Consequents' */
572 | static void evaluateCommonMembershipFcn_f(const real_T x[101], real_T
573 | y[101])
574 | {

```



```

575     int32_T k;
576     for (k = 0; k < 101; k++) {
577         y[k] = exp(-((x[k] - 433.3) * (x[k] - 433.3)) / 402.1448);
578     }
579 }
580
581 /* Function: '<S218>/Evaluate Rule Consequents' */
582 static void createMamdaniOutputMFCache_d3(const real_T
583 outputSamplePoints[101],
584     real_T outputMFCache[707])
585 {
586     real_T tmp[101];
587     real_T tmp_0[101];
588     real_T tmp_1[3];
589     real_T tmp_2[101];
590     int32_T k;
591     tmp_1[0] = 366.7;
592     tmp_1[1] = 400.0;
593     tmp_1[2] = 433.3;
594     trimf_k(outputSamplePoints, tmp_1, tmp_2);
595     evaluateCommonMembershipFcn_f(outputSamplePoints, tmp_0);
596     tmp_1[0] = 566.7;
597     tmp_1[1] = 600.0;
598     tmp_1[2] = 633.3;
599     trimf_k(outputSamplePoints, tmp_1, tmp);
600     for (k = 0; k < 101; k++) {
601         outputMFCache[7 * k] = tmp_2[k];
602         outputMFCache[1 + 7 * k] = tmp_0[k];
603         outputMFCache[2 + 7 * k] = exp(-((outputSamplePoints[k] - 466.7) *
604             (outputSamplePoints[k] - 466.7)) / 400.445);
605         outputMFCache[3 + 7 * k] = exp(-((outputSamplePoints[k] - 499.5) *
606             (outputSamplePoints[k] - 499.5)) / 399.8792);
607         outputMFCache[4 + 7 * k] = exp(-((outputSamplePoints[k] - 533.3) *
608             (outputSamplePoints[k] - 533.3)) / 402.1448);
609         outputMFCache[5 + 7 * k] = exp(-((outputSamplePoints[k] - 566.7) *
610             (outputSamplePoints[k] - 566.7)) / 400.445);
611         outputMFCache[6 + 7 * k] = tmp[k];
612     }
613 }
614
615 real_T rt_urand_Upu32_Yd_f_pw_snf(uint32_T *u)
616 {
617     uint32_T lo;
618     uint32_T hi;
619
620     /* Uniform random number generator (random number between 0 and 1)
621
622     #define IA      16807                magic multiplier = 7^5
623     #define IM      2147483647          modulus = 2^31-1
624     #define IQ      127773             IM div IA
625     #define IR      2836               IM modulo IA
626     #define S       4.656612875245797e-10 reciprocal of 2^31-1
627     test = IA * (seed % IQ) - IR * (seed/IQ)
628     seed = test < 0 ? (test + IM) : test
629     return (seed*S)
630     */
631     lo = *u % 127773U * 16807U;
632     hi = *u / 127773U * 2836U;
633     if (lo < hi) {
634         *u = 2147483647U - (hi - lo);
635     } else {
636         *u = lo - hi;
637     }

```



```

701     static const real_T f_0[3] = { 250.0, 266.7, 283.3 };
702     static const real_T h_0[24] = { 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0,
703 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.1, 0.15, 0.15, 0.15,
704 0.15, 0.15 };
705     static const int8_T b_2[24] = { 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 7, 6, 5, 4, 3, 2,
706 1, 7, 6, 4, 2, 1, 1, 2, 4, 6, 7 };
707
708     real_T rtb_antecedentOutputs_ob[19];
709     real_T rtb_antecedentOutputs_gc[24];
710     real_T rtb_aggregatedOutputs_i[101];
711     real_T TransferFcn_b;
712     real_T TransferFcn_i;
713     real_T TransferFcn_l;
714     real_T TransferFcn_kc;
715     real_T TransferFcn_l;
716     real_T tmp[3];
717     real_T outputMFCache[2];
718     int8_T b_3;
719     real_T InputConversion_j_idx_0;
720     real_T InputConversion_e_idx_3;
721     int32_T q0;
722     real_T currentTime_tmp;
723     int32_T q0_tmp;
724     if (rtmIsMajorTimeStep(rtM)) {
725         /* set solver stop time */
726         rtsiSetSolverStopTime(&rtM->solverInfo, ((rtM->Timing.clockTick0+1)*
727         rtM->Timing.stepSize0));
728     }                                     /* end MajorTimeStep */
729
730     /* Update absolute time of base rate at minor time step */
731     if (rtmIsMinorTimeStep(rtM)) {
732         rtM->Timing.t[0] = rtsiGetT(&rtM->solverInfo);
733     }
734
735     /* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/ZR' */
736     /* Step: '<S152>/Step' */
737     rtDW.Step_i = !(currentTime_tmp < 0.0);
738
739     /* Step: '<S151>/Step' */
740     rtDW.Step_h = !(currentTime_tmp < 0.0);
741
742     /* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/ZR' */
743
744     /* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/ZS1' */
745     if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
746         rtM->Timing.TaskCounters.TID[6] == 0) {
747         /* Product: '<S178>/Product' incorporates:
748          * Constant: '<S178>/Constant'
749          * RandomNumber: '<S178>/Random Number'
750          */
751         rtDW.Product_h = rtDW.NextOutput_p * 1.62;
752     }
753
754     if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
755         rtM->Timing.TaskCounters.TID[5] == 0) {
756         /* Product: '<S179>/Product1' incorporates:
757          * Constant: '<S179>/Constant1'
758          * RandomNumber: '<S179>/Random Number1'
759          */
760         rtDW.Product1_m = rtDW.NextOutput_pt * 325.0;
761
762         /* Product: '<S177>/Product2' incorporates:
763          * Constant: '<S177>/Constant2'

```

```

764     * RandomNumber: '<S177>/Random Number2'
765     */
766     rtDW.Product2_m = rtDW.NextOutput_b * 325.0;
767 }
768
769 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
770     rtM->Timing.TaskCounters.TID[2] == 0) {
771     /* RandomNumber: '<S180>/Random Number' */
772     rtDW.RandomNumber_i = rtDW.NextOutput_e;
773 }
774
775 /* Step: '<S180>/Step' */
776 rtDW.Step_e = !(currentTime_tmp < 0.0);
777 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
778     rtM->Timing.TaskCounters.TID[5] == 0) {
779     /* Product: '<S181>/Product2' incorporates:
780     * Constant: '<S181>/Constant2'
781     * RandomNumber: '<S181>/Random Number2'
782     */
783     rtDW.Product2_c = rtDW.NextOutput_g * 1.165;
784 }
785
786 /* Outputs for Atomic SubSystem: '<S175>/Fuzzy Logic Controller' */
787 /* DataTypeConversion: '<S186>/InputConversion' incorporates:
788 * Product: '<S180>/Product'
789 * TransferFcn: '<S180>/Transfer Fcn'
790 */
791 InputConversion_e_idx_3 = (-0.9285714285714286 *
792 rtX.TransferFcn_CSTATE_e +
793     100.0 * rtDW.Step_e) * rtDW.RandomNumber_i;
794
795 /* Function: '<S218>/Evaluate Rule Antecedents' incorporates:
796 * DataTypeConversion: '<S218>/InputConversion'
797 * Product: '<S213>/Product'
798 */
799 TransferFcn_i = 0.0;
800 tmp[0] = 233.3;
801 tmp[1] = 250.0;
802 tmp[2] = 266.7;
803 inputMFCache_0[0] = trimf(InputConversion_j_idx_0, tmp);
804 inputMFCache_0[1] = trimf(InputConversion_j_idx_0, f_0);
805 inputMFCache_0[2] = trimf(InputConversion_j_idx_0, e_0);
806 tmp[0] = 283.3;
807 tmp[1] = 300.0;
808 tmp[2] = 316.7;
809 inputMFCache_0[3] = trimf(InputConversion_j_idx_0, tmp);
810 inputMFCache_0[4] = trimf(InputConversion_j_idx_0, d_0);
811 inputMFCache_0[5] = trimf(InputConversion_j_idx_0, c_0);
812 tmp[0] = 333.3;
813 tmp[1] = 350.0;
814 tmp[2] = 366.7;
815 inputMFCache_0[6] = trimf(InputConversion_j_idx_0, tmp);
816 tmp[0] = 0.0;
817 tmp[1] = 5.0;
818 tmp[2] = 10.0;
819 inputMFCache_0[7] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
820 tmp[0] = 5.0;
821 tmp[1] = 10.0;
822 tmp[2] = 15.0;
823 inputMFCache_0[8] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
824 tmp[0] = 10.0;
825 tmp[1] = 15.0;
826 tmp[2] = 20.0;

```

```

827 | inputMFCache_0[9] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
828 | tmp[0] = 15.0;
829 | tmp[1] = 20.0;
830 | tmp[2] = 25.0;
831 | inputMFCache_0[10] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
832 | tmp[0] = 20.0;
833 | tmp[1] = 25.0;
834 | tmp[2] = 30.0;
835 | inputMFCache_0[11] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
836 | tmp[0] = 25.0;
837 | tmp[1] = 30.0;
838 | tmp[2] = 35.0;
839 | inputMFCache_0[12] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
840 | tmp[0] = 30.0;
841 | tmp[1] = 35.0;
842 | tmp[2] = 40.0;
843 | inputMFCache_0[13] = trimf(InputConversion_e_idx_3, tmp);
844 | tmp[0] = 290.0;
845 | tmp[1] = 300.0;
846 | tmp[2] = 310.0;
847 | inputMFCache_0[14] = trimf(rtDW.Product1_p, tmp);
848 | tmp[0] = 300.0;
849 | tmp[1] = 310.0;
850 | tmp[2] = 320.0;
851 | inputMFCache_0[15] = trimf(rtDW.Product1_p, tmp);
852 | tmp[0] = 310.0;
853 | tmp[1] = 320.0;
854 | tmp[2] = 330.0;
855 | inputMFCache_0[16] = trimf(rtDW.Product1_p, tmp);
856 | tmp[0] = 320.0;
857 | tmp[1] = 330.0;
858 | tmp[2] = 340.0;
859 | inputMFCache_0[17] = trimf(rtDW.Product1_p, tmp);
860 | tmp[0] = 330.0;
861 | tmp[1] = 340.0;
862 | tmp[2] = 350.0;
863 | inputMFCache_0[18] = trimf(rtDW.Product1_p, tmp);
864 | tmp[0] = 410.0;
865 | tmp[1] = 415.0;
866 | tmp[2] = 420.0;
867 | inputMFCache_0[19] = trimf(rtDW.Product2, tmp);
868 | tmp[0] = 415.0;
869 | tmp[1] = 420.0;
870 | tmp[2] = 425.0;
871 | inputMFCache_0[20] = trimf(rtDW.Product2, tmp);
872 | tmp[0] = 420.0;
873 | tmp[1] = 425.0;
874 | tmp[2] = 430.0;
875 | inputMFCache_0[21] = trimf(rtDW.Product2, tmp);
876 | tmp[0] = 425.0;
877 | tmp[1] = 430.0;
878 | tmp[2] = 435.0;
879 | inputMFCache_0[22] = trimf(rtDW.Product2, tmp);
880 | tmp[0] = 430.0;
881 | tmp[1] = 435.0;
882 | tmp[2] = 440.0;
883 | inputMFCache_0[23] = trimf(rtDW.Product2, tmp);
884 | for (iy = 0; iy < 24; iy++) {
885 |     InputConversion_e_idx_3 = 1.0;
886 |     if (b_1[iy] != 0) {
887 |         InputConversion_e_idx_3 = inputMFCache_0[b_1[iy] - 1];
888 |     }
889 |

```

```

890     b_3 = b_1[iy + 24];
891     if (b_3 != 0) {
892         InputConversion_e_idx_3 *= inputMFCache_0[b_3 + 6];
893     }
894
895     b_3 = b_1[iy + 48];
896     if (b_3 != 0) {
897         InputConversion_e_idx_3 *= inputMFCache_0[b_3 + 13];
898     }
899
900     b_3 = b_1[iy + 72];
901     if (b_3 != 0) {
902         InputConversion_e_idx_3 *= inputMFCache_0[b_3 + 18];
903     }
904
905     InputConversion_e_idx_3 *= h_0[iy];
906     TransferFcn_i += InputConversion_e_idx_3;
907     rtb_antecedentOutputs_gc[iy] = InputConversion_e_idx_3;
908 }
909
910 /* Function: '<S218>/Evaluate Rule Consequents' incorporates:
911  * Constant: '<S218>/Output Sample Points'
912  */
913 memset(&rtb_aggregatedOutputs_i[0], 0, 101U * sizeof(real_T));
914 createMamdaniOutputMFCache_d3(rtConstP.OutputSamplePoints_Value_m,
915     rtDW.outputMFCache);
916 for (iy = 0; iy < 24; iy++) {
917     if ((q0_tmp < 0) && (b_2[iy] < MIN_int32_T - q0_tmp)) {
918         q0 = MIN_int32_T;
919     } else if ((q0_tmp > 0) && (b_2[iy] > MAX_int32_T - q0_tmp)) {
920         q0 = MAX_int32_T;
921     } else {
922         q0 = q0_tmp + b_2[iy];
923     }
924
925     for (inputID = 0; inputID < 101; inputID++) {
926         outputMFCache[0] = rtDW.outputMFCache[(7 * inputID + q0) - 1];
927         outputMFCache[1] = rtb_antecedentOutputs_gc[iy];
928         InputConversion_e_idx_3 = evaluateAndMethod_nl(outputMFCache);
929         rtb_aggregatedOutputs_i[inputID] = (rtb_aggregatedOutputs_i[inputID]
930 +
931         InputConversion_e_idx_3) - rtb_aggregatedOutputs_i[inputID] *
932         InputConversion_e_idx_3;
933     }
934 }
935
936 /* Function: '<S218>/Defuzzify Outputs' incorporates:
937  * Constant: '<S218>/Output Sample Points'
938  * Function: '<S218>/Evaluate Rule Antecedents'
939  */
940 if (TransferFcn_i == 0.0) {
941     rtDW.defuzzifiedOutputs = 500.0;
942 } else {
943     rtDW.defuzzifiedOutputs = 0.0;
944     TransferFcn_i = rtb_aggregatedOutputs_i[0];
945     for (iy = 0; iy < 100; iy++) {
946         TransferFcn_i += rtb_aggregatedOutputs_i[iy + 1];
947     }
948
949     if (TransferFcn_i == 0.0) {
950         rtDW.defuzzifiedOutputs = 500.0;
951     } else {
952         for (iy = 0; iy < 101; iy++) {

```

```

953         rtDW.defuzzifiedOutputs += rtConstP.OutputSamplePoints_Value_m[iy]
954 *
955         rtb_aggregatedOutputs_i[iy];
956     }
957
958     rtDW.defuzzifiedOutputs *= 1.0 / TransferFcn_i;
959 }
960 }
961
962 /* End of Function: '<S218>/Defuzzify Outputs' */
963 /* End of Outputs for SubSystem: '<S209>/Fuzzy Logic Controller' */
964 /* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/ZS2' */
965
966 /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/ZO' */
967 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
968     rtM->Timing.TaskCounters.TID[2] == 0) {
969     /* Update for RandomNumber: '<S15>/Random Number' */
970     rtDW.NextOutput_a3 = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_lb) *
971         0.0036760731104690351 + 1.0;
972
973     /* Update for RandomNumber: '<S21>/Random Number' */
974     rtDW.NextOutput_hj = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_pu) *
975         0.0011180339887498949 + 1.0;
976
977     /* Update for RandomNumber: '<S20>/Random Number1' */
978     rtDW.NextOutput_gy = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_ah) *
979         0.0031622776601683794 + 1.0;
980 }
981
982 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
983     rtM->Timing.TaskCounters.TID[3] == 0) {
984     /* Update for RandomNumber: '<S19>/Random Number' */
985     rtDW.NextOutput_k = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_li) *
986         0.0023570226039551583 + 1.0;
987
988     /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/Z01' */
989     /* Update for RandomNumber: '<S40>/Random Number' */
990     rtDW.NextOutput_gg = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_ev) *
991         0.011180339887498949 + 1.0;
992
993     /* End of Update for SubSystem: '<Root>/Z01' */
994 }
995
996 /* End of Update for SubSystem: '<Root>/ZO' */
997
998 /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/Z01' */
999 /* Update for TransportDelay: '<S45>/Transport Delay' */
1000 {
1001     real_T **uBuffer =
1002 (real_T**) &rtDW.TransportDelay_PWORK.TUbufferPtrs[0];
1003     real_T **tBuffer =
1004 (real_T**) &rtDW.TransportDelay_PWORK.TUbufferPtrs[1];
1005     real_T simTime = rtM->Timing.t[0];
1006     rtDW.TransportDelay_IWORK.Head = ((rtDW.TransportDelay_IWORK.Head <
1007         (rtDW.TransportDelay_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
1008         (rtDW.TransportDelay_IWORK.Head+1) : 0);
1009     if (rtDW.TransportDelay_IWORK.Head == rtDW.TransportDelay_IWORK.Tail)
1010 {
1011         rtDW.TransportDelay_IWORK.Tail = ((rtDW.TransportDelay_IWORK.Tail <
1012             (rtDW.TransportDelay_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
1013             (rtDW.TransportDelay_IWORK.Tail+1) : 0);
1014     }
1015 }

```

```

1016     (*tBuffer)[rtDW.TransportDelay_IWORK.Head] = simTime;
1017     (*uBuffer)[rtDW.TransportDelay_IWORK.Head] = rtb_Product_n;
1018 }
1019
1020 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1021     rtM->Timing.TaskCounters.TID[3] == 0) {
1022     /* Update for RandomNumber: '<S44>/Random Number' */
1023     rtDW.NextOutput_c = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_ir) *
1024         0.0031622776601683794 + 1.0;
1025 }
1026
1027 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1028     rtM->Timing.TaskCounters.TID[1] == 0) {
1029     /* Update for RandomNumber: '<S45>/Random Number' */
1030     rtDW.NextOutput_hk = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_bh) *
1031         0.0004719875816456644 + 1.0;
1032 }
1033
1034 /* End of Update for SubSystem: '<Root>/Z01' */
1035
1036 /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/Z02' */
1037 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1038     rtM->Timing.TaskCounters.TID[3] == 0) {
1039     /* Update for RandomNumber: '<S74>/Random Number' */
1040     rtDW.NextOutput_jb = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_lk) *
1041         0.013483997249264841 + 1.0;
1042 }
1043
1044 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1045     rtM->Timing.TaskCounters.TID[1] == 0) {
1046     /* Update for RandomNumber: '<S79>/Random Number' */
1047     rtDW.NextOutput_h = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_e) *
1048         0.000582671582316751 + 1.0;
1049 }
1050
1051 /* Update for RateLimiter: '<S79>/Rate Limiter' */
1052 if (rtDW.LastMajorTimeA_a == (rtInf)) {
1053     rtDW.LastMajorTimeA_a = currentTime_tmp;
1054     rtDW.PrevYA_i = TransferFcn1;
1055 } else if (rtDW.LastMajorTimeB_j == (rtInf)) {
1056     rtDW.LastMajorTimeB_j = currentTime_tmp;
1057     rtDW.PrevYB_j = TransferFcn1;
1058 } else if (rtDW.LastMajorTimeA_a < rtDW.LastMajorTimeB_j) {
1059     rtDW.LastMajorTimeA_a = currentTime_tmp;
1060     rtDW.PrevYA_i = TransferFcn1;
1061 } else {
1062     rtDW.LastMajorTimeB_j = currentTime_tmp;
1063     rtDW.PrevYB_j = TransferFcn1;
1064 }
1065
1066 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1067     rtM->Timing.TaskCounters.TID[3] == 0) {
1068     /* Update for RandomNumber: '<S78>/Random Number' */
1069     rtDW.NextOutput_nh = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_ez) *
1070         0.031622776601683791 + 1.0;
1071
1072     /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/ZPN' */
1073     /* Update for RandomNumber: '<S119>/Random Number' */
1074     rtDW.NextOutput_eu = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_i2) *
1075         0.0017149858514250887 + 1.0;
1076
1077     /* End of Update for SubSystem: '<Root>/ZPN' */
1078 }

```



```

1079
1080 /* End of Update for SubSystem: '<Root>/Z02' */
1081
1082 /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/ZPN' */
1083 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1084     rtM->Timing.TaskCounters.TID[2] == 0) {
1085     /* Update for RandomNumber: '<S126>/Random Number' */
1086     rtDW.NextOutput_jh = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_j) *
1087         0.00031622776601683789 + 1.0;
1088
1089     /* Update for RandomNumber: '<S125>/Random Number' */
1090     rtDW.NextOutput_lt = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_k) *
1091     0.01 +
1092     1.0;
1093 }
1094
1095 /* Update for RateLimiter: '<S126>/Rate Limiter' */
1096 if (rtDW.LastMajorTimeA == (rtInf)) {
1097     rtDW.LastMajorTimeA = currentTime_tmp;
1098     rtDW.PrevYA = TransferFcn_kc;
1099 } else if (rtDW.LastMajorTimeB == (rtInf)) {
1100     rtDW.LastMajorTimeB = currentTime_tmp;
1101     rtDW.PrevYB = TransferFcn_kc;
1102 } else if (rtDW.LastMajorTimeA < rtDW.LastMajorTimeB) {
1103     rtDW.LastMajorTimeA = currentTime_tmp;
1104     rtDW.PrevYA = TransferFcn_kc;
1105 } else {
1106     rtDW.LastMajorTimeB = currentTime_tmp;
1107     rtDW.PrevYB = TransferFcn_kc;
1108 }
1109
1110 if (rtmIsMajorTimeStep(rtM) &&
1111     rtM->Timing.TaskCounters.TID[3] == 0) {
1112     /* Update for RandomNumber: '<S124>/Random Number' */
1113     rtDW.NextOutput_a = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_p) *
1114     0.0032387513781564781 + 1.0;
1115
1116     /* Update for RandomNumber: '<S123>/Random Number' */
1117     rtDW.NextOutput_bz = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_c4) *
1118     0.010380684981717497 + 1.0;
1119
1120     /* Update for Atomic SubSystem: '<Root>/ZR' */
1121     /* Update for RandomNumber: '<S147>/Random Number' */
1122     rtDW.NextOutput_d = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_b) *
1123     0.00082199493652678564 + 1.0;
1124
1125     /* End of Update for SubSystem: '<Root>/ZR' */
1126 }
1127
1128 /* Update absolute time for base rate. The "clockTick0" counts the
1129 number of times the code of this task has been executed. The absolute time
1130 is the multiplication of "clockTick0" and "Timing.stepSize0". Size of
1131 "clockTick0" ensures timer will not overflow during the application
1132 lifespan selected. */
1133 ++rtM->Timing.clockTick0;
1134 rtM->Timing.t[0] = rtsiGetSolverStopTime(&rtM->solverInfo);
1135
1136 {
1137     /* Update absolute timer for sample time: [2.5s, 0.0s] */
1138     /* The "clockTick1" counts the number of times the code of this task
1139 has been executed. The resolution of this integer timer is 2.5, which is
1140 the step size of the task. Size of "clockTick1" ensures timer will not
1141 overflow during the application lifespan selected.

```

```

1142     */
1143     rtM->Timing.clockTick1++;
1144 }
1145
1146     rate_scheduler();
1147 } /* end MajorTimeStep */
1148 }
1149
1150 /* Derivatives for root system: '<Root>' */
1151 void kvm_derivatives(void)
1152 {
1153     XDot *_rtXdot;
1154     _rtXdot = ((XDot *) rtM->derivs);
1155
1156     /* Derivatives for Atomic SubSystem: '<Root>/Z0' */
1157     /* Derivatives for TransferFcn: '<S21>/Transfer Fcn' */
1158     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_ir = 0.0;
1159     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_ir += -0.010526315789473684 *
1160     rtX.TransferFcn_CSTATE_ir;
1161     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_ir += rtDW.Step_g0;
1162
1163     /* Derivatives for TransferFcn: '<S20>/Transfer Fcn' */
1164     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_n = 0.0;
1165     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_n += -0.011111111111111112 *
1166     rtX.TransferFcn_CSTATE_n;
1167     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_n += rtDW.Step_m;
1168
1169     /* End of Derivatives for SubSystem: '<Root>/Z0' */
1170
1171     /* Derivatives for Atomic SubSystem: '<Root>/Z01' */
1172     /* Derivatives for TransferFcn: '<S45>/Transfer Fcn' */
1173     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_k = 0.0;
1174     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_k += -0.0066666666666666671 *
1175     rtX.TransferFcn_CSTATE_k;
1176     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_k += rtDW.Step_ar;
1177
1178     /* Derivatives for TransferFcn: '<S45>/Transfer Fcn1' */
1179     _rtXdot->TransferFcn1_CSTATE_e = 0.0;
1180     _rtXdot->TransferFcn1_CSTATE_e += -0.00625 * rtX.TransferFcn1_CSTATE_e;
1181
1182     /* End of Derivatives for SubSystem: '<Root>/Z01' */
1183     /* Derivatives for TransferFcn: '<S213>/Transfer Fcn' */
1184     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_p = 0.0;
1185     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_p += -0.022222222222222223 *
1186     rtX.TransferFcn_CSTATE_p;
1187     _rtXdot->TransferFcn_CSTATE_p += rtDW.Step_p;
1188
1189     /* End of Derivatives for SubSystem: '<Root>/ZS2' */
1190 }
1191
1192 /* Model initialize function */
1193 void kvm_initialize(void)
1194 {
1195     /* Registration code */
1196
1197     /* initialize non-finites */
1198     rt_InitInfAndNaN(sizeof(real_T));
1199
1200     {
1201         /* Setup solver object */
1202         rtsiSetSimTimeStepPtr(&rtM->solverInfo, &rtM->Timing.simTimeStep);
1203         rtsiSetTPtr(&rtM->solverInfo, &rtmGetTPtr(rtM));
1204         rtsiSetStepSizePtr(&rtM->solverInfo, &rtM->Timing.stepSize0);

```

```

1205     rtsiSetdXPtr(&rtM->solverInfo, &rtM->derivs);
1206     rtsiSetContStatesPtr(&rtM->solverInfo, (real_T **) &rtM->contStates);
1207     rtsiSetNumContStatesPtr(&rtM->solverInfo, &rtM->Sizes.numContStates);
1208     rtsiSetNumPeriodicContStatesPtr(&rtM->solverInfo,
1209         &rtM->Sizes.numPeriodicContStates);
1210     rtsiSetPeriodicContStateIndicesPtr(&rtM->solverInfo,
1211         &rtM->periodicContStateIndices);
1212     rtsiSetPeriodicContStateRangesPtr(&rtM->solverInfo,
1213         &rtM->periodicContStateRanges);
1214     rtsiSetErrorStatusPtr(&rtM->solverInfo, (&rtmGetErrorStatus(rtM)));
1215     rtsiSetRTModelPtr(&rtM->solverInfo, rtM);
1216 }
1217
1218 rtsiSetSimTimeStep(&rtM->solverInfo, MAJOR_TIME_STEP);
1219 rtM->intgData.x0 = rtM->odeX0;
1220 rtM->intgData.f0 = rtM->odeF0;
1221 rtM->intgData.x1start = rtM->odeX1START;
1222 rtM->intgData.f1 = rtM->odeF1;
1223 rtM->intgData.Delta = rtM->odeDELTA;
1224 rtM->intgData.E = rtM->odeE;
1225 rtM->intgData.fac = rtM->odeFAC;
1226
1227 /* initialize */
1228 {
1229     int_T i;
1230     real_T *f = rtM->intgData.fac;
1231     for (i = 0; i < (int_T)(sizeof(rtM->odeFAC)/sizeof(real_T)); i++) {
1232         f[i] = 1.5e-8;
1233     }
1234 }
1235
1236 rtM->intgData.DFDX = rtM->odeDFDX;
1237 rtM->intgData.W = rtM->odeW;
1238 rtM->intgData.pivots = rtM->odePIVOTS;
1239 rtM->intgData.xtmp = rtM->odeXTMP;
1240 rtM->intgData.ztmp = rtM->odeZTMP;
1241 rtM->intgData.isFirstStep = true;
1242 rtsiSetSolverExtrapolationOrder(&rtM->solverInfo, 4);
1243 rtsiSetSolverNumberNewtonIterations(&rtM->solverInfo, 1);
1244 rtM->contStates = ((X *) &rtX);
1245 rtsiSetSolverData(&rtM->solverInfo, (void *)&rtM->intgData);
1246 rtsiSetSolverName(&rtM->solverInfo, "odel4x");
1247 rtmSetTPtr(rtM, &rtM->Timing.tArray[0]);
1248 rtM->Timing.stepSize0 = 2.5;
1249
1250 /* Start for Atomic SubSystem: '<Root>/Z01' */
1251
1252 /* Start for TransportDelay: '<S45>/Transport Delay' */
1253 {
1254     real_T *pBuffer = &rtDW.TransportDelay_RWORK.TUbufferArea[0];
1255     rtDW.TransportDelay_IWORK.Tail = 0;
1256     rtDW.TransportDelay_IWORK.Head = 0;
1257     rtDW.TransportDelay_IWORK.Last = 0;
1258     rtDW.TransportDelay_IWORK.CircularBufSize = 1024;
1259     pBuffer[0] = 1000.0;
1260     pBuffer[1024] = rtM->Timing.t[0];
1261     rtDW.TransportDelay_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
1262     rtDW.TransportDelay_PWORK.TUbufferPtrs[1] = (void *) &pBuffer[1024];
1263 }
1264
1265 /* End of Start for SubSystem: '<Root>/Z01' */
1266
1267 /* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/Z01' */

```

```

1268 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S40>/Random Number' */
1269 rtDW.RandSeed_ev = 1144108930U;
1270 rtDW.NextOutput_gg = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_ev) *
1271     0.011180339887498949 + 1.0;
1272
1273 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S44>/Random Number' */
1274 rtDW.RandSeed_ir = 1144108930U;
1275 rtDW.NextOutput_c = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_ir) *
1276     0.0031622776601683794 + 1.0;
1277
1278 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S45>/Random Number' */
1279 rtDW.RandSeed_bh = 1144108930U;
1280 rtDW.NextOutput_hk = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_bh) *
1281     0.0004719875816456644 + 1.0;
1282
1283 /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S45>/Transfer Fcn' */
1284 rtX.TransferFcn_CSTATE_k = 0.0;
1285
1286 /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S45>/Transfer Fcn1' */
1287 rtX.TransferFcn1_CSTATE_e = 0.0;
1288
1289 /* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/Z01' */
1290
1291 /* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/ZPN' */
1292 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S119>/Random Number' */
1293 rtDW.RandSeed_i2 = 1144108930U;
1294 rtDW.NextOutput_eu = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_i2) *
1295     0.0017149858514250887 + 1.0;
1296
1297 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S126>/Random Number' */
1298 rtDW.RandSeed_j = 1144108930U;
1299 rtDW.NextOutput_jh = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_j) *
1300     0.00031622776601683789 + 1.0;
1301
1302 /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S126>/Transfer Fcn' */
1303 rtX.TransferFcn_CSTATE_l = 0.0;
1304
1305 /* InitializeConditions for RateLimiter: '<S126>/Rate Limiter' */
1306 rtDW.LastMajorTimeA = (rtInf);
1307 rtDW.LastMajorTimeB = (rtInf);
1308
1309 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S125>/Random Number' */
1310 rtDW.RandSeed_k = 1144108930U;
1311 rtDW.NextOutput_lt = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed_k) * 0.01
1312 + 1.0;
1313
1314 /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S125>/Transfer Fcn' */
1315 rtX.TransferFcn_CSTATE_b = 0.0;
1316
1317 /* InitializeConditions for RateLimiter: '<S125>/Rate Limiter' */
1318 rtDW.LastMajorTimeA_p = (rtInf);
1319 rtDW.LastMajorTimeB_c = (rtInf);
1320
1321 /* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/ZS1' */
1322
1323 /* SystemInitialize for Atomic SubSystem: '<Root>/ZS2' */
1324 /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S207>/Transfer Fcn' */
1325 rtX.TransferFcn_CSTATE = 0.0;
1326
1327 /* InitializeConditions for RandomNumber: '<S210>/Random Number' */
1328 rtDW.RandSeed = 1144108930U;
1329 rtDW.NextOutput = rt_nrand_Upu32_Yd_f_pw_snf(&rtDW.RandSeed) *
1330     0.00816496580927726 + 1.0;

```

```

1331 |
1332 | /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S210>/Transfer Fcn' */
1333 | rtX.TransferFcn_CSTATE_d = 0.0;
1334 |
1335 | /* InitializeConditions for TransferFcn: '<S213>/Transfer Fcn' */
1336 | rtX.TransferFcn_CSTATE_p = 0.0;
1337 |
1338 | /* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/ZS2' */
1339 | }

```

Лістинг Д.3 — Лістинг програми мовою С, файл ert_main.c:

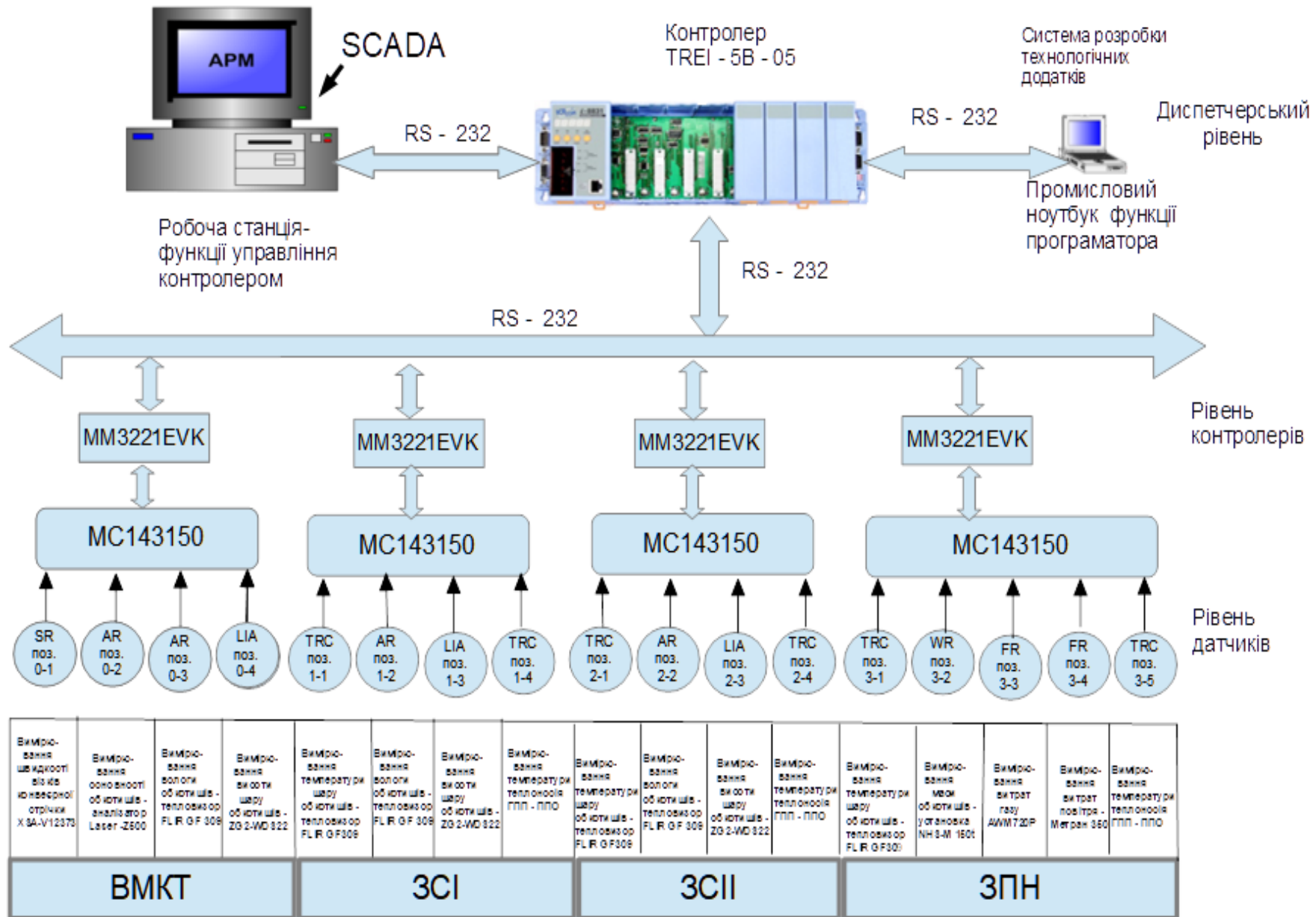
```

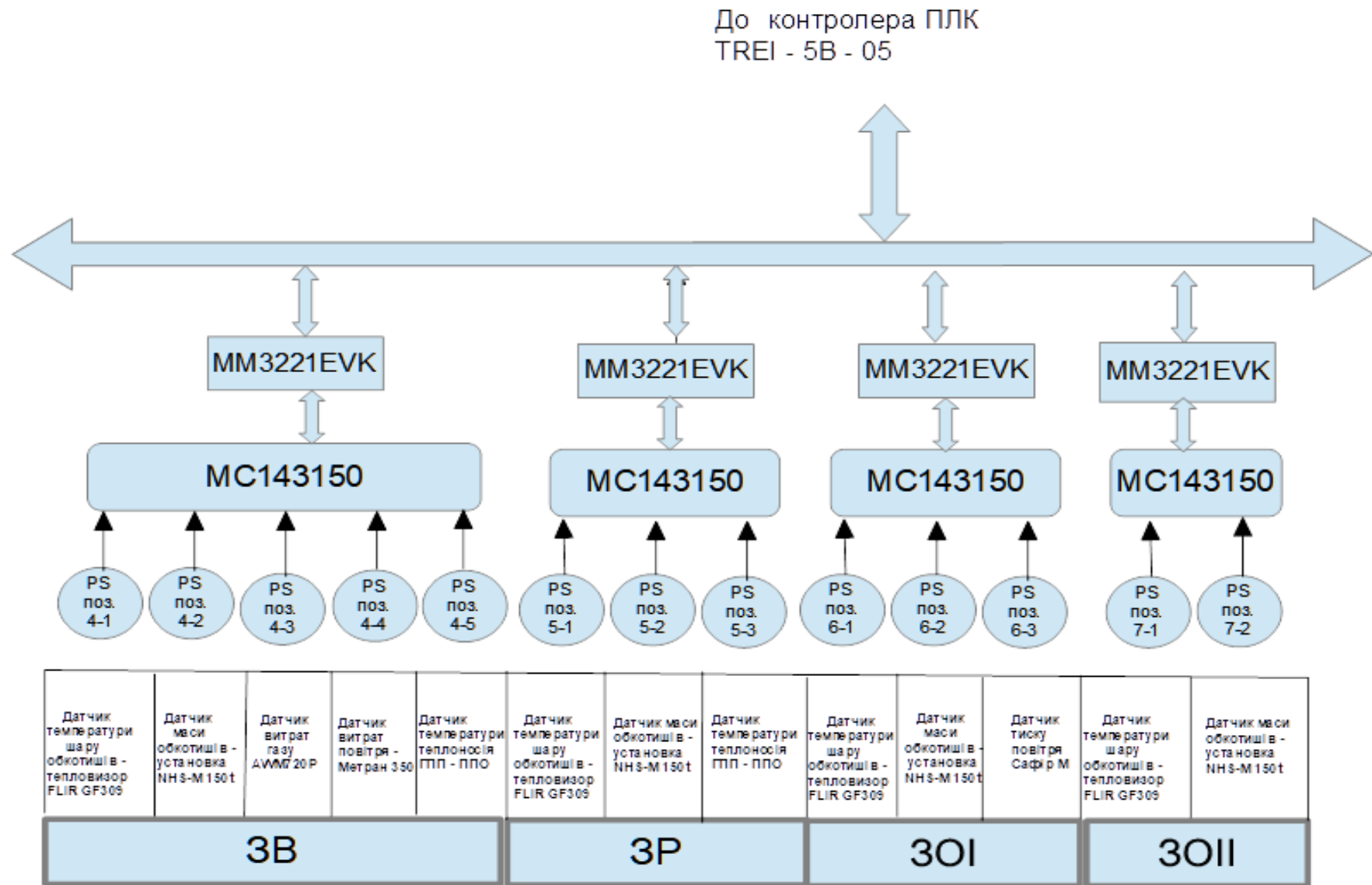
1 | #include <stddef.h>
2 | #include <stdio.h> /* This ert_main.c example uses
3 | printf/fflush */
4 | #include "kvm.h" /* Model's header file */
5 | #include "rtwtypes.h"
6 |
7 | /*
8 | * Associating rt_OneStep with a real-time clock or interrupt service
9 | routine is what makes the generated code "real-time". The function
10 | rt_OneStep is always associated with the base rate of the model. Subrates
11 | are managed by the base rate from inside the generated code.
12 | Enabling/disabling interrupts and floating point context switches are
13 | target specific. This example code indicates where these should take place
14 | relative to executing the generated code step function. Overrun behavior
15 | should be tailored to your application needs. This example simply sets an
16 | error status in the real-time model and returns from rt_OneStep.*/
17 | void rt_OneStep(void);
18 | void rt_OneStep(void)
19 | {
20 |     static boolean_T OverrunFlag = false;
21 |
22 |     /* Disable interrupts here */
23 |
24 |     /* Check for overrun */
25 |     if (OverrunFlag) {
26 |         rtmSetErrorStatus(rtm, "Overrun");
27 |         return;
28 |     }
29 |
30 |     OverrunFlag = true;
31 |
32 |     /* Save FPU context here (if necessary) */
33 |     /* Re-enable timer or interrupt here */
34 |     /* Set model inputs here */
35 |
36 |     /* Step the model for base rate */
37 |     kvm_step();
38 |
39 |     /* Get model outputs here */
40 |
41 |     /* Indicate task complete */
42 |     OverrunFlag = false;
43 | }
44 |
45 | /*
46 | * "main" function illustrates what is required application code to
47 | initialize, execute, and terminate the generated code. Attaching
48 | rt_OneStep to a real-time clock is target specific. This example
49 | illustrates how you do this relative to initializing the model.

```

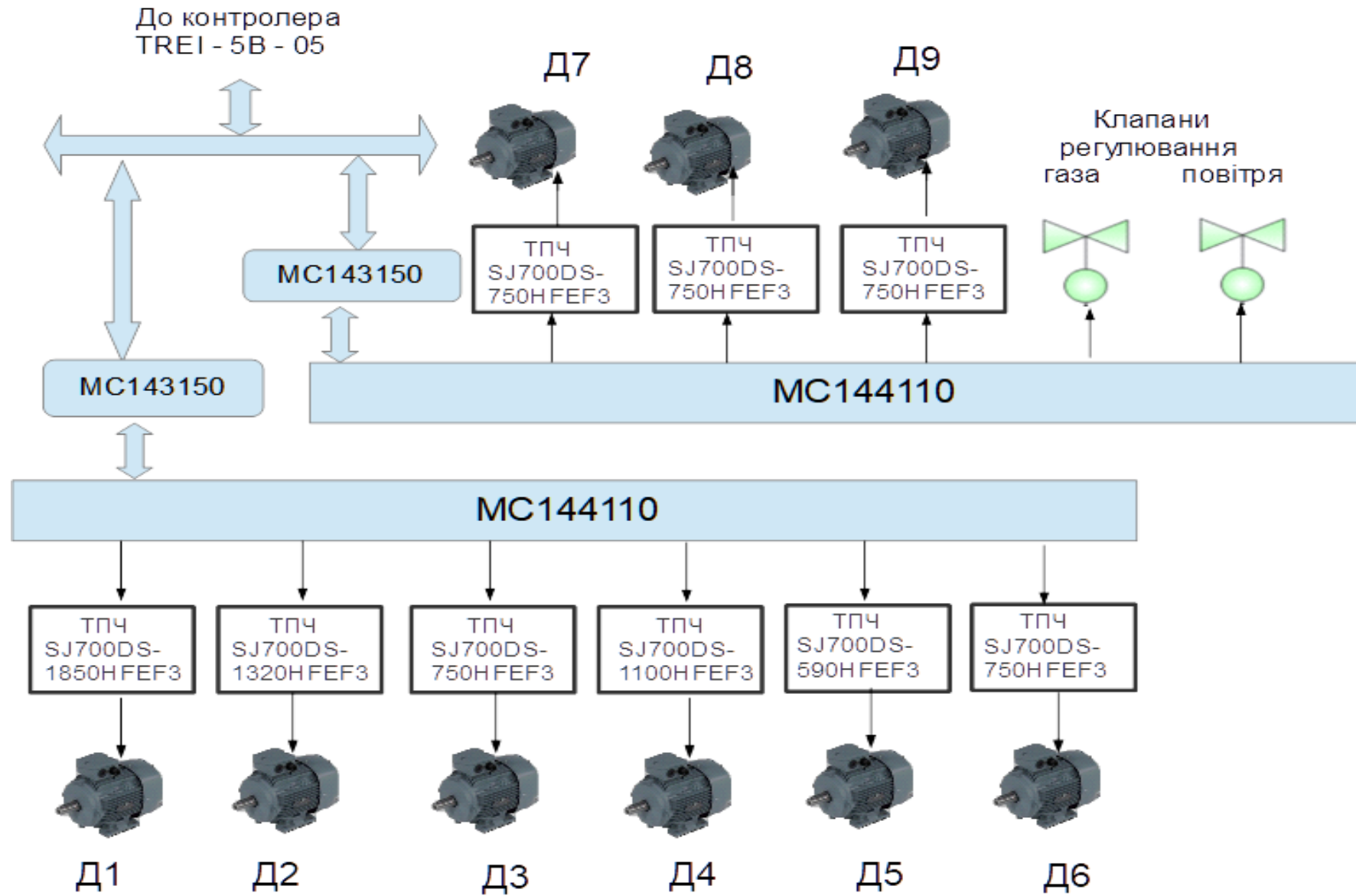
```
50  */
51  int_T main(int_T argc, const char *argv[])
52  {
53      /* Unused arguments */
54      (void) (argc);
55      (void) (argv);
56
57      /* Initialize model */
58      kvm_initialize();
59
60      /* Simulating the model step behavior (in non real-time) to
61       * simulate model behavior at stop time.
62       */
63      while ((rtmGetErrorStatus(rtM) == (NULL)) && !rtmGetStopRequested(rtM))
64      {
65          rt_OneStep();
66      }
67
68      /* Disable rt_OneStep() here */
69      return 0;}
```


Додаток II





Продовження дод. И



ДОДАТОК К

Акти впровадження

К.1. Акт впровадження МЕТІНВЕСТ



ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ПІВНІЧНИЙ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ
КОМБІНАТ»
ПРАТ «ПІВНІГЗК», м. Кремень Рів
Тернопільський район
Дніпропетровська область, 50079, Україна
sevgok.metinvestholding.com
Тел: +38 056 400 63 09
Факс: +38 056 400 70 62
E-mail: sevgok@metinvestholding.com

В. о. генерального директора

ПРАТ «ПІВНІГЗК»

 Скачков А.А.

« 12 » жовтня 2019р.

М.П.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії Митрофанова Олександра Вячеславовича

Державне підприємство Північний ГЗК підтверджує, що в проектах використовуються результати отримані Митрофановим Олександром Вячеславовичем при проведенні дисертаційного дослідження «Автоматизація процесу термічного оброблення обкотишів при керуванні газоповітряними потоками на основі нечіткої логіки», а саме комплексну математичку модель, що апроксимує динаміку термічного процесу оброблення обкотишів у технологічних зонах КВМ, на основі вирішення систем нечітких функцій і принципів її параметричної ідентифікації та виконання дослідження якості моделювання, швидкості збіжності алгоритмів та обчислювального навантаження на цифровий пристрій керування, використання експериментальних досліджень якості системи з нечіткими параметрами теплоносіїв газоповітряних потоків при керуванні процесом термічного оброблення матеріалів, на основі новітньої технології віртуальних пристроїв,

для побудови яких використати програмне середовище графічного програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) компанії National Instruments.

Математична модель процесу керування процесу термічного процесу оброблення обкотишів у технологічних зонах конвеєрних машинах шляхом урахування впливу нечітких параметрів температур теплоносіїв газоповітряних потоків, дозволило уточнити закономірності розподілу температур теплоносіїв за технологічними зонам при змінах фізико-хімічного складу, вологості й основності сирих обкотишів, рівня шару сирих обкотишів на конвеєрних візках, швидкості переміщення конвеєрних візків та інших. При впровадженні обґрунтованих у дисертаційній роботі методів, структур і алгоритмів забезпечує підвищення ефективності діючого обладнання при одночасному використанні зазначених величин у якості керуючих дій процесу показники використання від загальних витрат електричної енергії зменшуються на 5.73 %, а природнього газу до 1.1 м³/т.

Головний механік _____
ПРАТ «ПІВНІЗК»



В.В. Макаренко

Начальник участка, участка _____
автоматизации системы
технологическим процессом



Н. А. Скрипка

МЕТІНВЕСТ
К.2. Довідка МЕТІНВЕСТ



ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО
«ПІВНІЧНИЙ ПІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИЙ
КОМБІНАТ»
ПРАТ «ПІВНІЗК», м. Кропиві Рів
Тернівський район
Дніпропетровська область, 50079, Україна
sevgok.metinvestholding.com
Тел.: +38 056 400 63 09
Факс: +38 056 400 70 62
E-mail: sevgok@metinvestholding.com

Затверджую

В. о. генерального директора

ПРАТ «ПІВНІЗК»



Скачков А.А.

« 10 » жовтня 2019р.

М.П.

ДОВІДКА

про участь в науково - дослідній роботі
Митрофанова Олександра Вячеславовича

Державне підприємство Північний ГЗК підтверджує, що в науково - дослідній роботі «Теплотехнічне обстеження стану опалювальної машини ПрАТ "Північний ГЗК" для досягнення продуктивності 1 т/м² на годину. Модернізація теплотехнічної схеми» приймав участь Митрофанов Олександр Вячеславович який проводив дослідження виконання теплотехнічних розрахунків теплообміну і газодинаміки в шарі, параметрів газоповітряних потоків опалювальної машини, що оптимізують розрахунки, з метою збільшення питомої продуктивності опалювальної машини LURGI-278A; розробку (уточнення) технічних рішень по збільшенню питомої

продуктивності обпалювальної машини LURGI-278A до 1 т / м2 на годину з збереженням і підвищенням якісних характеристик готових окатишів.

В ході виконання роботи були виконані теплотехнічні розрахунки теплообміну і газодинаміки в шарі, параметрів газоповітряних потоків обпалювальної машини, що оптимізують розрахунки, з метою збільшення питомої продуктивності; розроблені (уточнені) технічні рішення по збільшенню питомої продуктивності обпалювальної машини LURGI-278A до 1 т / м2 на годину з збереженням і підвищенням якісних характеристик готових окатишів.

В результаті реалізації розроблених технічних рішень по модернізації теплотехнічної схеми обпалювальної машини LURGI-278A будуть досягнуті наступні техніко-економічні показники її роботи (таблиця)

Найменування показника	Значення
Продуктивність обпалювальної машини, т / год	278
Продуктивність обпалювальної машини, т / рік	17,19
Питома витрата електроенергії на ТДУ кВт год / т	41,55

Головний механік _____
ПРАТ «ПІВНІЗК»



В.В. Макаренко

Начальник участка, участка _____
автоматизации системы
технологическим процессом



Н. А. Скрипка

К.3. Довідка АТ «НВО «ВНДІкомпрессормаш»



АО «НПАО «ВНИИкомпрессормаш»
 Частное акционерное общество
 «Научно-производственное акционерное общество
 «ВНИИкомпрессормаш»
 40020, Украина, г. Сумы, проспект Курский, 6
 код ЄГРПОУ 00220434
 тел.: +38 (0542) 674-156, факс: +38 (0542) 674-179
 E-mail: info@vniikompressormash.com.ua
 www.nicmas.com
 www.nicmas-market.com



03.10.19 № 04/00-004413

на № _____

Затверджую:

Директор

Татусько А.С.

« ____ » 20 19 р.



ДОВІДКА

АТ «НВАО «ВНДІкомпрессормаш» підтверджує, що в проекті «Поставка комплексу обладнання із компримування, підготовки завантаження природного газу в автомобільний транспорт та розвантаження із подаванням в газотранспортну систему» по договору № ЛГВ-701/11-18 від 07.08.2018р. Митрофанов Олександр Вячеславович виконував консультаційні послуги по розробці технологічної схеми та проведення розрахунків по створенню оптимального теплообмінного режиму, що створювався комплексом обладнання при компримуванні природного газу. В ході розрахунків було використано програмне середовище графічного програмування LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) компанії National Instruments.

Завідуючий конструкторським відділом
 поршневих компресорних установок

Братушка В.В.

Затверджую

Проректор з наукової роботи

В.С. Моркун

2020 р.



Довідка

про використання результатів дисертаційної роботи
Митрофанова Олександра Вячеславовича

«Автоматизація процесу керування термічним обробленням обкотишів на конвеєрній машині з використанням нечіткої логіки» у навчальному процесі Криворізького національного університету м. Кривий Ріг

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи «Автоматизація процесу керування термічним обробленням обкотишів на конвеєрній машині з використанням нечіткої логіки», що виконана аспірантом кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Митрофановим Олександром Вячеславовичем, впроваджені у навчальний процес факультету інформаційних технологій Криворізького національного університету для студентів спеціальностей: 122 «Комп'ютерні науки» та 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» при проведенні лекційних, лабораторних і практичних занять з дисциплін:

- «Інтелектуальні системи керування комп'ютерно-інтегрованим виробництвом», а саме: моделювання статичних і динамічних режимів роботи пов'язаних між собою технологічних об'єктів з використанням нечіткої логіки, методики вибору структури і налаштувань алгоритмів ідентифікації нечітких моделей;
- «Технології розподілених систем та паралельних обчислень», а саме: принципи формування нечіткого керування на основі узгодженої взаємної дії окремих технологічних об'єктів для забезпечення оптимальних енерговитрат;
- «Теорія автоматичного керування», а саме: використання теорії нечіткої логіки, апаратно-програмна реалізація нечітких регуляторів, що забезпечують керування окремими технологічними об'єктами і об'єктом в цілому для забезпечення показників якості готової продукції;
- «Автоматизація технологічних процесів та виробництв»: визначення технічних параметрів технологічних об'єктів і технологічного процесу для побудови систем автоматичного керування в умовах нечіткої і неповної інформації для досягнення необхідних якісних вихідних характеристик.

При цьому використовувались матеріали наукових публікацій, серед них:

1. Митрофанов О.В. Удосконалення процесу керування термічним обробленням залізородних окатишів у технологічній зоні попереднього нагрівання випалювальної машині конвеєрного типу // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2020. – № 6/1(56). – С. 34-39.

2. Lobov V., Lobova K., Mytrofanov O. (2019) Determining the influence of parameters for gasair flows on the thermal process of producing iron ore pellets. Easternuropean journal of enterprise technologies, 2, 43 – 54. (SCOPUS).

3. Lobov V., Lobova K., Mytrofanov A., Mytrofanov V. (2018) Simulation of a gas and air flow exhausted by production equipment. Easternuropean journal of enterprise technologies, 8, 33 – 42. (SCOPUS).

4. Митрофанов О. В. Автоматизоване керування газотеплоносійними потоками на конвеєрній випалювальній машині // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. — 2019. — № 2. — С. 149 – 154.

Використання у навчальному процесі факультету інформаційних технологій Криворізького національного університету матеріалів дисертаційної роботи Митрофанова Олександра Вячеславовича дозволило підвищити якість підготовки студентів.

В. о. завідувача навчального
відділу



С.Л. Івашура

В. о. декана
факультету інформаційних технологій
к. т. н., доцент



І.О. Музики

Завідувач кафедри автоматизації,
комп'ютерних наук і технологій
д. т. н., професор

Н.В. Моркун