

Ключевые слова: *динамика жидкости, уравнения Навье-Стокса, вычислительная гидродинамика, многофазное течение, компьютерная модель, модель распределенного многофазного течения, дисперсная модель, функция фазового поля, уравнение переноса, барботирование, циркуляционное течение, вихри Маффата, зоны застоя.*

Ostapenko A. A., Lipunov D. A.

SIMULATION OF MULTIPHASE FLOWS USING MODERN ENGINEERING PACKAGES

The physics of multiphase flows, mathematical models of homogeneous and heterogeneous flows are considered in this work. The state of modern computational fluid dynamics and possibilities of modern engineering packages for computer modeling are analyzed. There are two approaches that can be used to model multiphase flows: distributed flow models and dispersed models. The possibilities of configured physical interfaces of the Comsol Multiphysics package, which implement methods of modeling multiphase flows, are considered: systems of equations embedded in them, their possibilities and limitations, areas of application, accuracy of interphase boundary position determination, possibility of turbulence modeling. The directives of a model choice of a multiphase flow depending on the set task are formulated. The problem is set and a dispersed model is built to study the mixing of the liquid in a closed container when injecting the gas phase from below, using the Bubble Flow interface of the Comsol package. The stages of setting up the physical interface, setting the initial and boundary conditions, construction of the calculation grid are described. The physical process was studied on the basis of the obtained results: diagrams of the volume concentration of the gas phase and diagrams of the modulus of velocity of the liquid phase with flow lines. The conclusion is made about the formation of a circulating flow with a large area of circulation inside and vortices of Maffat reverse circulation in the corners. The flow pattern, the time of flow transition to the steady state, possible zones of fluid stagnation are determined.

Keywords: *fluid dynamics, Navier-Stokes equation, computational fluid dynamics, multiphase flow, computer model, distributed multiphase flow model, dispersed model, phase field function, transfer equation, bubbling, circulating flow, Maffat vortices, stagnation zones.*

Рекомендована до публікації: д-р фіз.-мат. наук, проф. Холькін О. М.

Стаття надійшла 15.11.2020 р.

УДК 625.143.2:004

Щербаков С. В., Ісаєва Ю. С.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ УПРАВЛІННЯ НАГРІВАННЯМ РЕЙОК В РЕЙКОГАРТІВНІЙ МАШИНІ

До числа основних завдань будь-якого металургійного виробництва слід віднести зниження собівартості і підвищення якості продукції, що випускається. Найважливішим напрямком виробництва рейок є збільшення їх якості та довговічності, що пов'язано з

тенденцією підвищення вантажонапруженості на залізничному транспорті та зростаючою конкуренцією на світовому ринку. У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на підвищення якості рейок, а також скорочення витрат на їх виробництво є важливими і актуальними.

На сьогоднішній день в світі виробляється понад 6 млн. тонн залізничних рейок. В Україні основним виробником рейок є комбінат ПрАТ «МК «Азовсталь», який щорічно випускає до 245 тис. тонн рейок. Рейки виробляються чотирьох категорій: вища, I, II, і III, з яких три перших поставляються в термічно зміцненому стані з нагріванням струмами високої частоти (СВЧ).

Існуюча система АСУТП рейкогартівних машин ПрАТ «МК «Азовсталь» має ряд істотних недоліків. Серед них: відсутність автоматизованого управління індукційним нагрівом рейок, відсутність автоматизованого управління процесом стикування і розстикування рейок, ручне введення завдання в систему управління витратою води на зону первинного охолодження, моральне і фізичне старіння апаратної частини АСУТП. Усунення цих недоліків має стати пріоритетним найближчим часом для підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності продукції, що виробляється, на світовому ринку.

У даній статті розглядається проблема відсутності локальної системи автоматичного регулювання (ЛСАР) нагрівання рейок. В роботі побудована математична модель нагріву рейок, на основі якої можна створити ефективну САУ на базі сучасних контролерів. У даній моделі були розраховані оптимальні настройки регулятора управління нагрівом, побудовані перехідні процеси. Використання даної моделі при наступній модернізації виробництва дозволить підвищити якість продукції шляхом усунення можливої людської помилки і дозволить стабілізувати температуру рейки в зоні нагріву з необхідною точністю.

Ключові слова: рейкогартівна машина, РГМ, Matlab, регулятор, нагрів рейок, нагрів за допомогою СВЧ, САУ нагріву.

Постановка проблеми. Існуюча система управління електричним обладнанням комплексу термічного загартування має ряд істотних недоліків, головним з яких є моральне і фізичне старіння елементної бази, в зв'язку з цим неможливо реалізувати більш ефективні методи управління процесом загартування. Крім цього, в існуючій системі регулювання потужності, що підводиться до індукторів, здійснюється в ручному режимі, помилка технолога може привести до порушення технологічного процесу загартування і стати причиною виникнення браку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Через унікальність процесу загартування рейок струмами високої частоти на рейкогартівних машинах, подібних встановленої у рейкобалковому цеху ПрАТ «МК «Азовсталь», не тільки в Україні, а й на всьому пострадянському просторі, наукових досліджень в даній області існує обмежена кількість.

В роботі [1] автор розглядає основні напрямки розробок щодо вдосконалення технології виробництва рейок і пропонує проект модернізації рейкового виробництва на ПрАТ «МК «Азовсталь». На жаль, дана робота не зачіпає сферу автоматизації, а більша частина уваги приділена технології виробництва.

Роботи [2, 3] Слухоцького А. Є. пояснюють принципи роботи індукторів, що використано для розробки математичної моделі, представленої нижче.

В роботі [4] описується нагрівання металу струмами високої частоти, що аналогічно способу нагріву рейок на рейкогартівній машині ПрАТ «МК «Азовсталь».

Метою даної роботи є пошук рішень по оптимізації процесу нагріву рейок і оптимальних налаштувань ПД-регулятора, що керує індукційним нагріванням струмами високої частоти.

Виклад основного матеріалу. Аналізуючи експериментальні перехідні характеристики (рис. 1) процесу нагріву можна визначити вид і характер передавальної функції, тобто отримати математичну модель нагріву.

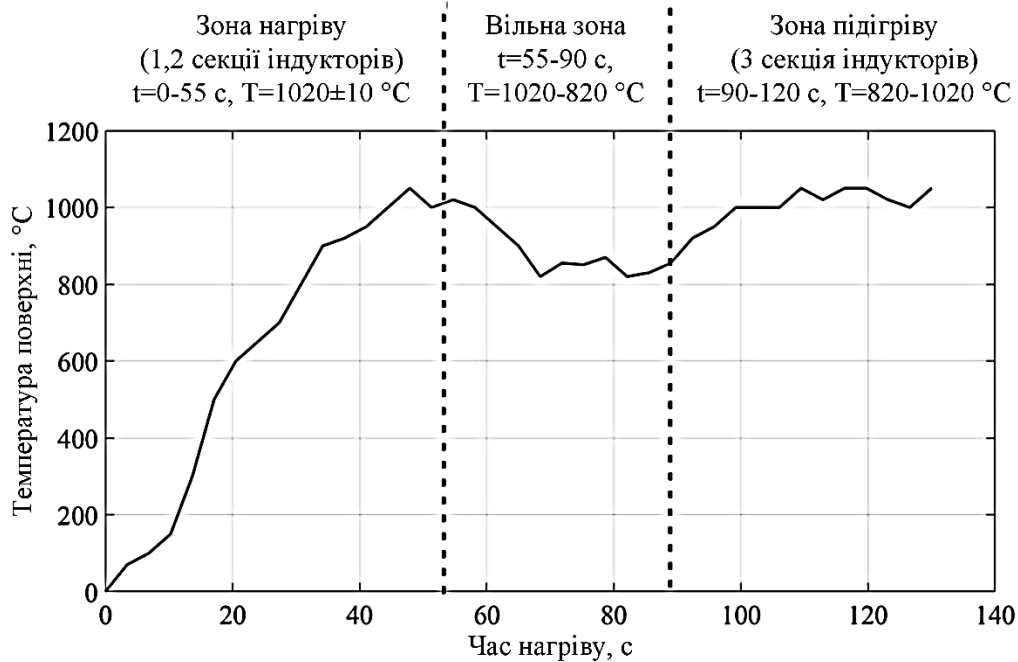


Рисунок 1 – Перехідний процес нагріву рейок

Технологічний процес нагріву головки рейки можна розділити на 3 зони.

Зона нагріву. При цьому температура поверхні рейки підвищується до 1020 ± 10 °C. Подається максимальна потужність при проходженні рейки через першу групу індукторів протягом 55 с.

Зона, вільна від нагрівання. У ній головка рейки піддається короткочасному (25-30 с) охолодженню на повітрі, в результаті чого її температура знижується до 820 ± 10 °C.

Зона підігріву. Нагрівання поверхні рейки в цій зоні відбувається з 820 °C до 1020 ± 10 °C, у другій групі індукторів, потужність індукторів знижена в порівнянні з першою групою, температура поверхні головки в цій зоні підтримується постійною.

Для забезпечення стійкої роботи системи автоматичного управління з задовільними показниками якості потрібно розрахувати оптимальні значення параметрів регулюючого пристрою. Для цього, в першу чергу, необхідно визначити статичні і динамічні характеристики об'єкта управління.

У загальному вигляді об'єкт управління розглядається як ланка, що має вихідну координату $y(t)$, яка є керованою змінною, і вхідну змінну $x(t)$, яка є керуючим впливом.

Математичною моделлю об'єкта є вираз, що визначає залежність між вихідною і вхідною змінними:

$$y(t) = F[x(t)]; \tag{1}$$

інакше модель об'єкта може бути представлена його передавальною функцією:

$$W_0(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}; \quad (2)$$

де p - оператор Лапласа;

$X(p)$ - зображення вхідної змінної в операторній формі;

$Y(p)$ - зображення вихідної координати в операторній формі.

На практиці об'єкт управління апроксимується ланкою з передавальною функцією не вище 2-го порядку з запізненням.

Типові рівняння, що описують об'єкт управління з самовирівнюванням, можуть бути представлені у вигляді диференціальних рівнянь з постійними коефіцієнтами.

Найбільш простим і ефективним способом ідентифікації об'єкта управління є використання пакета математичного моделювання Matlab.

Вихідними даними є графік температури поверхні рейки, зображений на рис. 2. Дані отримані в результаті вимірів на діючій гартівній машині РГМ-4 струмку № 12 РБЦ ПрАТ «МК «Азовсталь».

Сумарна потужність, що підводиться до трьох секцій РЗС $\approx 1103,7$ кВт (73,6 % від максимальної потужності), Р1С $\approx 364,5$ кВт (72,9 %), Р2С $\approx 354,5$ кВт (70,9 %), Р3С ≈ 368 кВт (77 %). Швидкість рейки $V = 42,5$ мм/с. Представимо ці дані у вигляді графіків (рис. 2).

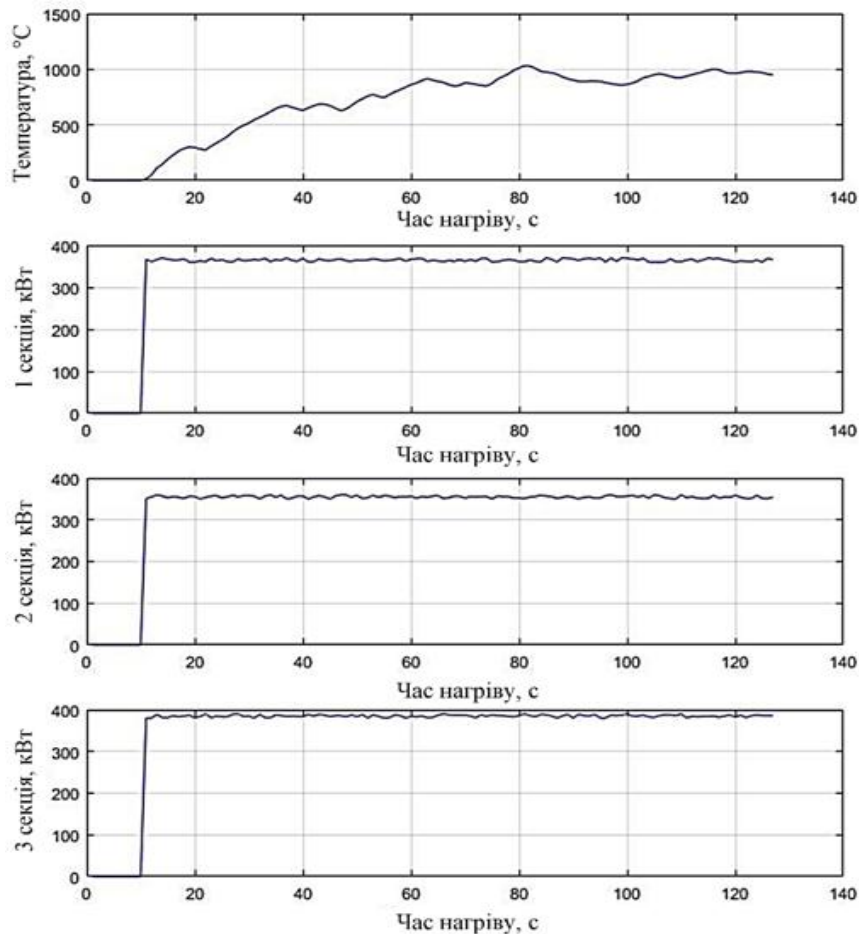


Рисунок 2 – Потужність індукторів і температура поверхні (12 струмок РГМ-4)

Побудуємо графіки сумарної потужності і температури в процентах, верхня межа вимірювання температури – 1200 °С, сумарна вихідна потужність індукторів - 1500 кВт (3 × 500) (рис. 3).

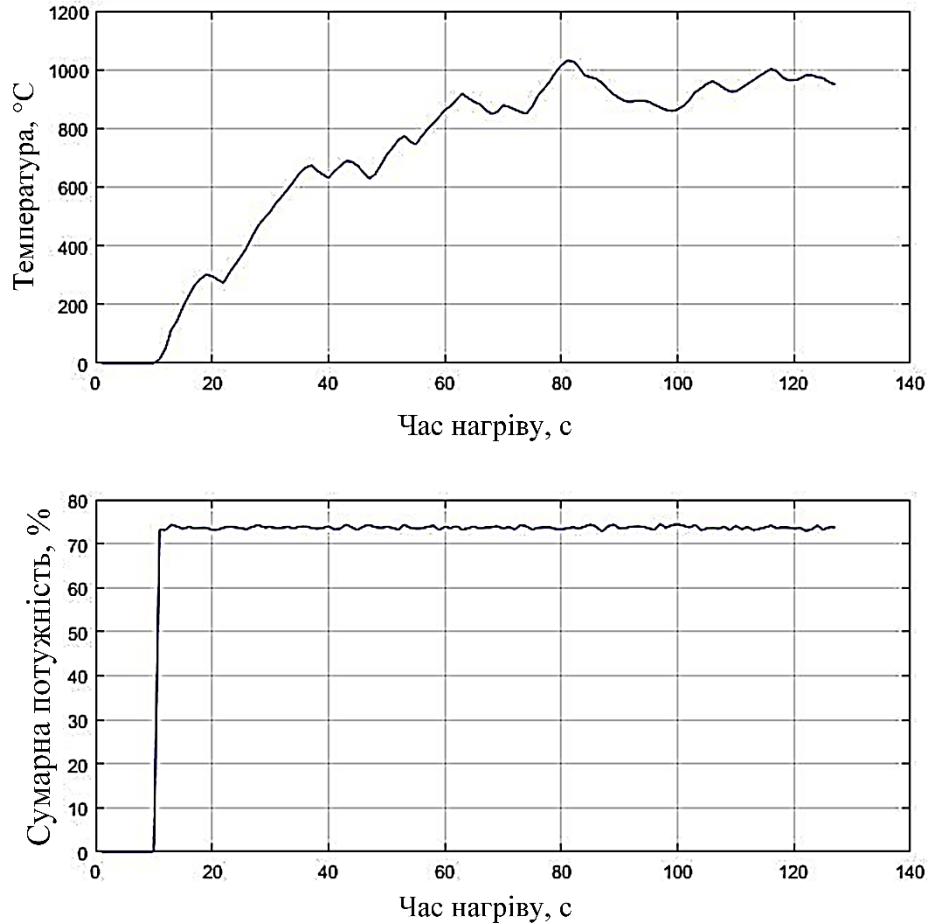


Рисунок 3 – Температура поверхні рейки і потужність, що підводиться до індукторів

Вхід об'єкта управління - сумарна активна потужність (%).

Вихідний об'єкт управління - температура поверхні рейки (%).

Математична модель об'єкта управління у вигляді передавальної функції (рис. 4). Тип вхідного сигналу - ступінчастий.

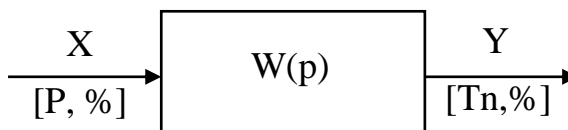


Рисунок 4 – Передавальна функція

Для ідентифікації об'єкта скористаємося пакетом Matlab IdentificationTool (рис. 5).

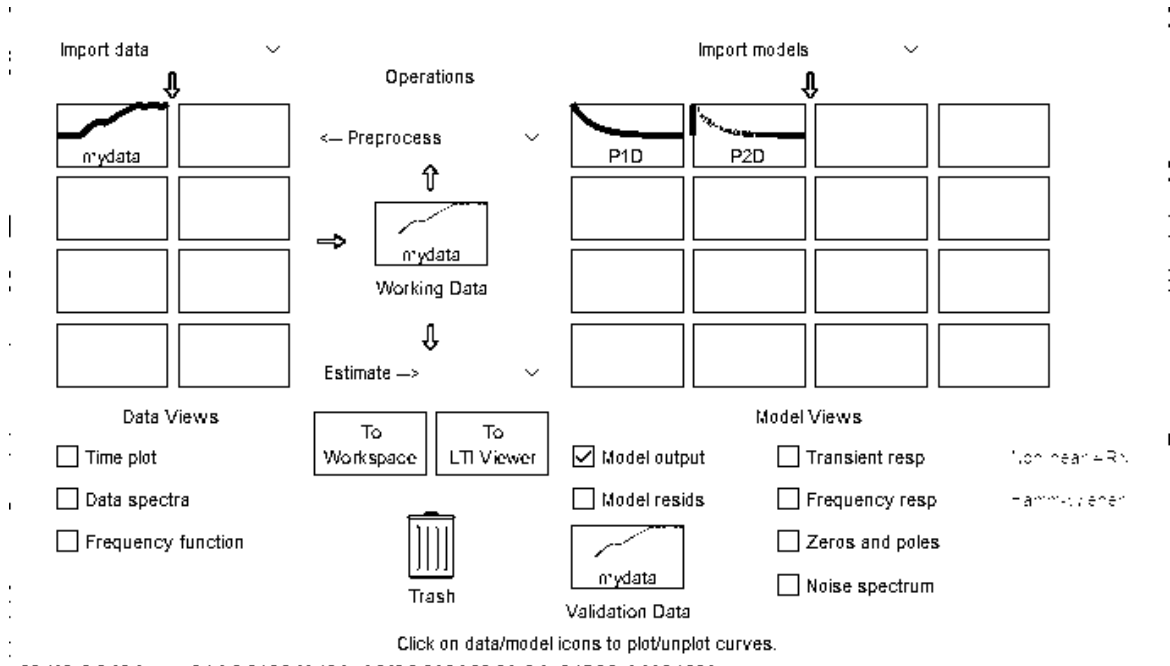


Рисунок 5 – Інтерфейс програми Matlab Identification Tool

По виду перехідного процесу можна зробити висновок, що крива на малюнку 3 належить статичному об'єкту. Модель об'єкта управління будемо шукати у вигляді аперіодичної ланки першого порядку без запізнювання.

В результаті ідентифікації отримані наступні результати (рис. 6).

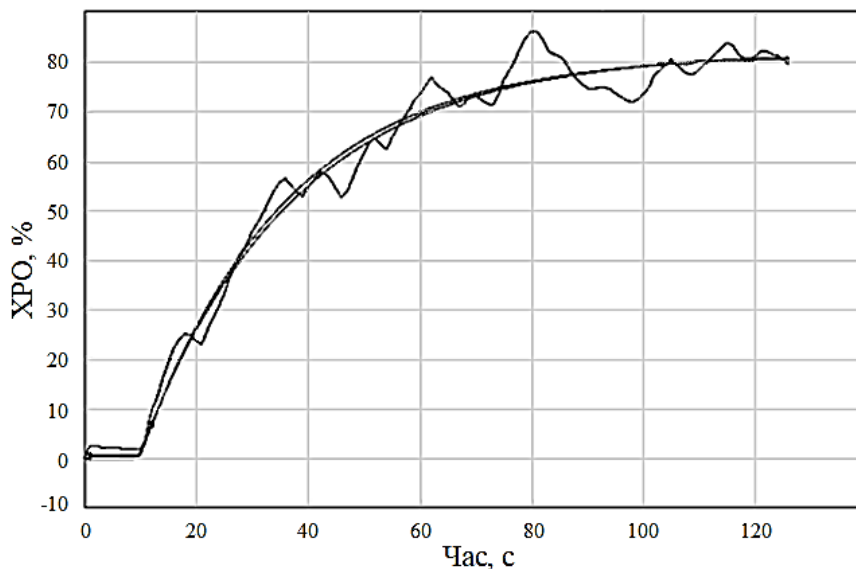


Рисунок 6 – Порівняльний аналіз передавальних функцій

Передавальна функція, аперіодична ланка 1 порядку:

$$W(p) = \frac{1,1025}{1 + 25,883 \cdot p}; \quad (3)$$

Відсоток відповідності 86,24 %, середньоквадратична помилка MSE = 12,94.

Передавальна функція, аперіодична ланка 2 порядку:

$$W(p) = \frac{1,1108 \cdot \exp(0,066 \cdot p)}{(1 + 27,494 \cdot p) \cdot (1 + 0,13625 \cdot p)}; \quad (4)$$

Відсоток відповідності 85,69 %, середньоквадратична помилка MSE = 13,99.

Представимо модель об'єкта управління у вигляді аперіодичної ланки першого порядку, так як дана модель має найменшу середньоквадратичну помилку.

Після визначення параметрів моделі об'єкта регулювання слід перейти до вибору типу регулятора.

Зміна температури в часі залежить від багатьох факторів: сили струму і його частоти, магнітних, електричних і теплофізичних властивостей металу, що нагрівається. Вплив зовнішніх збурень значний, тому температуру потрібно підтримувати з високою точністю. Не можна допускати динамічних коливань (перегріву рейки вище 1200 °С). В даному випадку набагато важливіша швидкість перехідного процесу. Тому для нашої задачі будемо використовувати ПІ-регулятор.

Пропорційно-інтегральний ПІ-регулятор має два параметри налаштування. Це один з найбільш поширених типів регуляторів в промислових системах автоматизованого управління. У програмі Matlab Simulink даний регулятор являє собою підсистему, тобто він утворений за допомогою більш простих блоків. Внутрішня структура регулятора показана на рисунку 7.

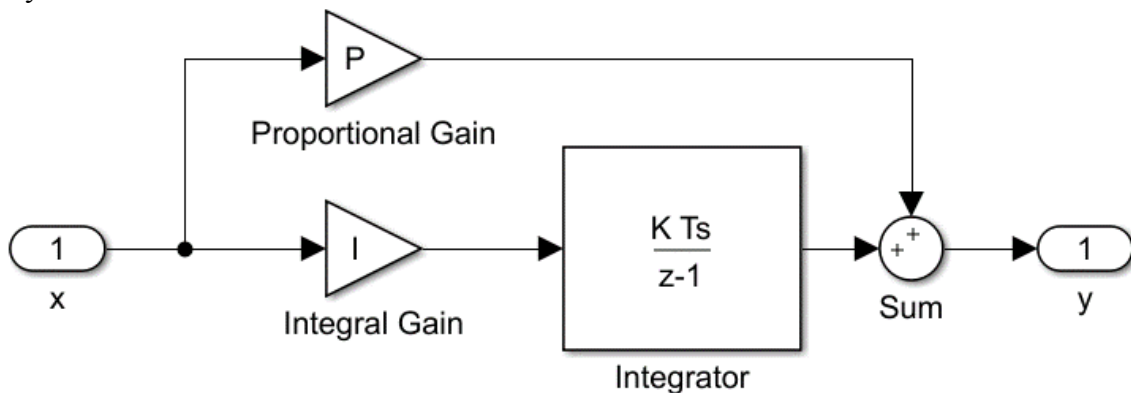


Рисунок 7 – Структура блоку ПІ-регулятора

Коефіцієнти - параметри налаштування цього типу регулятора (коефіцієнт посилення і час інтегрування).

Передавальна функція ПІ-регулятора включає суму пропорційної і інтегральної складової і має вигляд:

$$W(p) = k_p + \frac{1}{T_i \cdot p}; \quad (5)$$

де k_p - коефіцієнт посилення,
 T_i - час інтегрування,
 p – оператор Лапласа.

Використовуючи пакет Matlab Simulink, представимо спрощену модель управління потужністю індуктора за даними температури поверхні рейки, а також для наочності об'єднаємо кілька логічно-пов'язаних блоків в один блок (рис. 8).

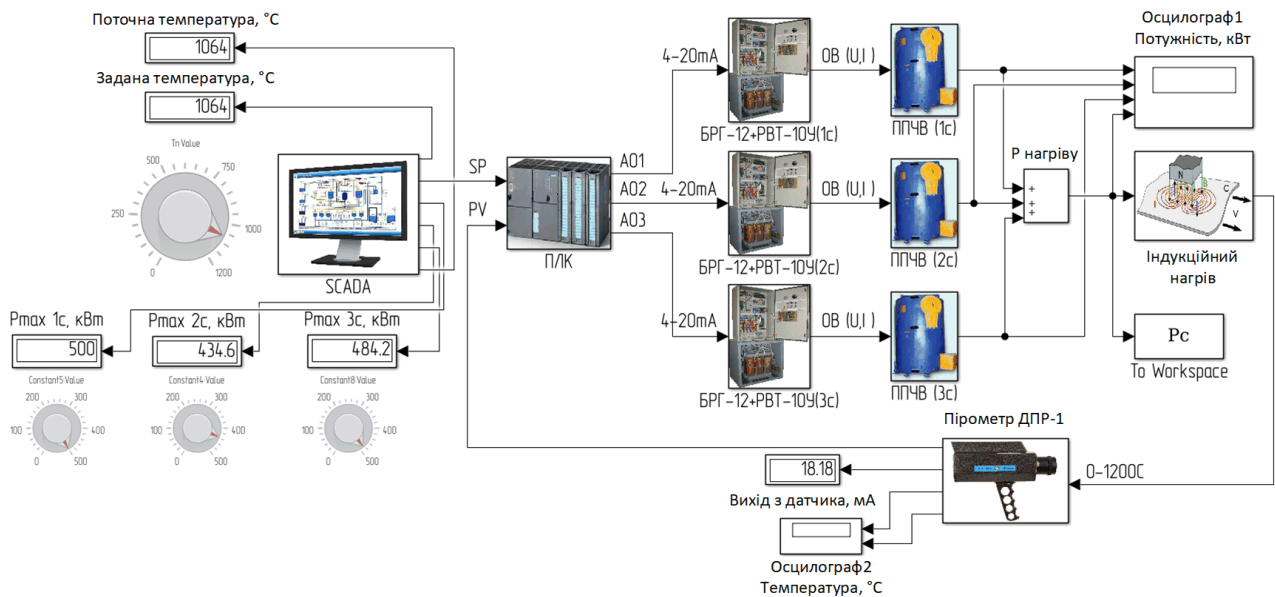


Рисунок 8 – САУ індукційного нагріву (згрупована)

Для автоматичної настройки ПІ-регулятора скористаємося функцією PID Tuner. В результаті отримана наступна передавальна функція регулятора:

$$W(p) = 9,2958 + \frac{1}{0,3591 \cdot p}; \quad (6)$$

Додатково скористуємося інструментом оптимізації налаштувань регулятора за заданою формою перехідного процесу.

Для вирішення завдання оптимізації додамо в модель блок Check Step Response Characteristics.

Отримаємо оптимальні настройки ПІ-регулятора:

$$W(p) = 12,386 + \frac{1}{1,0316 \cdot p}; \quad (7)$$

Остаточно приймаємо ці налаштування. На рисунку 9 показаний перехідний процес при оптимізованих налаштуваннях.

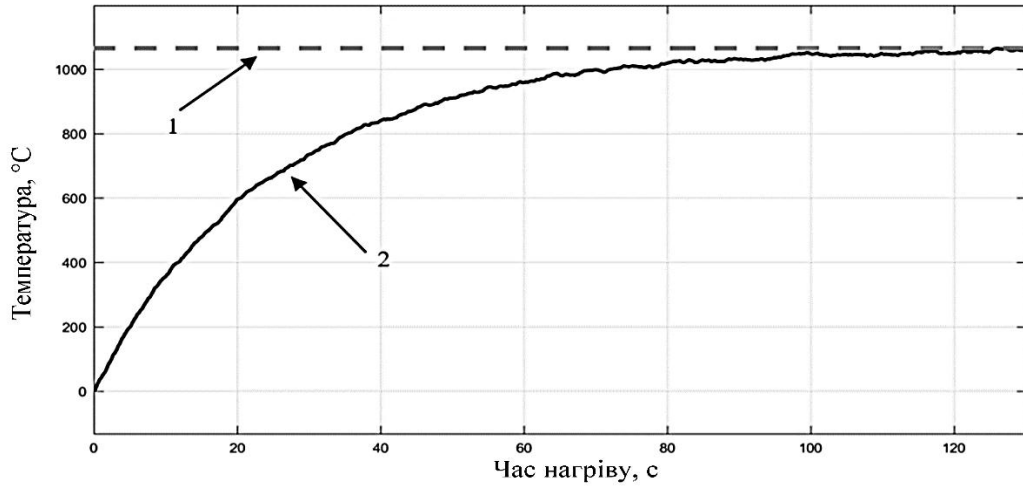


Рисунок 9 – Перехідний процес (графік температури)
1 - Завдання (SP), 2 - Поточна температура з пірометра ДПР-1

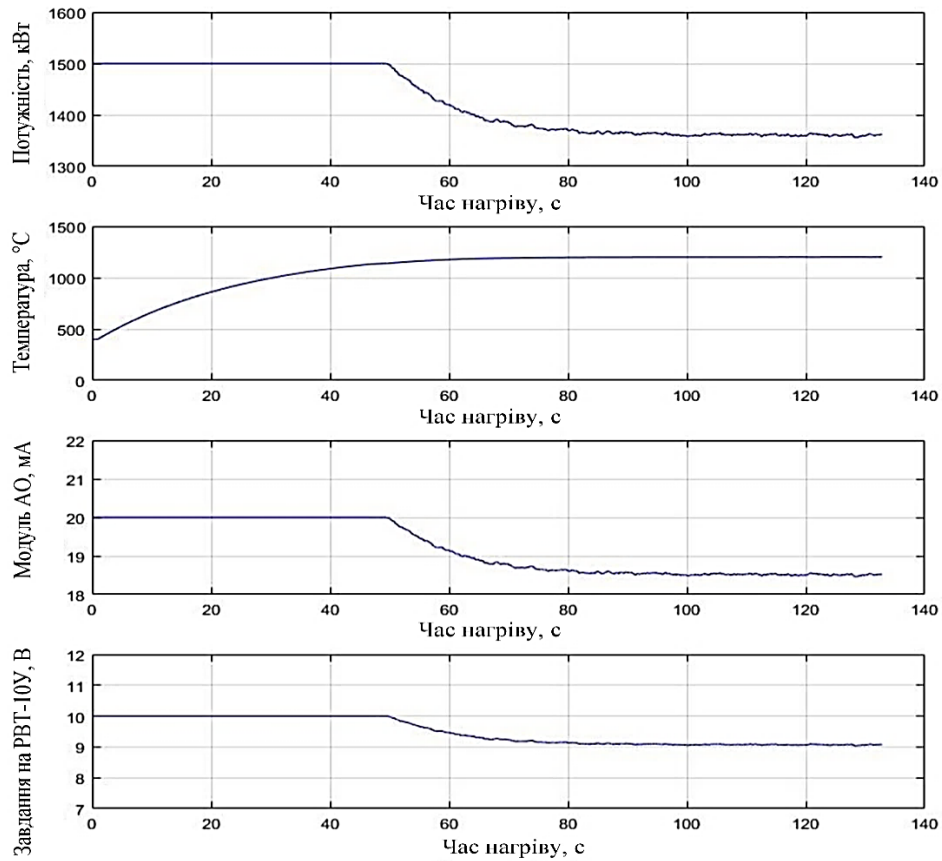


Рисунок 10 – Дані з осцилографа Simulink

Дані, отримані в результаті моделювання в середовищі Matlab Simulink, представлені на рисунку 10. Показано процес нагріву холодної рейки до заданої температури в автоматичному режимі роботи.

ВИСНОВКИ

В даній статті проведено аналіз експериментальних перехідних характеристик процесу нагріву головки рейки. За допомогою пакета математичного моделювання Matlab отримана модель об'єкта управління у вигляді передавальної функції - аперіодична ланка першого порядку.

В пакеті Matlab Simulink побудована спрощена модель системи автоматизованого управління індукційним нагрівом. За допомогою функції PID Tuner і блоку оптимізації Check Step Response Characteristics проведено аналіз системи і отримані оптимальні настройки регулятора потужності.

Перелік використаних джерел:

1. Скобло, Т. С. Производство поверхностно-закаленных рельсов с нагрева токами высокой частоты. Технологии производства и упрочнения. Оборудование. Теоретические основы процессов нагрева ТВЧ и охлаждения. Конструкционная прочность. Эксплуатационные испытания. Повреждаемость рельсов в пути. Неразрушающий контроль качества : монография / Т. С. Скобло, В. Е. Сапожков, А. И. Сидашенко. – Харьков : ПромАрт, 2018. – 561 с.
2. Слухоцкий, А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
3. Слухоцкий, А. Е. Индукторы / А. Е. Слухоцкий. – 5 изд. перераб. и доп. – Л. : Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1989. – 69 с.
4. Николаев, Е. Н. Термическая обработка металлов токами высокой частоты : учебник для техн. училищ / Е. Н. Николаев, И. М. Короткин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1984. – 207 с.

Щербаков С. В., Исаева Ю. С.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ НАГРЕВОМ РЕЛЬСОВ В РЕЛЬСОЗАКАЛОЧНОЙ МАШИНЕ

К числу основных задач любого металлургического производства следует отнести снижение себестоимости и повышение качества выпускаемой продукции. Важнейшим направлением производства рельсов является увеличение их качества и долговечности, что связано с тенденцией повышения грузонапряженности на железнодорожном транспорте и растущей конкуренцией на мировом рынке. В связи с этим исследования, направленные на повышение качества рельсов, а также сокращение затрат на их производство являются важными и актуальными.

На сегодняшний день в мире производится свыше 6 млн тонн железнодорожных рельсов. В Украине основным производителем рельсов является комбинат ЧАО «МК

«Азовсталь», которий ежегодно выпускает до 245 тыс. тонн рельс. Рельсы производятся четырех категорий: высшая, I, II, и III, из которых три первых поставляются в термоупрочненном состоянии с нагревом токами высокой частоты (ТВЧ).

Существующая система АСУТП рельсозакалочных машин ЧАО «МК «Азовсталь» имеет ряд существенных недостатков. Среди них: отсутствие автоматизированного управления индукционным нагревом рельс, отсутствие автоматизированного управления процессом стыковки и расстыковки рельс, ручной ввод задания в систему управления расходом воды на зону первичного охлаждения, моральное и физическое устаревание аппаратной части АСУТП. Устранение этих недостатков должно стать приоритетным в ближайшее время для повышения эффективности производства и конкурентоспособности производимой продукции на мировом рынке.

В данной статье рассматривается проблема отсутствия локальной системы автоматического регулирования (ЛСАР) нагрева рельс. В работе построена математическая модель нагрева рельс, на основе которой можно создать эффективную САУ на базе современных контроллеров. В данной модели были рассчитаны оптимальные настройки регулятора управления нагревом, построены переходные процессы. Использование данной модели при следующей модернизации производства позволит повысить качество продукции путем устранения возможной человеческой ошибки и позволит стабилизировать температуру рельсы в зоне нагрева с необходимой точностью.

Ключевые слова: *рельсозакалочная машина, РЗМ, Matlab, регулятор, нагрев рельс, нагрев с помощью ТВЧ, САУ нагрева.*

Shcherbakov S. V., Isaeva Y. S.

MATHEMATICAL SIMULATION OF THE RAIL HEATING CONTROL PROCESS IN THE RAIL QUICKERING MACHINE

Among the main tasks of any metallurgical production should be attributed to reducing costs and improving the quality of products. The most important direction in the production of rails is to increase their quality and durability, which is associated with the tendency to increase the freight traffic in railway transport and the growing competition in the world market. In this regard, research aimed at improving the quality of rails, as well as reducing the cost of their production are important and relevant.

Today, over 6 million tons of railway rails are produced in the world. In Ukraine, the main manufacturer of rails is the PrJSC "IaSW "Azovstal", which annually produces up to 245 thousand tons of rails. The rails are produced in four categories: the highest, I, II, and III, of which the first three are supplied in a heat-strengthened state with heating by high-frequency currents (HFC).

The existing system of the automated process control system for rail hardening machines of PJSC "IaSW "Azovstal" has a number of significant drawbacks. Among them: the lack of automated control of the induction heating of the rail, the lack of automated control of the process of joining and uncoupling the rails, manual input of the task into the water flow control system for the primary cooling zone, moral and physical obsolescence of the control system hardware. Elimination of these shortcomings should become a priority in the near future to improve production efficiency and competitiveness of manufactured products in the world market.

This article discusses the problem of the absence of a local automatic control system (LSAR) for heating the rail. In the work, a mathematical model of rail heating has been built, on the basis of which it is possible to create an effective ACS based on modern controllers. In this model, the optimal settings of the heating control regulator were calculated, and transient processes were built. The use of this model during the next modernization of production will improve the quality of products by eliminating possible human error and will stabilize the temperature of the rails in the heating zone with the required accuracy.

Keywords: rail hardening machine, REM, Matlab, regulator, rail heating, heating using high frequency current, heating ACS.

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Кравченко В. П.

Стаття надійшла

УДК 620.172.251.282:621.771

Амурський Є. О., Кравченко В. П.

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ ТЕМПЕРАТУРИ ЗОН МЕТОДИЧНОЇ ПЕЧІ ПРИ КОЛИВАННЯХ ТИПУ (ГЕОМЕТРИЧНИХ РОЗМІРІВ) І ТЕМПУ ПРОКАТКИ НАГРІТИХ ЗАГОТІВОК

Розглядаються особливості роботи методичної печі великосортного прокатного стану в умовах значної кількості типів заготовок, сортаменту профілів і темпу прокатки. Поперечне січення заготовок в цих печах змінюються в значних межах – від самих легких (130x130мм), до важких (282 x320мм). Заготовки можуть також належати до одної із чотирьох груп марок сталі. Таке різноміття типів заготовок потребує відповідної зміни розподілення температури по зонам печі в процесі їх нагріву. Перед початком кампанії прокатки певного профілю заготовки потрібного січення поштучно завантажуються в піч, утворюючи безперервний потік. Їх кількість в печі визначається геометричними розмірами заготовок і довжиною активного поду печі

Окрім січення на температурний режим печі впливає також темп прокатки відповідних профілів і його коливання. Під темпом прокатки розуміють кількість виданих із печі і прокатаних заготовок в одиницю часу. Сумарна час прокатки заготовок, які знаходяться у печі визначає загальний час їх нагріву. Темп прокатки заготовок оперативно визначає коливання їх часу нагріву і тому широко використовується для своєчасної корекції температурного режиму печі.

Для своєчасної зміни цих температур пропонується існуючу систему автоматичного регулювання температури по зонам печі доповнити контурами корекції заданої температури опалювальних зон по типу заготовки і темпу прокатки. Представлена структура такої системи, яка містить термінал на посту оператора завантаження заготовок в піч, датчик кількості завантажених заготовок, встановлений на штовхачі і датчик видачі заготовок із печі. Всі ці засоби з'єднанні з контролером системи, який обробляє одержану інформацію і автоматично корегує задані значення температури зон печі.