

5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.

Bibliography:

1. Shedrin V.M. The theory of blast furnace smelting under pressure / V.M. Shedrin. – Moscow : SSTIL on ferrous and nonferrous metallurgy, 1962. – Vol. 1. – 279 p. (Rus.)
2. Tarasov V.P. Gasdynamics of the blast furnace process / V.P. Tarasov. – Moscow : Metallurgiya, 1990. – 216 p. (Rus.)
3. Blast furnace production : Reference book / Edited by I.P. Bardin. – Moscow : SSTIL on ferrous and nonferrous metallurgy, 1963. – Vol. 1. – 646 p. (Rus.)
4. Profos P. Regulation of steam power units / P. Profos. – Moscow : Energy, 1967. – 368 p. (Rus.)
5. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – Moscow : Vysshaya shkolal, 2003. – 479 p. (Rus.)

Рецензент: В.О. Маслов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 02.10.2015

УДК 621.771.23.016.3-52

© Мірошніченко В.І.¹, Сімкін О.І.²

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ
ПРОЦЕСОМ ВОДОПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ
ЛИСТОВОГО ПРОКАТУ**

Проаналізовані основні методи моделювання об'єктів автоматизованого керування. Запропоновано метод багаторівневого моделювання об'єктів з багатовимірними цільовими функціями. На прикладі моделювання процесу водоповітряного охолодження (ВПО) листового прокату в умовах послідовного ВПО та при застосуванні водоповітряної суміші (ВПС) показано зменшення мінімально необхідної кількості ітерацій при використанні запропонованого методу вдвічі за підвищеною адекватності.

Ключові слова: математична модель, водоповітряне охолодження, листовий прокат, багатовимірна цільова функція.

Мирошніченко В.И., Симкин А.И. Повышение эффективности автоматизированного управления процессом водовоздушного охлаждения листового проката. Проанализированы основные методы моделирования объектов автоматизированного управления. Предложен метод многоуровневого моделирования объектов с многомерными целевыми функциями. На примере моделирования процесса водовоздушной охлаждения (ВВО) листового проката в условиях последовательного ВВО и при применении водовоздушной смеси (ВВС) показано уменьшение минимально необходимого количества итераций при использовании предложенного метода вдвое при повышенной адекватности.

Ключевые слова: математическая модель, водовоздушное охлаждение, листовой прокат, многомерная целевая функция.

V.I. Miroshnichenko, A.I. Simkin. Automated control of water-air cooling process for sheet products quality improving. An analysis of the main existing methods for modelling

¹ асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, vimasktp@rambler.ru

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, simkin@ukr.net

objects of the automated control is executed in terms of their efficiency: adequacies of control parameters forecasting as well as the necessary amount of calculating operations per a unit time or duration of the calculations. The necessity to use, in general case, the systems of many complicated multicomponent equations of regressive character to achieve adequate determination of evolution of the most real objects has been shown. In order to increase the automated control efficiency a new physically founded method for multilevel modelling the real objects with multidimensional objective functions has been offered. The method consists of: determination of «new» objective function which has close cross-correlation with every initial parameter; development of systems of regressive models relating to a high adequacy a «new» objective function to each control parameter; development of highly adequate regressive model relating a «new» objective function to each entry parameter. Verification of efficiency of the offered method was executed by the modelling the process of the water-air cooling (WAC) for sheets under the conditions of successive WAC and with the use of air-water mixture. A system of the universal physically founded regressive models has been developed for the rolled steels mechanical properties indexes which under the conditions of successive WAC need with the use of the known methods at least 18 iterations to calculate every separate value of the control parameters while according to the offered approach, the proper amount is just 9 iterations and higher forecasting adequacy has been reached.

Keywords: *mathematical model, water-air cooling, sheet metal, multidimensional objective function.*

Постановка проблеми. Застосування систем автоматизованого керування складними технологічними об'єктами, функціонування яких характеризується декількома вхідними та вихідними параметрами, є достатньо ефективним та економічно виправданим.

При цьому рівень такої ефективності зростає із збільшенням кількості вказаних параметрів. З іншого боку, за таких умов збільшується також кількість розрахункових операцій за одиницю часу або час проведення розрахунків, що суттєво знижує ефективність керування, особливо в режимі реального часу. Таким чином, актуальним завданням при розробці систем автоматизованого керування є підвищення ефективності їхнього функціонування шляхом вдосконалення методів ідентифікації та моделювання об'єктів керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основою моделювання об'єктів керування є створення математичних моделей, які пов'язують їхні вхідні та вихідні параметри. В найбільш поширених випадках це призводить до необхідності одночасного розв'язання системи багатьох математичних рівнянь з багатьма незалежними змінними в режимі реального часу. Вочевидь, вказані рівняння мають якомога точніше відображати закономірності поведінки об'єктів керування в реальних умовах експлуатації, в зв'язку з чим вони повинні мати регресійний характер. Одним з найбільш поширених методів моделювання об'єктів з багатовимірними вхідними та вихідними параметрами є метод множинної регресії [1], що полягає у побудові окремої математичної моделі для кожного вихідного параметру, яка включає в себе декілька або всі вхідні характеристики. Недоліками цього методу є необхідність використання складних, багатокomпонентних, нелінійних регресійних моделей для досягнення високої адекватності моделювання, а також – виконання великої кількості ітерацій, число яких може досягати, в загальному випадку, $M \times N$, де M – кількість вхідних параметрів, N – кількість цільових характеристик для розрахунків окремих значень всіх вихідних параметрів. Це потребує використання великих розрахункових комп'ютерних потужностей при здійсненні керування процесом в режимі реального часу, або тривалого періоду проведення розрахунків, що значно знижує ефективність керування.

На теперішній час існує спосіб часткового усунення вказаних недоліків, відомий як метод «основних компонентів» [2]. Сутність цього методу полягає у скороченні кількості параметрів шляхом визначення кореляційних залежностей між вхідними змінними та подальшу розробку регресійних моделей, що пов'язують вихідні параметри та «нові» вхідні характеристики. Метод дозволяє зменшити кількість розрахункових ітерацій до значень $M_1 \times N$, де M_1 – кількість «нових» незалежних вхідних характеристик ($M_1 < M$). Головним недоліком такого методу є низька адекватність моделювання у зв'язку з використанням додаткових кореляційних залежностей між вхідними параметрами, що супроводжується втратою інформації.

Мета роботи – розробити та експериментально перевірити фізично обґрунтований метод багаторівневого моделювання об'єктів керування з багатовимірними вхідними та вихідними параметрами, що забезпечує підвищення ефективності та рівня адекватності моделювання.

Викладення основного матеріалу. В процесі функціонування об'єкту керування його поведінка з вичерпною точністю характеризується, в загальному випадку, декількома вихідними параметрами (залежними змінними, багатовимірною цільовою функцією). Кожен з таких вихідних параметрів характеризує реакцію (відгук) одного й того ж самого об'єкту на зовнішній вплив, походження, характер та значення якого ϵ , в загальному випадку, незалежними від інших зовнішніх впливів, що надходять від різних зовнішніх чинників.

Таким чином, під час керування будь яким об'єктом мають справу з сукупністю вихідних параметрів, які є характеристиками одного за фізичною природою матеріального об'єкту, та сукупністю вхідних параметрів, які є показниками, пов'язаними з зовнішнім, оточуючим середовищем, що складається з великої кількості, частіше за все, незалежних матеріальних об'єктів. Виходячи з викладеного, існує об'єктивне, фізичне підґрунтя для існування зв'язків (залежностей) між характеристиками об'єкту керування, що належать до сукупності його вихідних параметрів. В той же час, вхідні параметри окремого об'єкту керування об'єктивно, за своєю природою, а також за визначенням, мають бути незалежними, в тому числі і між собою. Можливе існування кореляційних зв'язків (залежностей) між вхідними параметрами об'єкту керування свідчить про недостатньо глибоке та ретельне вивчення взаємодії такого об'єкту з оточуючим середовищем і ϵ , а рґіогу, малоїмовірним.

Виконаний аналіз показав, що розглянутим вище умовам функціонування об'єктів керування з багатовимірними вхідними та вихідними параметрами відповідає наступна процедура їх багаторівневого моделювання: визначення «нової» цільової функції, що має тісні кореляційні зв'язки з кожним вихідним параметром; розробка сукупності регресійних моделей, які з високою адекватністю пов'язують «нову» цільову функцію з кожним вихідним параметром; розробка високо-адекватної регресійної моделі, яка пов'язує «нову» цільову функцію із вхідними параметрами.

В процесі керування згідно розробленого методу на початковому рівні здійснюються розрахунки «нової» цільової функції на підставі рівняння регресії, що пов'язує її значення з сукупністю вхідних параметрів об'єкту керування. Кількість ітерацій для розрахунку окремого значення такої функції складе: M – кількість вхідних параметрів. Ступінь адекватності початкового рівня моделювання може бути підвищена за рахунок ускладнення моделі без змін кількості ітерацій. На наступному рівні моделювання виконуються розрахунки всіх N вихідних параметрів на підставі N рівнянь регресії, що пов'язують кожен параметр з «ноюю» цільовою функцією. Кількість ітерацій для розрахунків окремого значення N цільових характеристик складе: N . Ступінь адекватності другого рівня моделювання може бути підвищена за рахунок ускладнення моделей без змін кількості ітерацій. Загальна кількість ітерацій дорівнює: $M+N$, де M – кількість вхідних параметрів, N – кількість цільових характеристик, що є значно менше за $M \times N$, або $M_1 \times N$, де M_1 – скорочена кількість незалежних вхідних характеристик ($M_1 < M$) за умов: $2 \ll M_1 < M$.

Внаслідок суттєвого зменшення кількості ітерацій для визначення багатовимірної цільової функції, знижуються потрібні для розрахунків комп'ютерні потужності або тривалість проведення розрахунків, що значно підвищує ефективність керування, особливо в режимі реального часу.

В роботі було виконано моделювання процесу водоповітряного охолодження (ВПО) листового прокату з низьколегованої високоміцної сталі завтовшки $H = 40$ мм. Вхідними параметрами служили: тривалість витримки у воді – t_w ; тривалість витримки на повітрі – t_a ; параметр, що характеризує послідовність використання води та повітря під час охолодження – P ($M = 3$). Вихідними параметрами були стандартні показники якості листового прокату: σ_{02} – межа течії, σ_g – межа міцності, δ_5 – відносне подовження, ψ – відносне звуження, KV^{20} – робота ударного руйнування при $T = -20^\circ\text{C}$, KV^{40} – робота ударного руйнування при $T = -40^\circ\text{C}$, ($N = 6$). В якості «нової» цільової функції було обрано твердість сталі (НВ), як характеристику, що достатньо легко та швидко вимірюється експериментально, і, за літературними даними, має

достатньо тісні кореляційні зв'язки зі стандартними показниками якості сталей.

Розрахунки твердості в залежності від вхідних параметрів виконували згідно з регресійним рівнянням (1) (початковий рівень моделювання), яке було розроблено шляхом регресійного аналізу експериментальних даних, отриманих під час як послідовного ВПО, так і при застосуванні ВПС. При цьому, враховували також результати теоретичного аналізу процесу ВПО [3]. Таким чином, наведене нижче рівняння має універсальний характер і може бути застосовано за різних умов ВПО.

$$HB(H, q) = 515,00 + 176 \cdot t_w(H, q) - 9,4 \cdot t_w(H, q) \cdot t_a(H, q) + 6,7 \cdot 10^{-3} \cdot t_a(H, q) \cdot P(q) - 36,3 \cdot t_w(H, q) \cdot P(q); \quad (R^2 = 0,92) \quad (1)$$

де q – об'ємна частка води у ВПС;

$$t_w(H, q) = [t_w^{100}(H) \cdot q]^{1/3};$$

$$t_a(H, q) = [t_w^{100}(H) - t_w(H, q)]^{1/3};$$

$t_w^{100}(H) = H^{1.417}$ – емпірично встановлена залежність часу досягнення 100°C при охолодженні у воді від товщини прокату;

$t_w^{100}(H) = 56H^{1/2} + 380$ – емпірично встановлена залежність часу досягнення 100°C при охолодженні на повітрі від товщини прокату;

$$P(q) = q^{1/3}.$$

Висока адекватність отриманого рівняння підтверджується достатньо близьким збігом графічних експериментальної та розрахованої статистичних залежностей (рис. 1).

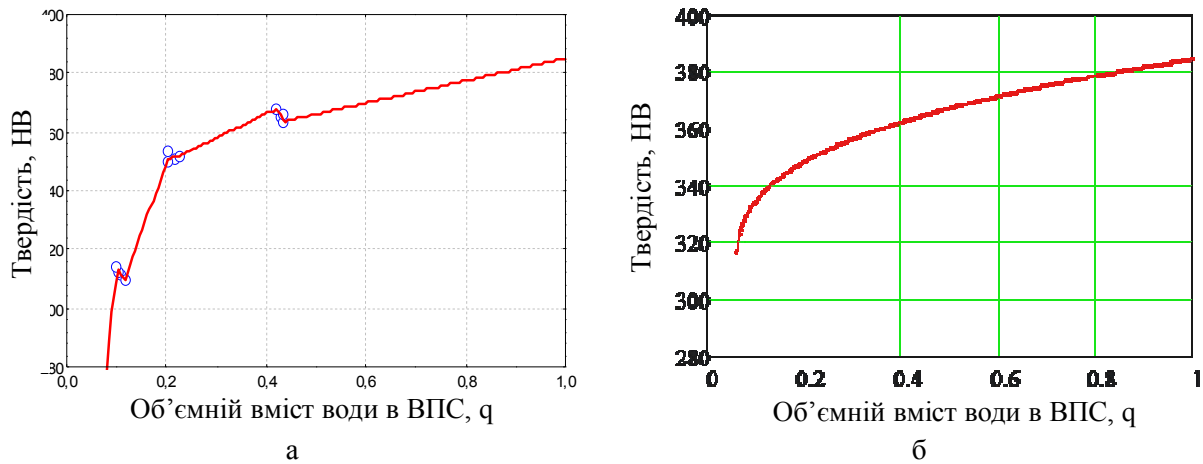


Рис. 1. – Залежності твердості листового прокату сталі S355 від об'ємного вмісту води у ВПС згідно експериментальних даних (а) та результатів комп'ютерного моделювання (б)

Аналогічними за формою та характером є відповідні рівняння для стандартних показників механічних властивостей прокату [4]. Проте, як можна бачити на прикладі рівняння (1), у випадку ВПО з застосуванням ВПС розглянуті регресійні моделі мають достатньо складну форму, що, вочевидь, ускладнює їх застосування для розрахунків у режимі реального часу.

Розрахунки стандартних показників якості сталі в залежності від твердості (другий рівень моделювання) виконували згідно з регресійними рівняннями ($HB \equiv x$):

$$\begin{aligned} \sigma_{02} &= -84,03 + 3,42x - 0,0038x^2 & (R^2 = 0,94) \\ \sigma_B &= 83,73 + 3,80x - 0,0044x^2 & (R^2 = 0,92) \\ \psi &= 90,42 - 0,1427x + 0,0002x^2 & (R^2 = 0,90) \\ \delta_5 &= 77,73 - 0,3978x + 0,0006x^2 & (R^2 = 0,92) \\ KV-20-1 &= 421,33 - 2,508x + 0,0038x^2 & (R^2 = 0,91) \end{aligned}$$

$$KV-40-1 = 86,42 - 0,51x + 0,0009x^2 \quad (R^2 = 0,90)$$

Графічна ілюстрація адекватності отриманих регресійних моделей наведена на рис. 2. Як випливає з отриманих даних, практично всі регресійні моделі мають достатньо високу адекватність ($R^2 \geq 0,90$) та при проведенні розрахунків потребують окремого значення кожного показника якості $M+N = 9$ ітерацій.

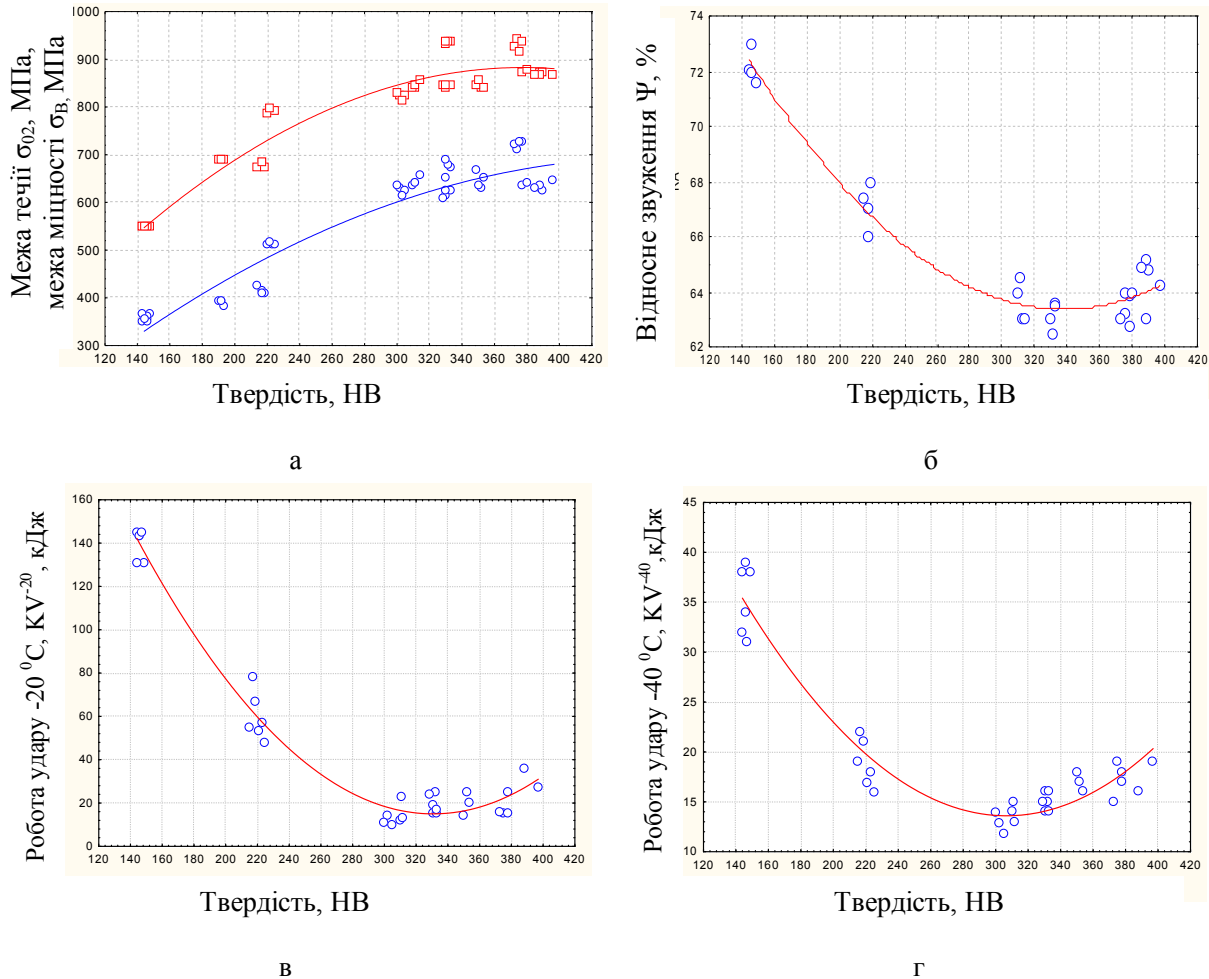


Рис.2. – Залежності механічних характеристик від твердості прокату в умовах ВПО:
а – межі течії та межі міцності, б – відносного звуження, в – роботи удару при -20°C ,
г – роботи удару при -40°C

Висновки

1. Шляхом регресійного аналізу широкого кола експериментальних даних, що отримані при ВПО заготовок листового прокату різної товщини в умовах послідовного застосування води та повітря, а також при використанні ВПС, розроблено універсальну математичну модель, що відображає фізичну сутність впливу технологічних параметрів на твердість сталі та має високу адекватність для обох різновидів процесу ВПО.

2. Наголошено на складнощах форми наведеної в роботі та отриманих раніше регресійних моделей для механічних характеристик листового прокату, що призводить до уповільнення процесу автоматизованого керування процесом ВПО прокату в умовах реального часу при застосуванні ВПС.

3. Запропоновано спосіб багаторівневого моделювання об'єктів керування з багатовимірною цільовою функцією, що дозволяє досягати відповідності фізичній сутності процесів при ВПО, високої адекватності та універсальності моделювання у поєднанні із скороченням кількості ітерацій, необхідних для розрахунків контрольних показників якості об'єкту керування, що значно підвищує ефективність керування, зокрема в режимі реального часу.

Список використаних джерел:

1. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – М. : Высшая школа, 2003. – 479 с.
2. Дюк В.А. Data Mining. Учебный курс / В.А. Дюк, А.Б. Самойленко. – СПб : Питер, 2001. – 368 с.
3. Мірошніченко В.І. Аналітичне визначення режиму охолодження листового прокату при застосуванні водоповітряної суміші / В.І. Мірошніченко // *Металургійна і гірничорудна промисловість* : Зб. наук. пр. – Дніпропетровськ : ООО «Укрметаллургинформ «НТА», 2011. – Вип. 6. – С. 35-37.
4. Мірошніченко В.І. Моделювання процесу охолодження листового прокату як складової об'єкта управління / В.І. Мірошніченко, О.І. Сімкін // *Вісник Приазовського державного технічного університету* : Зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, 2011. – Вип. 22. – С. 232-236.

Bibliography:

1. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics / V.E. Gmurman. – M. : Vysshaya shkola, 2003. – 479 p. (Rus.)
2. Duke V.A. Data Mining. Training course / V.A. Duke, A.B. Samoilenko. – St. Petersburg : Piter, 2001. – 368 p. (Rus.)
3. Miroshnichenko V.I. Analytical determination mode cooling sheet products in the application of water-mix / V.I. Miroshnichenko // *Metallurgical and Mining Industry : Collection of scientific works*. – Dnepropetrovsk : ООО «Ukrmetallurhinform «NTA», 2011. – Issue 6 – P. 35-37. (Ukr.)
4. Miroshnichenko V.I. Simulation of cooling sheet products as part of the control object / V.I. Miroshnichenko, A.I. Simkin // *Reporter of the Priazovskyi state technical university : Collection of scientific works / SHEE «PSTU»*. – Mariupol, 2011. – Issue 22. – P. 232-236. (Ukr.)

Рецензент: В.О. Маслов

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 16.11.2015

УДК 669.162.23

© Койфман А.А.¹, Симкін А.І.²**ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА
ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ С НАГРЕВОМ НАСАДКИ ПОД ДАВЛЕНИЕМ**

Выполнен сравнительный анализ известных методик определения временных параметров работы блока воздухонагревателей доменной печи. С использованием базы данных значений основных технологических параметров работы блока осуществлена настройка математической модели работы каждого из воздухонагревателей группы. Разработана методика определения основных параметров работы блока на основании требуемой температуры дутья. Показано, что при повышении давления в рабочем пространстве в течение периода нагрева насадки температура горячего дутья может быть увеличена за счет большего количества теплоты, усвоенной насадкой.

Ключевые слова: *нагрев доменного дутья, группа доменных воздухонагревателей, математическая модель, температура дутья, давление газа-теплоносителя, режим работы.*

¹ ст. преподаватель, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, koifman@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, simkin@ukr.net