

ЗАСТОСУВАННЯ ЗВОРОТНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ У МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЯХ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА СИСТЕМ

Т.А. ЖЕЛДАК

Представлено метод побудови апроксимуючих поліноміальних функцій багатьох змінних, який засновано на використанні в поліномах від'ємних степенів та застосуванні до поліномів обмеження на сумарну величину ступеня добутку змінних. Запропоновано використання штрафної функції на кількість членів полінома. Експериментальним шляхом отримано оптимальну величину коефіцієнта запропонованої штрафної функції.

ВСТУП

Технологічний процес виробництва сталі в кисневому конвертері передбачає, що у ванну конвертера завантажується чавун та металобрухт у певній пропорції, які потім обдуваються під тиском струменем кисню [1]. Кисень вступає в реакцію з рідкоземельними елементами, легкими металами, сіркою та фосфором, розплавлені фракції яких видаляються у вигляді газів чи долучаються до шлаку. Звичайно, окислювальні реакції відбуваються з виділенням тепла. Кінцевою метою такого процесу є окислення всіх можливих домішок, які залишалися в чавуні чи були в металобрухті, з одночасним отриманням на виході розчину заліза певної температури та певним вмістом вуглецю.

Водночас сталь як матеріал і відповідні вироби з неї, зокрема, сортовий прокат, характеризуються низкою фізичних властивостей: границя текучості, границя міцності, ударна пружність, границя витривалості та відносне здовження зразку при фіксованому механічному навантаженні [2]. Саме ці параметри регламентують державні чи міжнародні стандарти для виробів з тієї чи іншої марки сталі.

Саме марка сталі є ідентифікатором, який пов'язує на рівні технологічного процесу хімічний склад металу з механічними характеристиками готової продукції, що з цього металу виготовляється. Цей зв'язок, а також послідовність технологічних операцій з металом ілюструє рис. 1.

Слід відзначити, що до моменту, коли безпосередніми вимірюваннями чи статистично виконується експертиза готової продукції, виконання будь-яких вимірів ускладнене, з одного боку — через високі температури розплаву та зливків, а з іншого — такі виміри не дадуть повної картини механічних властивостей. Річ у тім, що сортовий прокат набуває властивостей у тому числі й після завершення всіх технологічних операцій — під час охолодження. Тому доволі складно прогнозувати механічні властивості за хімічним складом розпеченої сталі.

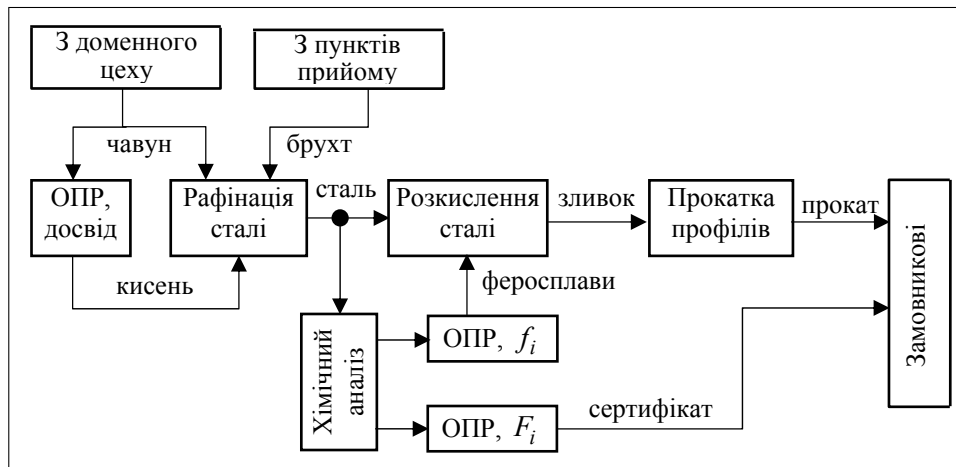


Рис. 1. Технологічний процес виробництва сортового прокату на ДМЗ ім. Петровського

Одним із факторів, властивих конвертерному виробництву, особливо на застарілому обладнанні, як на Дніпропетровському металургійному заводі ім. Петровського [3], є великий вміст у розплаві вільного кисню та його сполуки з вуглецем у вигляді газових вкраплень (дисперсії). Задля зв'язування цих молекул і перетворення на рідкий шлак використовують спеціальні присадки — феросплави. Існує декілька різновидів феросплавів на основі марганцю, алюмінію та кремнію, що мають різну вартість та різні зв'язуючі властивості. Комбінуючи вміст окремих феросплавів, що додаються до киплячої сталі на заключному етапі її виготовлення та їх загальний об'єм, можна досягти бажаних показників якості готової продукції. При цьому слід зауважити, що питома вартість феросплавів значно вища за всі інші вихідні матеріали, тому головна математична задача, яка вирішується під час їх застосування — оптимізація собівартості готової продукції, для якої необхідний хімічний склад сталі буде природним багатовимірним обмеженням.

Отже, актуальною бачиться задача прогнозування механічних властивостей майбутньої готової продукції на ранніх етапах виготовлення вуглецевої сталі з метою формування таких керуючих впливів, які б могли скоригувати процес, що вже відбувається.

Мета роботи — розробка сімейства моделей залежностей механічних характеристик готової продукції від хімічного складу сталі та формування цільової функції оптимізації процесу розкислення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Як зазначено в [2], хімічний склад розчину у ванні конвертера невідомий, адже до чавуну з певним хімічним складом та температурою додається металобрухт, склад якого оцінити, навіть у вигляді нечіткої множини чи ймовірно, вкрай важко. Останніми роками все частіше спостерігаються випадки «несумлінного» збирання металобрухту, коли в матеріалі, що постачається на переробку, вміст, власне, заліза не перевищує 30–50 %. Тож оператор конвертера виконує процес плавки виключно на досвіді, керуючи двома головними параметрами — висотою фурми, через яку подається ки-

сень, та швидкістю подачі кисню. Його задача полягає в тому, аби якнайшвидше (з метою економії кисню) отримати розчин, кількість домішок в якому не вищий за припустиму норму, а температура не виходить за межі рекомендованої для розливки.

Після цього ванну нахиляють і зливають метал у ківш, де і відбувається розкислення. Під час розливання береться експрес-аналіз хімічного складу, за яким технолог має швидко прийняти рішення про кількість феросплавів та їх пропорцію, аби досягти бажаних властивостей сталі.

У [4] показано, що майбутня марка сталі з надійністю 0,9624 визначається такими одинадцятьма вимірами: вміст вуглецю, марганцю, кремнію, сірки, фосфору, хрому, нікелю, міді, титану та алюмінію в розчині під час розливки та температурою розливки. Також отримана нейронно-мережева модель, що дозволяє прогнозувати марку сталі за згаданими вище параметрами.

Утім, така модель не дозволяє сформулювати керуючий вплив у випадку, якщо хімічний склад металу в ході розливки виявився невідповідним заданій марці чи бажаним механічним властивостям готової продукції.

Застосовуючи класичний підхід [5, 6], який засновано на використанні багатовимірної нелінійної регресії, в якості базових модельних функцій якої є прості поліноми

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=1}^k a_{ij} x_j^{S_{ij}}, \quad (1)$$

де k — кількість змінних; M — кількість членів полінома; a_{ij} — коефіцієнти при складових полінома; S_{ij} — ступені аргументів, дозволяє отримати запис у вигляді суми функцій окремих змінних.

Недолік подібного підходу зумовлений тим, що за його використання ігнорується взаємозв'язок між хімічними складовими, тобто кожна з функцій

$$f_j = \sum_{i=0}^n a_i x^i, \quad j = 1 \dots k \quad (2)$$

є незалежною від усіх інших. Результуючий функціонал будується фактично як сума функцій (2)

$$y = \sum_{j=0}^k f_j. \quad (3)$$

Таке припущення, хоч і не критичне з точки зору математики, обмежує результуючі модельні функції, оскільки не дозволяє враховувати взаємний вплив хімічних складових один на одного. Зокрема, вміст сірки й фосфору, або ж нікелю й хрому зазвичай мають високу кореляцію між собою, тоді як вміст сірки чи фосфору з вмістом легких металів (марганцю, нікелю, хрому, титану) взагалі не корелює.

Застосування методу [5] обмежене ще одним об'єктивним фактором. Більшість залежностей, наприклад, для функції необхідної кількості феросплаву від хімічного складу, є суттєво нелінійними. Тож для встановлення

зв'язку між, наприклад, вмістом у розплаві фосфору й кількістю необхідного феросплаву першого типу (феросиліцій) застосовується поліном третього порядку з чотирма коефіцієнтами. Якщо ж врахувати, що змінних, які визначають хімічний склад і рекомендовані [2, 3] для оцінки кількості феросплавів для певних марок сталі використовується 12, а для деяких інших 14 і навіть 15, результуючі моделі матимуть по 30–50 коефіцієнтів.

Оскільки, відновлення моделей відбувається в результаті спостережень за реальними процесами під час дослідження, підприємство випускає приблизно 70 видів готової продукції з більше, ніж 30 марок сталі, а одна плавка триває 20–40 хв, то для отримання необхідної вибірки, за якою можна було б побудувати необхідні залежності, потрібні роки. Адже для забезпечення моделі з 30–50 коефіцієнтами, відновленими методом найменших квадратів (МНК) із бажаною надійністю хоча б 0,95, необхідно мати базу з 5000–8000 плавок.

Уникнути недоліків моделі, що застосовується, дозволяє використання для апроксимації керованої змінної від певного набору параметрів моделі узагальнених поліномів вигляду:

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \prod_{j=1}^k x_j^{S_{ij}}. \quad (4)$$

У (4), як і в (1), ступені, в яких предиктори входять до моделі, — натуральні числа, але вже наявні добутки параметрів.

Відома низка методів, що дозволяють отримати коефіцієнти полінома для будь-якого заданого критерію якості апроксимації, наприклад, критерію регулярності або мінімального зміщення [7]. Зокрема, комбінаторний алгоритм дає можливість отримати запис шляхом викреслювання певних складових із повного полінома, а метод групового врахування аргументів (МГУА) — навпаки, поступово ускладнює модель на основі елементарних поліномів першого-другого порядку.

Проблема комбінаторного алгоритму щодо застосування до розгляненої задачі очевидна — для $k=15$ змінних, кожна з яких може виступати в ступені від 0 до m , необхідно переглянути $m^k + 1$ різних поліномів, відновивши для кожного коефіцієнта методом найменших квадратів. Останнє нереально не лише з точки зору часу, а й виходячи з того, що починаючи з певного порядку матриці коефіцієнтів стануть погано зумовленими і безпосереднє рішення системи матричних рівнянь в МНК виявиться не ефективним.

З точки зору швидкості та простоти синтезу моделей МГУА, звичайно, має перевагу. Утім, на жаль, для вирішення цієї задачі застосування цього універсального методу призводить до небажаних наслідків: уже на третьому кроці самоорганізації під час застосування найпростішої форми базової моделі другого порядку

$$f(x_1, x_2) = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2 \quad (5)$$

серед кращих моделей опиняються такі, що зовсім спотворюють реальні фізичні залежності. Насамперед це стосується складових п'ятого, шостого та інших порядків, коефіцієнти при яких, відповідно, мають розмірність тисяч

і десятків тисяч. З точки зору критерію регулярності, такі моделі найкращі на своєму кроці, проте вкрай чутливі до точності визначення вхідних факторів. Оскільки йдеться про результати експрес-хімічного аналізу розпеченого металу при температурі приблизно 1600°C, помилки можливі. Через це отримані як за критерієм регулярності, так і за критерієм мінімуму зміщення, моделі у випадку практичного застосування на даних, які не були використані під час навчання дають викиди, що значно виходять за можливий діапазон варіювання параметрів.

Як зазначено в [6], рідко в яких технічних чи природних системах пара параметрів мають між собою залежність, складнішу за другий порядок. Саме це зумовило пропозицію [8] обмежити ступені поліномів, що входять до виразу (4) умовою:

$$\sum S_{ij} \leq m, \quad (6)$$

де m — заздалегідь визначена максимальна степінь поліному моделі. Значимо, що нерівність (6) обмежує не тільки максимальний рівень змінної x_j в складовій i , а й степінь усіх параметрів у складовій. Тобто, для $m = 3$ можливі вирази $a_i x_1^3$, $a_i x_1^2 x_2$, $a_i x_1 x_2^2$, $a_i x_2^3$ та $a_i x_1 x_2 x_3$, або ж входження тих самих змінних у нижчих степенях. При цьому складова $a_i x_1 x_2 x_3 x_4$ заборонена по (6), хоча кожна змінна входить до виразу в першій степені, проте сума степенів усіх змінних більша за 3.

Подібне обмеження дозволило авторам [8] застосувати генетичний алгоритм до розв'язання задачі розрахунку невідомих коефіцієнтів виразу (4), адже замість хромосом довжиною $m^k - 1$ матимемо лише

$$M = \frac{(m+k)!}{m!n!} \quad (7)$$

можливих складових. Наприклад, для залежності границі міцності сталі від хімічного складу та товщини готового виробу ($k = 9$ змінних), якщо припустити входження в моделі ступенів змінних від 0 до 3 ($m = 4$), замість 262143 можливих складових розглядаються лише 715.

Знайти рішення для задачі такої складності можна навіть повним перебором можливих моделей.

ОПИС ДОСЛІДЖЕННЯ

Серія експериментів із відновлення апроксимаційних функцій з використанням моделей вигляду (2)–(3) та скорочених поліномів вигляду (4)–(6) виконаних на базовому підприємстві, показали, що відновлення функцій розкислення та результуючих механічних характеристик за цими методами має вкрай обмежену точність.

Оцінка коефіцієнтів парної кореляції між окремими вхідними аргументами (складові хімічного аналізу) та змінною, що описує шукану функцію, майже в половині випадків мала від'ємне значення. І хоча коефіцієнт парної кореляції свідчить лише про наявність та степінь лінійного зв'язку, подібні

результати, зокрема як подано в табл. 1, дозволяють припустити наявність суттєвих зворотних зв'язків між предикторами та вихідною змінною.

Таблиця 1. Коефіцієнти парної кореляції між значеннями механічних властивостей сортового прокату та значень показників хімічного складу сталі до розкислення

Показники хімічного складу, %	Механічні характеристики сортового прокату				
	Границя текучості, кгс/мм ²	Границя міцності, кгс/мм ²	Ударна в'язкість при $t = -20$ °С, кгсм/см ²	Ударна в'язкість після механічного старіння, кгсм/см ²	Відносне подовшення, %
Вуглець	0,084097	0,133192	-0,08043	0,009997	-0,14025
Марганець	-0,11697	-0,16656	-0,05853	0,025829	0,113689
Кремній	0,02797	-0,16319	0,076881	0,159299	-0,06278
Сірка	0,129429	-0,24827	-0,08207	-0,04637	-0,12497
Фосфор	0,250497	-0,18007	-0,17694	-0,09435	0,072617
Хром	-0,03198	-0,04063	-0,05504	-0,10765	0,115402
Нікель	0,119189	-0,12141	-0,15062	-0,24716	-0,01625
Мідь	0,078779	-0,1984	-0,38222	-0,45227	-0,1956
Товщина полки, мм	-0,03506	-0,47014	-0,09082	-0,24628	-0,39667

Введення в моделі (4) дозволу на від'ємність степенів S_{ij} дозволяє не тільки значно підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесів, а й створити новий тип предикторів, а саме різні співвідношення. Використовуючи замість (6) обмеження

$$\sum |S_{ij}| \leq m, \quad (8)$$

можна отримати в якості складових результуючого поліному базові функції вигляду, наприклад $a_i \frac{x_1}{x_2}$. Як показують дослідження, саме на подібні спів-

відношення припадає найбільший внесок інформації про механічні власності матеріалу, яку можна отримати з хімічного аналізу. Наприклад, пластичність матеріалу (y_5) набагато краще корелює із відношенням вмісту фосфору до сірки x_5 / x_4 , ніж з кожним із цих параметрів окремо.

Слід зауважити, що поліноми, які забезпечують для функцій апроксимації прийнятний рівень критерію регулярності, найчастіше натрапляють на проблему нестачі вхідних даних. З одного боку, чим складніший характер мають моделі, тим менша їх середньоквадратична похибка апроксимації. З іншого — чим більше коефіцієнтів у моделі, отриманій за обмеженою кількістю прикладів даних, тим нижча їх якість, гірша t — статистика і, як наслідок, адекватність усієї апроксимаційної моделі. Як наслідок — майже випадкові результати на виході моделі у випадку надходження на вхід нових даних, що виходять за діапазони навчальної вибірки.

З огляду на це пропонується ввести штрафну функцію на розмірність апроксимаційного поліному. Зокрема, у традиційний [7] критерій регулярності пропонується додати складову штрафу у вигляді тиску розмірності

$$J(A, M) = \sum_{t=1}^N (Y_t - y_t)^2 + \alpha M \rightarrow \min, \quad (9)$$

де A — вектор коефіцієнтів при складових поліному a_i ; M — кількість ненульових значень коефіцієнтів; y_t — значення вихідної змінної в прикладі $t=1..N$; Y_t — значення апроксимаційної функції в тому ж прикладі; α — параметр тиску розмірності, $0 < \alpha < 1$.

Значення, що може приймати параметр тиску розмірності та його вплив на результати апроксимації будуть досліджені нижче.

Запропонований штраф за розмірність функції також має об'єктивне обґрунтування з точки зору технологічного процесу. Річ у тім, що система підтримки прийняття рішень, якою користується оператор конвертерного виробництва [3], повинна мати якомога простішу організацію з точки зору використання пам'яті та швидкодії. Більшість робочих місць не обладнані ЕОМ, тож використання функції апроксимації кладеться або на мікроконтролер з обмеженим обсягом пам'яті, або ж на віддалений комп'ютер, зв'язок з яким виконується каналом низької пропускної здатності. Десятки (іноді сотні) коефіцієнтів, які породжуються традиційними методами самоорганізації моделей, практично унеможливають застосування таких функцій на практиці.

Запропонований підхід до побудови апроксимаційних функцій був перевірений на двох моделях металургійного виробництва: залежності механічних характеристик готової продукції від хімічного складу та необхідності у феросплавах в процесі розкислення вуглецевої сталі при її конвертерному виробництві.

У ході серії експериментів було відновлено низку функціональних залежностей механічних характеристик та необхідних обсягів розкислювачів під час виробництва двох профілів готової продукції: швелерів 18П та профілю кутового шириною 125 мм.

Зведені результати чисельної апроксимації подані в табл. 2. Тут в якості МНК позначено результати застосування класичного підходу з незалежними поліномами від окремих параметрів за (2)–(3). В якості МГУА — результати застосування методу групового врахування аргументів на опорній функції другого порядку (5) з критерієм регулярності. Також наведені результати застосування генетичного алгоритму з цільовою функцією вигляду (9) та степенями — натуральними числами («ГА-натур») і, відповідно — запропонованого методу генетичного алгоритму з цільовою функцією вигляду (9) та обмеженням (8) («ГА-від'ємні»). В обох останніх випадках $m = 3$.

Оцінками якості роботи алгоритмів у табл. 2 є: M — кількість членів полінома функції апроксимації (кількість коефіцієнтів, що відновлюються); S_{\max} — максимальна степінь члена поліному (для МНК — окремого аргументу, для всіх інших методів — добутку аргументів); SSR — середнє квадратичне відхилення апроксимованої величини від безпосередньо виміряного

значення (оскільки різні функції y_k мають різну розмірність, використане відносне значення похибки, приведене до середнього по всім дослідом).

Таблиця 2. Порівняння результатів відновлення функцій за чотирма методиками

Задача	Функція	Кількість змінних	МНК			МГУА			ГА-натур			ГА-від'ємні		
			M	S _{max}	SSR	M	S _{max}	SSR	M	S _{max}	SSR	M	S _{max}	SSR
Сертифікація	Границя текучості	9	23	5	0,04	69	5	0,01	14	3	0,14	6	3	0,04
	Границя міцності	9	27	6	0,03	110	7	0,02	21	3	0,12	8	3	0,05
	Відн. подовження	9	21	5	0,06	76	6	0,02	15	3	0,15	4	3	0,09
Розкислення	Феросиліцій	14	43	5	0,11	166	5	0,03	17	3	0,23	11	3	0,11
	Силікарганець	15	37	4	0,13	123	4	0,03	19	3	0,24	9	3	0,13

Як видно з табл. 2, найкращу якість апроксимації забезпечує метод групового урахування аргументів, який водночас дає найбільшу кількість коефіцієнтів результуючого поліному. Недоліки такої апроксимації викладено раніше. Застосування генетичного алгоритму відновлення коефіцієнтів функції апроксимації з обмеженням степені забезпечує прийнятну якість результатів за меншої кількості коефіцієнтів, ніж під час використання традиційної методики багатовимірної нелінійної регресії. Додатково слід відзначити, що використання від'ємних степенів у поліномах апроксимаційної функції дозволяє у два-три рази зменшити кількість коефіцієнтів, що відновлюються, при цьому помилка апроксимації також зменшується у 1,5–2,5 рази.

Ілюстрацією якості апроксимації може слугувати рис. 2, де показано дані експериментів та їх апроксимацію за допомогою МГУА та ГА з використанням від'ємних степенів поліномів та тиску розмірності.

Програмне забезпечення, що реалізує запропоновану методику відновлення коефіцієнтів апроксимуючого поліному, було реалізовано мовою Matlab. На рис. 3 показано результат апроксимації тієї ж функції границі міцності від хімічного складу сталі (пунктир — дані спостережень, суцільна — результати апроксимації всього вісьмома членами).

Із рис. 3 видно, що похибка апроксимації присутня майже в усіх дослідом, утім, отримана апроксимаційна залежність поводить себе так само, як і реальні дані (пікам даних відповідають піки функції, западинам — западини). Це дозволяє стверджувати про прийнятність отриманої моделі для оцінки механічних властивостей готової продукції.

Питання величини параметра тиску розмірності α є компромісом між бажанням отримати якомога простішу залежність із меншою кількістю коефіцієнтів, та бажанням якомога точніше описати вхідні дані. Як видно з табл. 2, застосування генетичного алгоритму з критерієм оптимізації, що включає складову тиску розмірності, далеко не завжди забезпечує середнє

квадратичне відхилення функції від реальних даних, менше ніж 5 %. Аби проілюструвати вплив величини α на результати апроксимації, було проведено низку досліджень на одній із функцій (y_5 — відносне подовження зразку), результати якого наведено в табл. 3.

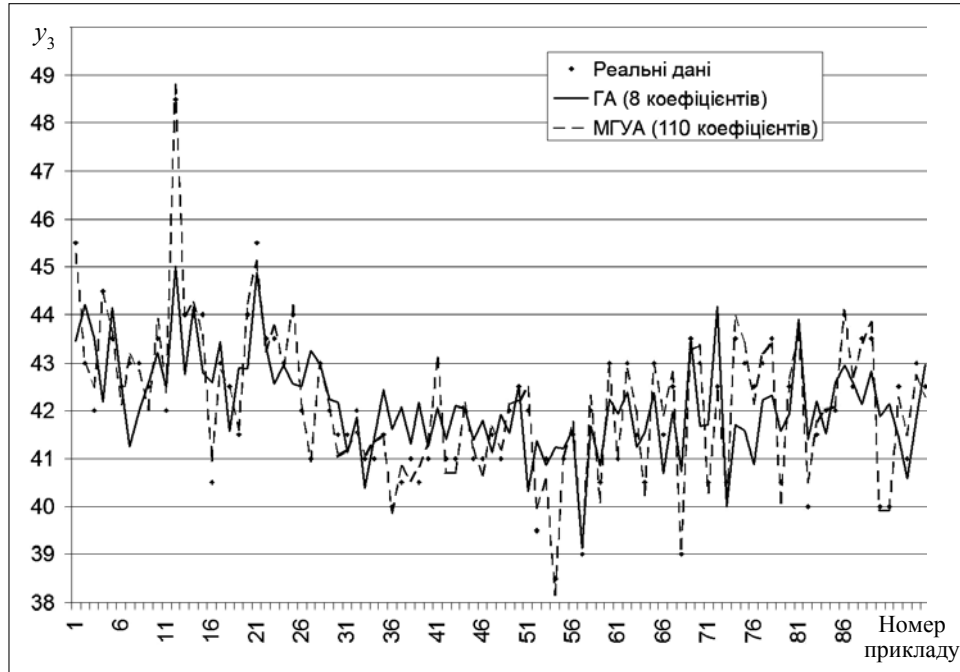


Рис. 2. Порівняння якості апроксимації залежності границі міцності сортового прокату від хімічного складу сталі (95 прикладів) двома методами

Таблиця 3. Дослідження впливу тиску розмірності на результати апроксимації

Величина α в (9)	Кількість членів апроксимаційного поліному M	Середня квадратична похибка апроксимації, SSR	Кількість ітерацій ГА пошуку коефіцієнтів функції
0	68	0,023	2740
0,001	33	0,0246	1230
0,01	22	0,026	330
0,05	15	0,034	216
0,1	8	0,051	189
0,2	6	0,075	234
0,3	4	0,09	716
0,5	3	0,21	1210

Аналізуючи результати, що зведені в табл. 3, слід відзначити, що величину в розмірності варто обирати не більшою за 0,1. Оскільки для функції, для якої була побудована залежність, будувався апроксимаційний поліном від $k = 9$ змінних, можна зробити припущення, що оптимальною величиною коефіцієнта, що досліджується, є $\alpha = 1/k$. Утім, подібне припущення потребує додаткової експериментальної перевірки на ширшому наборі да-

них, за різної кількості вхідних параметрів функцій та різному вигляді залежностей.

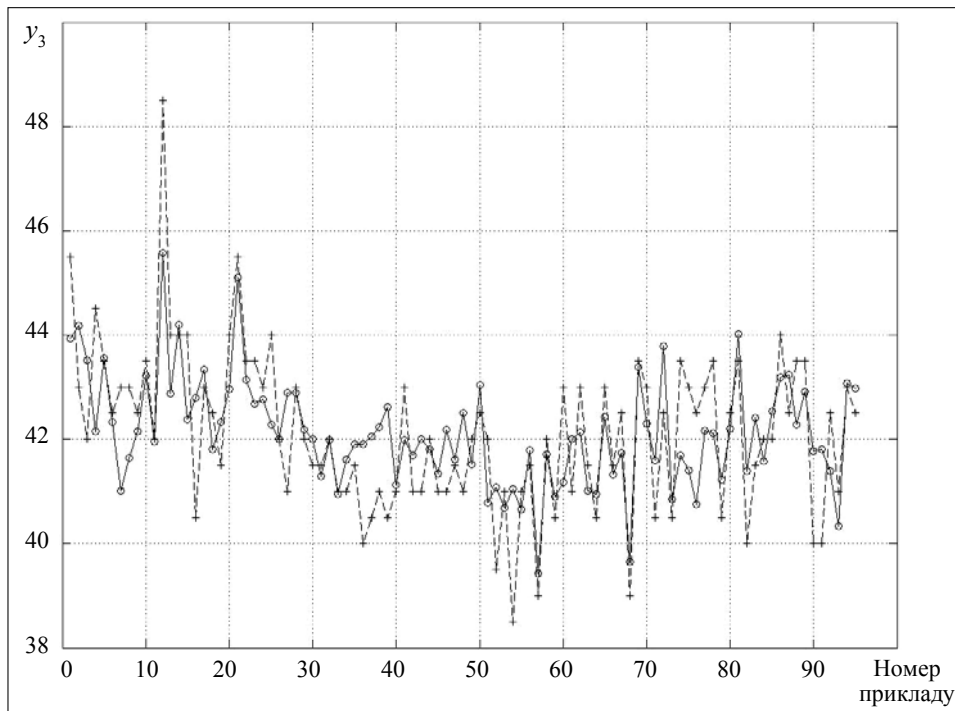


Рис. 3. Апроксимація залежності границі міцності сортового прокату від хімічного складу сталі (95 прикладів) з використанням генетичного алгоритму й обмеження степенів членів поліному

Також побачимо, що за відсутності тиску розмірності $\alpha = 0$ результати відновлення функції забезпечують прийнятну похибку апроксимації, не гіршу за апроксимацію з допомогою МГУА, застосовуючи при цьому поліноми з порівняльною кількістю коефіцієнтів. Коли ж розмірності стають більшим від 0,1 одразу погіршується якість апроксимації, зважаючи на те, що зменшення кількості коефіцієнтів уже відбувається несуттєво.

Привертає увагу також останній стовпчик табл. 3, в якому наведено кількості кроків (поколінь) генетичного алгоритму, витрачені на пошук найкращого за критерієм (9) рішення. Очевидно, що за середніх значень $\alpha = 0,01 \dots 0,2$ найкращий поліном знаходиться набагато швидше, ніж завищеному чи заниженому значенні α . Це свідчить про те, що оптимум при малих чи навпаки надто великих значеннях параметра тиску розмірності знаходиться серед сотень близьких локальних оптимумів.

Результат апроксимації залежності відносного подовження від хімічного складу сталі (9 параметрів) при найкращому, на думку автора, значенні $\alpha = 0,1$ наведено на рис. 4.

Як можна побачити на рис. 4, при вказаному значенні α апроксимуюча функція достатньо якісно відтворює залежність, враховуючи ключові коливання та екстремуми.

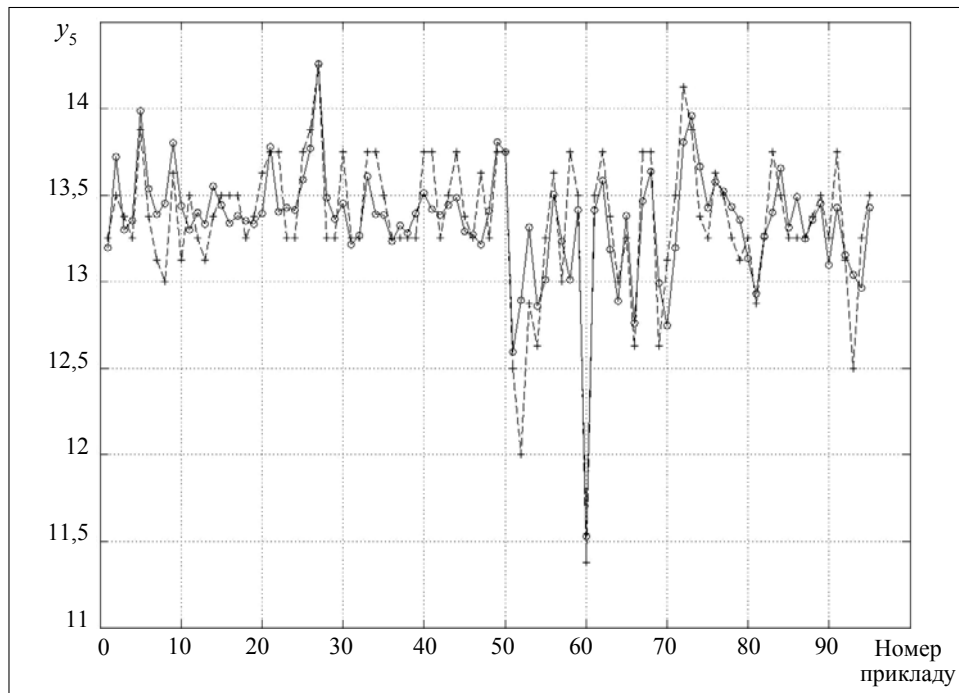


Рис. 4. Апроксимація залежності відносного подовження сталевого прокату від хімічного складу

ВИСНОВКИ

У металургійному виробництві існує актуальна задача відновлення залежностей керуючих функцій розкислення та стану об'єкта управління (механічні властивості готової продукції) від хімічного складу розпеченої сталі в кисневому конвертері. При цьому набір параметрів, що визначають шукані характеристики, відомий заздалегідь.

У роботі подано метод побудови апроксимуючих поліноміальних функцій багатьох змінних, який засновано на використанні у поліномах від'ємних степенів та застосуванні до поліномів обмеження на сумарну величину степені добутку змінних. Перше дозволяє значно наблизити отримані апроксимаційні залежності до їх фізичного сенсу, а друге — значно спростити вигляд результуючих функцій, зменшивши кількість коефіцієнтів, що відновлюються.

В якості базового алгоритму розрахунку коефіцієнтів апроксимуючої функції використано метод найменших квадратів, а в якості алгоритму пошуку найкращої структури функції — простий генетичний алгоритм із турнірним оператором селекції, рівномірним схрещуванням та рівномірною випадковою мутацією. Подібне сполучення алгоритмів дозволяє за вірних налаштувань отримати залежності механічних властивостей та керуючих функцій розкислення в режимі реального часу (200–300 поколінь).

У результаті аналізу роботи та отриманих результатів викладеного методу побудови апроксимуючої функції з використанням від'ємних степенів

у поліномах апроксимаційної функції було з'ясовано, що його застосування дозволяє в 2–3 рази зменшити кількість коефіцієнтів, що відновлюються, при цьому середньоквадратична помилка апроксимації також зменшується в 1,5–2,5 рази.

У результаті виконаної роботи оцінено оптимальну величину параметра тиску розмірності, запропонованого автором у якості штрафної функції критерію оптимізації. Запропоновано надалі користуватися значенням $\alpha \leq 0,1$, оскільки при більших значеннях неприпустимо зростає помилка апроксимації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Демидов В.А. Производство конвертерной стали [Технологическая инструкция] ТИ-233-СТ КК-02-2002. — Д.: ДМЗ им. Петровского — 2002. — 148 с.
2. Богусевский В.С., Литвинов Л.Ф. Математические модели и системы управления конвертерной плавкой. — К.: НПК «Киев. ин-т автоматки», 1998. — 304 с.
3. Нестеров М.Е., Желдак Т.А. Повышение эффективности устаревшего производства с помощью современных самообучающихся систем поддержки принятия решений на примере кислородно-конвертерного цеха ДМЗ им. Петровского // 36. наук. пр. НГУ. — Д.: Нац. гірничий ун-т. — 2010. — № 34, Т. 2. — С. 202–207.
4. Желдак Т.А., Кучеренко Н.А. Використання систем самонавчання для ідентифікації марки сталі в киснево-конвертерному виробництві // Наук. вісн. НГУ. — Д.: Нац. гірничий ун-т. — 2011. — № 1. — С. 94–98.
5. Гаранжа Д.М. Система статистичного контролю якості прокатної продукції // Системний аналіз та інформаційні технології: матер. міжнар. наук.-техн. конф. САІТ-2011, 23–28 трав. — К.: ННК «ПСА» НТУУ «КПІ». — 2011. — С. 216.
6. Дрейпер Н., Смит Г., Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ. — 3-е изд., пер. с англ. — М.: Издат. дом «Вильямс», 2007. — 912 с.
7. Ивахненко А.Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем: монография. — К.: Наук. думка, 1981. — 296 с.
8. Горбійчук М.І., Шуфнарівч М.А. Метод побудови математичних моделей складних процесів на засадах генетичних алгоритмів // Искусственный интеллект. — 2010. — № 4. — С. 50–57.

Надійшла 09.12.2011