УДК 004.03

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ АНОМАЛЬНОЇ ПОВЕДІНКИ ПРОЦЕСУ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

СІДАНЧЕНКО В.В. аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, e-mail: vladmazur49@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5581-9177

Мета роботи. *Розробка та дослідження методу контролю доменного процесу за відсутності можливості аналітичного опису його поведінки, котрий дозволяє виявляти аномалії виробничого процесу.*

Методи дослідження. *У цій роботі використані методи оцінки та прогнозу часових рядів на базі алгоритму фільтра Калмана, фрактального аналізу та нелінійної динаміки.*

Отримані результати. *Розроблено метод, що дозволяє виконувати оцінку та прогноз нестаціонарних стохастичних процесів з невідомою аналітичною моделлю, котрий включає вбудовану процедуру виявлення аномалій, засновану на методі 3 сигм. Виконано дослідження реальних часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. Показано, що розроблений метод дозволяє ефективно виявляти аномалії у поведінці процесу. Розглянуто можливий варіант реалізації системи управління, що використовує запропонований метод.*

Наукова новизна. *Вперше розроблено модифікацію субоптимального фільтра-прогнозатора калманівського типу, інваріантного до властивостей оброблюваного процесу, що дозволяє підвищити достовірність і точність прогнозу нестаціонарних процесів при неможливості отримання їх аналітичної моделі та виявляти аномалії виробничого процесу за допомогою вбудованої процедури, яка основана на використанні методу 3 сигм. Вперше проведено дослідження часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі з використанням методу 3 сигм, яке дозволило виявити зони з аномальними значеннями та викидами, які можуть свідчити про значні відхилення у поведінці виробничого процесу.*

Практична цінність. *Дане дослідження розширює існуючі методи контролю якості у металургійній промисловості та демонструє ефективність застосування статистичного методу 3 сигм для моніторингу та аналізу часових рядів в умовах реального виробництва. Отримані результати можуть бути використані для розробки більш точних систем управління якістю продукції та вжиття оперативних коригуючих заходів.*

Ключові слова: *часові ряди; метод 3 сигм; фільтр Калмана; доменна піч; прогноз; аналіз.*

I. ВСТУП

Хід доменного процесу можна контролювати на підставі даних про хімічний аналіз чавуну на випуску доменної печі, що являють собою часовий ряд значень процентного вмісту в чавуні таких хімічних елементів, як кремній, фосфор, сірка та ін.

Хімічний склад чавуну на випуску доменної печі є одним із ключових параметрів, що впливають на якість кінцевої продукції. Точні та своєчасні дані про хімічний склад дозволяють контролювати виробничий процес, виявляти відхилення та за потреби впроваджувати коригуючі заходи. У цій роботі проведено дослідження часових рядів даних про хімічний склад чавуну з використанням модифікованої процедури калманівської фільтрації та прогнозу, доповненої методом контролю за правилом 3 сигм.

Метод 3 сигм, що широко використовується в статистичному контролі якості, дозволяє ефективно виявляти аномалії та викиди в даних. Цей метод заснований на встановленні контрольних меж на рівні середнього значення, збільшеного або зменшеного на три стандартні відхилення. Значення, що виходять за ці межі, розглядаються як аномальні та потребують подальшого аналізу. Застосування методу 3 сигм до аналізу часових рядів дозволяє не тільки виявляти значні відхилення даних, а й своєчасно реагувати на зміни у виробничому процесі.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

До недавнього часу вважалося, що часові ряди які описують результати хімічного аналізу чавуну на випуску доменної печі, відповідають гауссівському розподілу [1].

В рамках дослідження [2], автором даної роботи було спростовано гіпотезу про гауссівські (нормальні) властивості даних про хімічний склад чавуну на випуску. Згодом, автором було опубліковано результати дослідження стохастичних властивостей досліджуваних часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску, методами нелінійної динаміки та детермінованого хаосу, які однозначно підтвердили раніше висунуту гіпотезу про фрактальний характер досліджуваних часових рядів [3]. Разом з тим, виникла потреба у впроваджені алгоритмів контролю та прогнозування значень

© Сіданченко В.В., 2024
DOI 10.15588/1607-6761-2024-1-5

хімічного складу чавуну (з метою виявлення аномалій та формування оптимальних керуючих впливів на хід процесу) з урахуванням їх фрактальних властивостей, оскільки, традиційні методи прогнозу виявились неадекватними відповідно до характеру досліджуваного процесу [4]-[5].

Раніше, автором даної роботи (у співавторстві) було запропоновано модифікований алгоритм фільтрації та прогнозу часових рядів на базі фільтра Калмана [6]. Цей метод є розширенням класичного фільтра Калмана. У контексті доменного виробництва модифікований фільтр Калмана може застосовуватися для прогнозування хімічного складу чавуну та контролю аномальних явищ доменного процесу. З цією метою нами пропонується доповнити модифіковану процедуру калманівської фільтрації та прогнозу методом контролю аномалій за правилом 3 сигм. Таким чином, впровадження запропонованого модифікованого алгоритму є актуальним, оскільки дозволить оптимізувати процеси змішування сировини та управління тепловою роботою горна доменної печі, забезпечуючи мінімізацію втрат і покращення якості кінцевого продукту.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є розробка та дослідження методу контролю доменного процесу за відсутності можливості аналітичного опису його поведінки, котрий дозволяє виявляти аномалії виробничого процесу.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Контроль та прогнозування хімічного складу чавуну на випуску доменної печі є критично важливими завданнями для забезпечення високої якості кінцевої продукції та оптимізації виробничих процесів. Точне визначення вмісту ключових елементів у чавуні, таких як кремній, марганець, фосфор та сірка, дозволяє не лише підтримувати стабільну якість кінцевого продукту доменної плавки, але й запобігати можливим дефектам та збоям у подальших етапах металургійного виробництва.

Сучасні засоби контролю та прогнозування хімічного складу часто стикаються з низкою обмежень та проблем. Традиційні методи аналізу, такі як лабораторні дослідження проб, хоч і мають високу точність, часто не дозволяють забезпечити оперативний моніторинг у реальному часі. Це призводить до затримок отримання даних і знижує ефективність виробничого процесу.

Автоматизовані системи контролю, незважаючи на їх прогресивність, можуть страждати від проблем калібрування, технічних збоїв та обмеженої точності в умовах змінних параметрів роботи доменної печі.

Крім того, існуючі методи прогнозування хімічного складу чавуну часто не враховують всіх можливих факторів, що впливають на процес плавки, таких як зміна сировина, коливання температурних режимів і динаміку хімічних реакцій в доменній печі. Це призводить до недостатньої точності прогнозів та збільшує ризик виникнення аномалій та викидів у даних про хімічний склад чавуну.

Як зазначалося вище, в рамках дослідження перелічених проблем, автором було запропоновано модифікований алгоритм на базі калманівської фільтрації який є інваріантний до властивостей оброблюваного процесу, що дозволяє підвищити достовірність і точність прогнозу нестаціонарних процесів при неможливості отримання їх аналітичної моделі, а також реалізовувати прогноз хімічного складу чавуну в реальному часі на основі раніше отриманих даних з мінімальними відносними помилками [6].

Аналіз наявних автоматизованих систем управління доменним процесом підтверджує різноманітність функцій, технічних можливостей та інформаційних ресурсів, а також ієрархічну структуру цих систем. Огляд фахових публікацій вказує на те, що найвищий рівень автоматизації може бути досягнутий за умови використання автоматизованих систем, які поєднують математичні моделі, базу знань та реально-часові показники плавки.

Запропонований модифікований алгоритм на базі калманівської фільтрації представляє собою потужний засіб оцінки та прогнозування. У контексті основного завдання, а саме покращення точності та достовірності прогнозних даних, цей алгоритм має бути впроваджений у систему управління доменною піччю. На даному етапі важливо проаналізувати фактори, які впливають на зміни хімічного складу під час плавки. Це дозволить з більшою достовірністю визначити необхідний вплив на процес доменної плавки.

Основні фактори, що впливають на склад чавуну, включають витрату коксу та залізорудних матеріалів, параметри комбінованого дуття, властивості шлаку тощо. Важливо також враховувати вплив теплового режиму горна, оскільки він має вирішальне значення для структури чавуну [7], [8].

Формування структури чавуну відбувається при затвердінні виливки. Основними факторами, що впливають на структуроутворення чавуну, є його хімічний склад та швидкість охолодження виливки у формі.

Кремній Si сприяє графітизації чавуну та покращує його ливарні властивості. У сірих чавунах міститься 0,8...4,5% Si.

Фосфор P підвищує текучість чавуну, тому допустимий його вміст до 0,4%, але у відповідних чавунних виливках міститься фосфору менше 0,15%, так як зі зростанням вмісту фосфору збільшується крихкість чавуну.

Сірка S ускладнює графітизацію, збільшує крихкість і погіршує текучість чавуну, тому сірки в чавунах повинно бути не більше 0,1%.

Відхилення у складі хоча б одного із хімічних елементів чавуну, може призвести до виробничого браку, і як результат, до погіршення економічних показників виробництва.

Для управління таким складним технологічним агрегатом як доменна піч майстер повинен мати у своєму розпорядженні підсистеми вимірювань, оцінювання, зберігання, обробки інформації, а також інтелектуальні системи управління, включаючи блоки прогнозування, які дозволять йому приймати адекватні рішення щодо внесення коректив у технологічні процеси відповідно до вимог регламенту [9]-[10].

Дослідження стохастичних властивостей даних про хімічний склад чавуну на випуску, підтвердили їх фрактальний характер [11].

У нелінійних динамічних системах дуже важливою є візуальна оцінка. Як видно з рисунку 1 який ілюструє динаміку вмісту кремнію у чавуні, мають місце ділянки де процентне значення кремнію перевищує необхідні межі 0,8...4,5%.

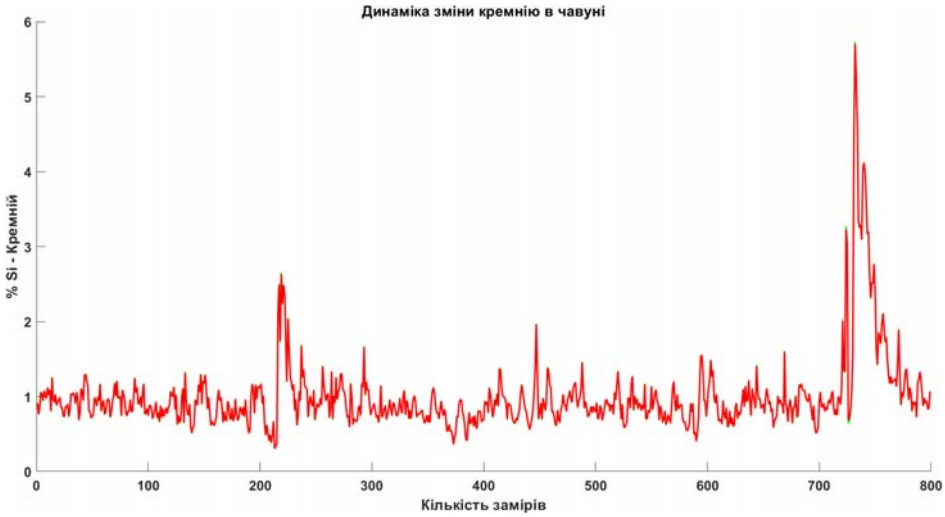


Рисунок 1. Динаміка вмісту кремнію

Виникає необхідність дослідження часових рядів даних про вміст основних хімічних елементів чавуну на випуску на предмет аномалій які можуть сприяти погіршенню технологічного процесу і як результат, збільшенню виробничого браку.

Для вирішення поставленої задачі було запропоновано застосувати метод 3 сигм.

Метод 3 сигм є статистичним методом, що використовується для виявлення аномалій даних часових рядів. У контексті аналізу часових рядів цей метод дозволяє виявляти значення, які значно відхиляються від очікуваного діапазону, що базується на характеристиках розподілу даних [12]-[13]. Даний метод часто використовується в теорії нормального розподілу, де більшість даних (приблизно 99.7%) перебувають у межах трьох стандартних відхилень (сигм) від середнього значення.

У цій роботі ми застосуємо цей метод, інтегруючи його з модифікованою процедурою калманівської фільтрації, яка полягає у наступному.

Відомо, що рівняння фільтра Калмана можна записати у вигляді:

$$\begin{aligned} \hat{X}_n &= F_n \hat{X}_{n-1} + K_n \left[S_n - H_n F_n X_{n-1} \right] \\ K_n &= A_n H_n^T \left[H_n A_n H_n^T + R \right]^{-1} \\ A_n &= F_n P_{n-1} F_n^T \\ P_n &= A_n - K_n H_n A_n ; \end{aligned} \quad (1)$$

де $\hat{X}_n$ – оціночний вектор стану; F_n – матриця переходу зі стану n – 1 у n; K_n – коефіцієнт підсилення фільтра Калмана; S_n – виміряне значення сигналу; P_n – матриця помилок; H_n – матриця умов вимірювання; R – дисперсія шуму процесу. Індекс «Т» означає транспонування матриці.

Рівняння (1) може застосовуватися для отримання оцінок напрямку, якщо матриця переходу F_n відома, що по суті є аналітичним видом оброблюваної залежності.

У нашому випадку аналітичний вид функції, а отже, значення матриці F_n невідомі. Тому доцільно виконати апроксимацію F_n у кожній точці, рядом Тейлора n – го порядку.

За результатами виконання процедури апроксимації матриця переходу матиме вигляд:

$$F_n = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \alpha_n \\ 0 & 1 & 2 & \beta_n \\ 0 & 0 & 1 & \gamma_n \\ -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Знаючи матрицю переходу, можна побудувати модифікований алгоритм фільтра Калмана:

$$\begin{aligned} \hat{x}_n &= \hat{x}_{n-1} + \hat{y}_{n-1} + \hat{z}_{n-1} + \alpha_n C_n \\ \hat{y}_n &= \hat{y}_{n-1} + 2\hat{z}_{n-1} + \beta_n C_n \\ \hat{z}_n &= \hat{z}_{n-1} + \gamma_n C_n \\ C_n &= S_n - \hat{x}_{n-1} - \hat{y}_{n-1} - \hat{z}_{n-1} \end{aligned}, \quad (2)$$

де α_n, β_n, γ_n - компоненти вектора коефіцієнта посилення.

Для реалізації процедури прогнозу достатньо в (1) ввести $H_n = [100]$, а індекс *n* представити як *n* = *n* + *k*, де *k* – кількість заздалегідь встановлених кроків прогнозу.

З метою виявлення аномалій доповнимо процедуру фільтрації та прогнозу методом 3 сигм який полягає в наступному.

Ми пропонуємо процедуру обчислення статистики такого вигляду:

$$B_M = \sum_{l}^{M} b_l, B_0 = 0, l = 1,2...,M \quad (3)$$

$$b_l = sign\{S_l - \hat{X}_l\} = \begin{Bmatrix} +1, S_l - \hat{X}_l \geq 0 \\ -1, S_l - \hat{X}_l < 0 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

на інтервалі $(n-M, n)$. Визначені на цьому інтервалі величини $(B_M - min\, B_M)$ та $(max\, B_M - B_M)$ порівнюються з порогом $h = 3\sigma$. У разі перевищення значення *h* однієї з величини приймається рішення про виявлення аномалії, параметрам фільтра присвоюється початкове значення, а фільтрація продовжується з моменту .

Ось основні етапи застосування методу:

1. Оцінка поточного значення $\hat{x}_n$ (на підставі рівняння (2)) та середньоквадратичного відхилення σ (стандартным методом).

2. Обчислення статистики B_M з виразу (3) з урахуванням (4).

3. Обчислення значень контрольних меж $(B_M - min\, B_M)$ та $(max\, B_M - B_M)$.

4. Порівняння значень контрольних меж із порогом $h = 3\sigma$. У разі перевищення значення h однієї з величини контрольних меж приймається рішення про виявлення аномалії.

5. Сигналізація про появу аномалії.

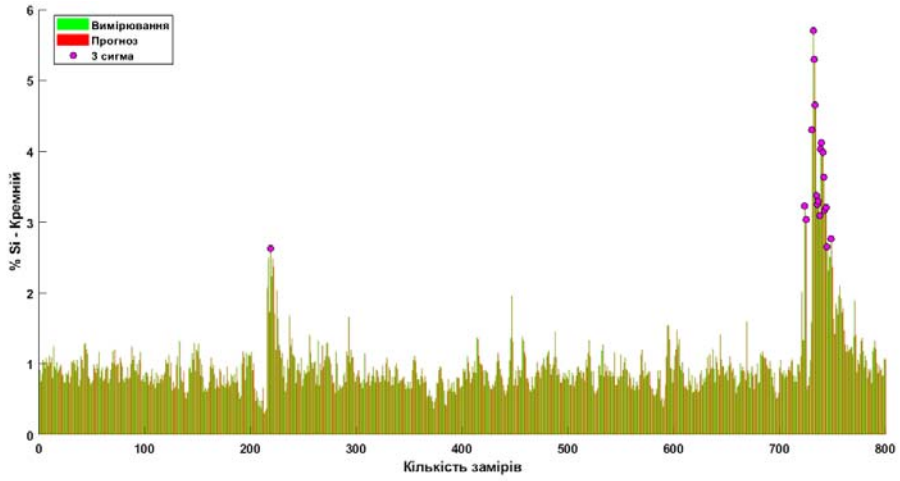
6. Повернення до процесу оцінки, прогнозу та виявлення аномалії.

Кожне значення часового ряду перевіряється на предмет того, чи потрапляє воно в діапазон між верхньою контрольною межою та нижньою контрольною межою. Значення, що виходять за ці межі, вважаються аномальними [14].

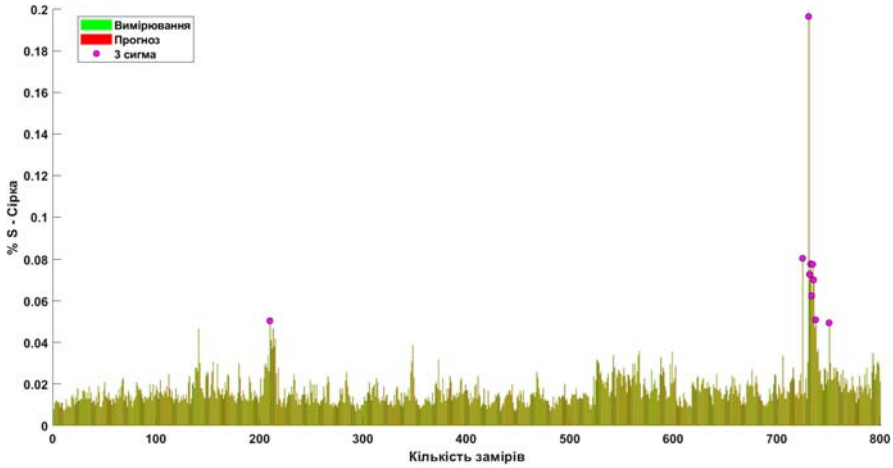
Для проведення дослідження використовувалися часові ряди, які представляють відсотковий вміст основних хімічних елементів чавуну на випуску доменної печі, отримані в різні часові періоди на доменній печі №3 (ДП-3) Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча (ММК). Час кожної плавки становить близько 2 годин. Кожна точка відповідає одній плавці. Для побудови прогнозу було використано 800 точок (значень відсоткового вмісту кожного хімічного елемента), отриманих після кожної плавки [15].

На рисунку 2 представлені графіки які ілюструють роботу запропонованого модифікованого алгоритму прогнозу значень часових рядів на базі фільтра Калмана із вбудованою функцією виявлення аномалій із застосуванням функції 3 сигм. Де рис. 2а - прогноз та оцінка значень хімічного складу кремнію Si; рис 2б - прогноз та оцінка значень хімічного складу сірки S; рис. 2в - прогноз та оцінка значень хімічного складу фосфору P.

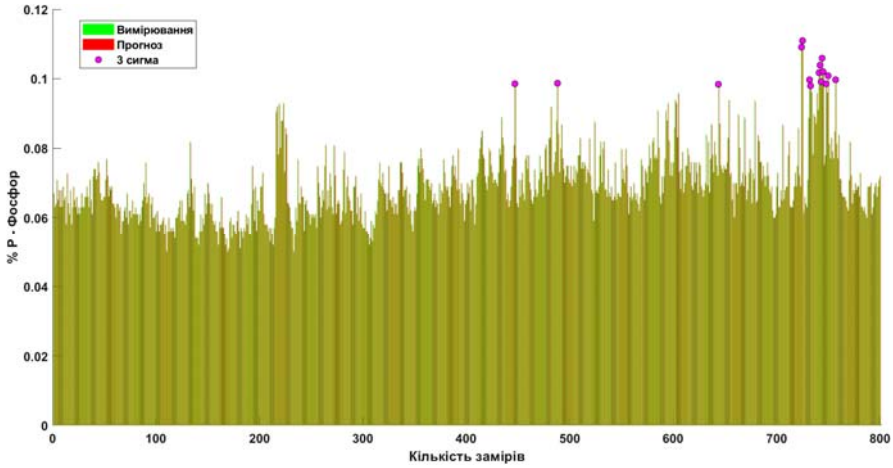
На графіках зеленим кольором відображені початкові значення хімічних елементів чавуну, червоним кольором відображені прогнозні значення отримані за допомогою запропонованого алгоритму, точки рожевого кольору вказують на значення які перевищують межу 3 сигм.



а



б



в

Рисунок 2. Результати роботи алгоритму з функцією виявлення аномалій

Як видно з отриманих графіків прогнозу основних елементів хімічного складу чавуну, мають місце точки, що значно перевищують поріг 3 сигм, що сигналізує про значні відхилення, які вимагають уважного аналізу оператором доменного цеху. Це може бути пов'язане із процесуальними, технічними чи якісними аспектами виробництва. Важливо використовувати ці дані для виявлення причин відхилень та вжиття заходів щодо корекції процесу, щоб забезпечити стабільність та високу якість чавуну на випуску.

Розглянемо приклад можливої інтеграції запропонованої реалізації модифікованого фільтра Калмана до системи управління тепловим режимом доменної печі (рис. 3), впровадженої на доменній печі № 9 металургійного комбінату «Криворіжсталь». На цей час серед функціонуючих на доменних печах по всьому світу систем контролю й управління лише деякі мають функцію оперативного впливу на процес доменної плавки.

Ці недоліки здебільшого пов'язані з некоректним підходом до аналізу даних про хімічний склад чавуну на випуску протягом багатьох десятиліть і, як наслідок, із використанням прогнозних моделей, неадекватних характеру прогнозованого процесу.

Зважаючи на пріоритети впровадження на доменних комплексах України сучасних систем управління доменним процесом, насамперед потрібно підвищувати інформаційний рівень систем центрального контролю, доповнивши їх блоками прогнозування контрольованих параметрів. Різностороннє опрацювання інформації дасть змогу значно підвищити ефективність використання засобів контролю [16].

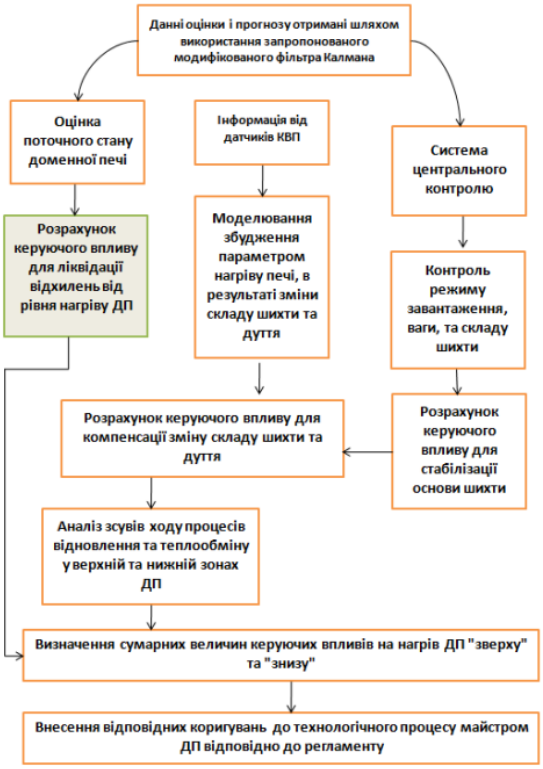


Рисунок 3. Приклад можливої реалізації системи управління з урахуванням застосування впливу на режим доменної плавки

V. ВИСНОВКИ

З огляду на отримані результаті дослідження, можна зробити наступні висновки:

1. Розроблено метод, що дозволяє виконувати оцінку та прогноз нестаціонарних стохастичних процесів з невідомою аналітичною моделлю, котрий включає вбудовану процедуру виявлення аномалій, засновану на методі 3 сигм.

Перевищення порога 3 сигм може свідчити про порушення у виробничому процесі. Наприклад, це може бути результатом нестабільного подачі сировини, змінами параметрів доменної печі (температура, тиск, швидкість подачі дуття і т.д.), або технічними збоями.

2. Виконано дослідження реальних часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. Показано, що розроблений метод дозволяє ефективно виявляти аномалії у поведінці нестаціонарного процесу.

Це може призводити до непередбачуваних змін у кінцевому хімічному складі чавуну.

3. Запропоновано можливий варіант практичної реалізації системи управління, що використовує розроблений метод.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Biswas S., Monroe C., Prucha T. Use of published experimental results to validate approaches to gray and ductile iron mechanical properties prediction // International Journal of Metalcasting. - 2017. - 11: 656-674.

[2] Сіданченко В. В. Перевірка характеру розподілу даних про хімічний склад чавуну на випуску // Information technology: computer science, software engineering and cyber security. - 2023. - № 3. - С. 65-69. DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-3-8

[3] Сіданченко В.В., Нікольська О.І. Методи нелінійної динаміки в задачі прогнозування хімічного складу чавуну на випуску // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. - 2023, 2: 76-83. DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-2-9

[4] Гуліна І. Г. Адаптивна САУ складним багатозв'язним об'єктом управління з інтелектуальним прогнозуванням // Системи обробки інформації. - 2011. - № 87. - С. 57-62. - ISSN 16817710

[5] Cameron I. Blast furnace ironmaking: Analysis, control, and optimization. - Elsevier, 2019.

[6] Сіданченко В. В., Гусєв О. Ю., Нікольська О. І. Експериментальне дослідження ефективності модифікованої процедури прогнозу фрактальних процесів за Калманом // Електротехнічні та інформаційні системи. - 2024. - № 105. - С. 3-9. DOI: doi.org/10.32782/EIS/2024-105-1

[7] Невкипіла М. В. Дослідження джерел вхідної інформації і розробка структури та основних технічних параметрів засобу відображення інформації в АСК ТП доменної печі // Математичне моделювання. - 2015. - № 1. - С. 36-38.

[8] Жигуц Ю. Ю., Лазар В. Ф., Теличко В. Ф. Технологія отримання термітних кременистих чавунів // НАУКОВИЙ ВІСНИК. - 2011. - №11.

[9] Крячко, Г. Ю., Сігарьов Є. М. Оцінка змін продуктивності і обмежень у форсуванні ходу при збільшенні об'єму доменних печей // Метал та лиття України. - 2023. DOI: doi.org/10.15407/steelcast2023.02.008

[10] Большаков, В. И., Тубольцев Л. Г. Проблеми і роль наукових досліджень у розвитку металлургії України // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. - 2011.

[11] Гусєв О. Ю., Сіданченко В. В. Фрактальний аналіз реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі // Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security. - 2022. - № 2. - С. 24-31. DOI: doi.org/10.32782/IT/2022-2-3

[12] Loucks D. P. Developing and implementing decision support systems: a critique and a challenge 1 // JAWRA Journal of the American Water Resources Association. - 1995. - 31.4: 571-582.

[13] Shpak N. The application of tools for assessing the financial security of enterprises. In*: Forum Scientiae Oeconomia.* 2022. p. 29-44.

[14] Олішевський І.Г. Автоматизована методика розрахунку параметрів для нетрадиційних технологій опалення та кондиціонування будівель/ І.Г. Олішевський, Г.С. Олішевський // Електротехніка та електроенергетика. / Запорізький нац. ун-т «Запорізька політехніка». – Запоріжжя, 2021. – № 3. – С. 40-47. DOI: doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4

[15] Kornienko V.I., Gerasina A.V., Gusev A.Yu. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems, Taylor & Francis Group, London, 2013, p.p. 183-192. DOI: doi.org/10.1201/b16355

[16] Гончар О. В. Забезпечення якості даних обстеження капітальних інвестицій на етапі поширення результатів вибіркового обстеження // Інвестиції: практика та досвід. - 2012. - № 12. - С. 4-10.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2024

DEVELOPMENT AND STUDY OF A METHOD FOR CONTROLLING ANOMALOUS BEHAVIOR IN THE BLAST FURNACE PROCESS

SIDANCHENKO V.V. PhD student at the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, e-mail: vladmazur49@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5581-9177

Purpose. *To develop and investigate a method for controlling the blast furnace process in the absence of an analytical description of its behavior, which allows for the detection of anomalies in the production process.*

Methodology. *This study utilizes methods for evaluating and forecasting time series based on the Kalman filter algorithm, fractal analysis, and nonlinear dynamics.*

Findings. *A method has been developed that allows for the evaluation and forecasting of non-stationary stochastic processes with an unknown analytical model. This method includes an embedded anomaly detection procedure based on the 3-sigma method. Research was conducted on real-time series data of the chemical composition of cast iron at the blast furnace output. It has been demonstrated that the developed method effectively detects anomalies in the process behavior. A possible implementation of a control system using the proposed method has been considered.*

Originality. *For the first time, a modification of the suboptimal Kalman-type filter-forecaster has been developed, invariant to the properties of the processed process. This modification improves the reliability and accuracy of forecasting non-stationary processes when it is impossible to obtain their analytical model and detects production process anomalies using an embedded procedure based on the 3-sigma method. For the first time, a study of time series data on the chemical composition of cast iron at the blast furnace output using the 3-sigma method has been conducted, which allowed for the identification of zones with anomalous values and outliers, indicating significant deviations in the production process behavior.*

Practical value. *This research expands existing quality control methods in the metallurgical industry and demonstrates the effectiveness of the statistical 3-sigma method for monitoring and analyzing time series in real production conditions. The obtained results can be used to develop more accurate quality control systems and take prompt corrective actions.*

Keywords: *Time series; 3-sigma method; Kalman filter; blast furnace; forecasting; analysis.*

REFERENCES

[1] Biswas, S., Monroe, C., & Prucha, T. (2017). Use of published experimental results to validate approaches to gray and ductile iron mechanical properties prediction. Inter. *Metalcast.* 11 (4), 656–674.

[2] Sidanchenko V.V. (2023). Perevirka kharakteru rozpodilu danykh pro khimichnyi sklad chavunu na vypusku [Examination of the data distribution nature on the chemical composition of cast iron at the output] *Information technology: computer science, software engineering and cyber security*. № 3. 65-69. (in Ukrainian.) DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-3-8

[3] Sidanchenko, V., & Nikolska, O. (2023). Metody neliniinoi dynamiky v zadachi prohnozuvannia khimichnoho skladu chavunu na vypusku [Methods of non-linear dynamics in the problem of forecasting the chemical composition of cast iron at the output]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 76-83. (in Ukrainian) DOI: doi.org/10.32782/IT/2023-2-9

[4] Gulina I. (2011). Adaptyvna SAU skladnym bahatozviaznym obiektom upravlinnia z intelektualnym prohnozuvanniam. *Systemy obrobky informatsii,* 87, 57-62. (in Ukrainian)

[5] Cameron, I., Sukhram, M., Lefebvre, K., & Davenport, W. (2019). Blast furnace ironmaking: Analysis, control, and optimization. *Elsevier*.

[6] Sidanchenko V., Gusev O., Nikolska O. (2023). Eksperymentalne doslidzhennia efektyvnosti modyfikovanoi protsedury prohnozu fraktalnykh protsesiv za kalmanom [The experimental investigation of the effectiveness of the modified procedure for forecasting fractal processes with Kalman]. *Elektrotekhnichni ta informatsiini systemy,* 105, 3-9. (in Ukrainian.) DOI: doi.org/10.32782/EIS/2024-105-1

[7] Nevkypila, M. V. (2015). Doslidzhennia dzherel vkhidnoi informatsii i rozrobka struktury ta osnovnykh tekhnichnykh parametriv zasobu vidobrazhennia informatsii v ASK TP domennoi pechi. *Matematychne modeliuvannia*, (1), 36-38. (in Ukrainian)

[8] Zhyhuts, Yu., Lazar, V., Telychko, V. (2011). Tekhnolohiia otrymannia termitnykh kremenystykh chavuniv. *Naukovyi visnyk*, 11, 5. (in Ukrainian)

[9] Kriachko, H. Yu., & Siharov, Ye. M. (2023). Otsinka zmin produktyvnosti i obmezhen u forsuvanni khodu pry zbilshenni obiemu domennykh pechei. *Metal ta lyttia Ukrainy*, 31(2). (in Ukrainian) DOI: doi.org/10.15407/steelcast2023.02.008

[10] Bolshakov, V. Y., & Tuboltsev, L. H. (2011). Problemy i rol naukovykh doslidzhen u rozvytku metallurhii Ukrainy. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoi metalurhii.*

[11] Gusev, O., & Sidanchenko, V. (2022). Fraktalnyi analiz realnykh danykh pro khimichnyi sklad chavunu na vypusku domennoi pechi [Fractal analysis of real data on the chemical compositionof cast iron at the output of a blast furnace]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, (2), 24-31. (in Ukrainian) DOI: doi.org/10.32782/IT/2022-2-3

[12] Loucks, D. P. (1995). Developing and implementing decision support systems: a critique and a challenge 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 31(4), 571-582.

[13] Shpak, N., Podolchak, N., Karkovska, V., Sroka, W., & Horbal, N. (2022, June). The application of tools for assessing the financial security of enterprises. In *Forum Scientiae Oeconomia* (Vol. 10, No. 2, pp. 29-44).

[14] Olishevskyi, I., & Olishevskyi, H. (2021). Automated method of calculation of parameters for non-traditional heating technologies and conditioning of buildings. *Electrical Engineering and Power Engineering,* (3), 40–47. https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-3-4

[15] Kornienko, V. I., Gusev, A. Y., Gerasina, A. V., & Kornienko, V. I. (2013). Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production. *Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems*, 183-192. DOI: doi.org/10.1201/b16355

[16] Honchar, O. V. (2012). Zabezpechennia yakosti danykh obstezhennia kapitalnykh investytsii na etapi poshyrennia rezultativ vybirkovoho obstezhennia. *Investytsii: praktyka ta dosvid,* (12), 4-10. (in Ukrainian.)