

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.03

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-105-1>

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОДИФІКОВАНОЇ ПРОЦЕДУРИ ПРОГНОЗУ ФРАКТАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА КАЛМАНОМ

Сіданченко Владислав Вадимович,

аспірант кафедри безпеки інформації та телекомунікацій
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-5581-9177

Гусєв Олександр Юрійович,

кандидат фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-0548-728X

Нікольська Олена Ігорівна,

старший викладач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-9283-9214

Вступ. У сучасній металургії стрімкий розвиток технологій ставить перед галуззю виклики у сфері покращення якості продукції та оптимізації виробничих процесів. Однією з ключових складових цього процесу є контроль і забезпечення відповідного хімічного складу чавуну на етапі випуску з доменної печі. У цьому контексті автоматизований контроль і прогнозування хімічного складу чавуну стають важливими інструментами для підвищення ефективності процесу виробництва якості кінцевого продукту доменної плавки – чавуну.

Найточніша відповідність хімічного складу чавуну заданим параметрам є фундаментальною умовою для досягнення необхідних характеристик кінцевої продукції доменної плавки. Автоматизований контроль дає змогу швидко реагувати на зміни у виробничому процесі та підтримувати хімічний склад заданої якості. Це знижує кількість виробничого браку, покращує якість продукції та знижує економічні втрати.

Наукова новизна. Як рішення поставлених завдань авторами запропоновано модифікований алгоритм фільтра Калмана. Цей метод є розширенням класичного фільтра Калмана. У контексті металургійної промисловості модифікований фільтр Калмана може застосовуватися для прогнозування хімічного складу чавуну на основі раніше отриманих даних про хімічний склад на випуску доменної печі. Впровадження запропонованого модифікованого алгоритму дасть змогу оптимізувати процеси змішування сировини, забезпечуючи мінімізацію втрат і покращення якості кінцевого продукту.

Ключові слова: стохастичні сигнали, прогнозування, оцінка, фрактальний аналіз, динамічна система.

Sidanchenko Vladyslav, Gusev Oleksandr, Nikolska Olena. The experimental investigation of the effectiveness of the modified procedure for forecasting fractal processes with Kalman

Introduction. In modern metallurgy, rapid technological advancements present challenges in improving product quality and optimizing production processes. One of the key components of this process is controlling and ensuring the necessary chemical composition of cast iron at the blast furnace stage. In this context, automated control and prediction of the chemical composition of cast iron become important tools for enhancing the efficiency of the production process for the quality of the final product of the blast furnace – cast iron.

The most accurate correspondence of the chemical composition of cast iron to the specified parameters is a fundamental condition for achieving the necessary characteristics of the final production of the blast furnace. Automated control allows for rapid responses to changes in the production process and maintaining the chemical composition of the desired quality. This reduces waste, improves product quality, and reduces economic losses.

Scientific novelty. As a solution to the stated tasks, the authors propose a modified Kalman filter algorithm. This method is an extension of the classical Kalman filter. In the context of the metallurgical industry, the modified Kalman filter can be applied to predict the chemical composition of cast iron based on previously obtained data on the chemical composition at the blast furnace output. The implementation of the proposed modified algorithm will optimize the raw material mixing processes, minimizing losses, and improving the quality of the final product.

Key words: stochastic signals, prediction, estimation, fractal analysis, dynamic system.

Аналіз попередніх досліджень. Ґрунтуючись на матеріалах роботи [1], у якій наведено обґрунтування гіпотези про фрактальний характер часових рядів, якими представлені результати хімічного аналізу чавуну на випуску доменної печі, зроблено висновок, що традиційні методи прогнозування неадекватні характеру досліджуваних процесів.

З метою підвищення достовірності та точності прогнозних значень досліджуваних часових рядів у роботі [2] досліджено експериментальні дані з використанням методів нелінійної динаміки. Було встановлено, що часова еволюція системи відповідає стійкому стану – дивному атрактору. Результат аналізу квазіциклів показав, що їх ланки мають напрямок обертання за годинниковою стрілкою, що, зі свого боку, свідчить про невеликий ризик помилкового прогнозу. У процесі біфуркаційного аналізу були виявлені зони біфуркації, а також переходи між різними станами системи, що може вказувати на зміни робочої сировини або технології виробництва.

Для застосування теорії фільтрації та прогнозу до технічних систем потрібна розробка математичної теорії, а також методів моделювання систем, синтезу фільтрів-прогнозаторів та їх практичної реалізації. Для лінійних систем із лінійними вимірами при гаусівських шумах теорія фільтрації добре розроблена й існують точні алгоритми оптимальних рішень. Однак для інженерної практики потрібні надійні методи вирішення завдань моделювання, проектування та реалізації фільтрів-прогнозаторів, адекватних досліджуваним сигналам.

На практиці здебільшого замість визначення «оптимальний» застосовують термін «субоптимальний». Оскільки оптимізація характеристик фільтра зазвичай передбачає безліч впливових факторів, це сильно ускладнює або унеможливає аналітичний опис процесу. Тому оптимальне рішення переважно використовується лише для оцінки описаного реального фільтра за відомої аналітичної моделі досліджуваного сигналу.

Існує кілька основних методів фільтрації та прогнозу стохастичних процесів. Відправною точкою стали роботи А. Н. Колмогорова та Н. Вінера. Однак практичне застосування ці роботи отримали не відразу. Це пояснюється труднощами, по-перше, отримання точних рішень інтегральних рівнянь Вольтерри, по-друге, ідентифікації необхідного спектрального розподілу сигналів і шумів і, по-третє, фізичної системи реалізації. Багато систем, що викликають практичний інтерес, просто не

відповідали пропозиціям, прийнятим у теорії фільтра Вінера [3, 4].

Розробка фільтра Калмана – Бюсі [5, 6] в 1960-х роках відкинула багато обмежень теорії Колмогорова – Вінера. Крім того, рішення рівняння Ріккати у вигляді рекурентного обчислюваного алгоритму дало змогу створити прямий синтез схеми оцінки за допомогою ЕОМ і отримати оцінку та прогнозний сигнал у реальному масштабі часу.

Основна частина. Для оцінки та прогнозу фрактальних часових рядів авторами було розроблено модифіковану процедуру фільтра Калмана. Розглянемо ефективність застосування цієї процедури для прогнозування реальних даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі.

Отримання оцінок поточного значення у вигляді залежності від попередніх значень дає можливість простої заміни n -ї оцінки на $n + k$ здійснювати прогнозування процесу на k кроків вперед.

Відомо, що рівняння фільтра Калмана можна записати у вигляді:

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

де \hat{X}_n – оціночний вектор стану; F_n – матриця переходу зі стану $n - 1$ у n ; K_n – коефіцієнт підсилення фільтра Калмана (ФК); S_n – вимірне значення сигналу; P_n – матриця помилок; H_n – матриця умов вимірювання. 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:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & a_n \\ 0 & 1 & 2 & b_n \\ 0 & 0 & 1 & g_n \\ -1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}\quad (2)$$

Знаючи матрицю переходу, можна побудувати модифікований алгоритм фільтра Калмана:

$$\begin{aligned} \hat{X}_n &= \hat{X}_{n-1} + \hat{Y}_{n-1} + \hat{Z}_{n-1} + \alpha_n C_n \\ \hat{Y}_n &= \hat{Y}_{n-1} + 2\hat{Z}_{n-1} + \beta_n C_n \\ \hat{Z}_n &= \hat{Z}_{n-1} + \gamma_n C_n \\ C_n &= S_n - \hat{X}_{n-1} - \hat{Y}_{n-1} - \hat{Z}_{n-1}, \end{aligned} \quad (3)$$

Однак із таким підходом виникає відома з теорії розбіжність фільтра, обумовлена кінцевим значенням порядку апроксимуючого полінома. Для уникнення розбіжності фільтра ми пропонуємо процедуру обчислення статистики такого вигляду:

$$B_M = \sum_{l=1}^M b_l, \quad B_0 = 0, \quad l = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

$$b_l = \text{sgn}(S_l - \hat{X}_l) = \begin{cases} +1, & S_l - \hat{X}_l \geq 0 \\ -1, & S_l - \hat{X}_l < 0 \end{cases} \quad (5)$$

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 . У разі перевищення значення h однієї з величини приймається рішення про розбіжність, параметрам фільтра присвоюється початкове значення, а фільтрація продовжується з моменту $(n - M)$.

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.

Для оцінки ефективності синтезованого фільтра застосуємо його для прогнозу відсоткового вмісту кремнію, сірки та фосфору в чавуні на випуску. Із цією ціллю скористаємося реальними даними, отриманими на Маріупольському металургійному комбінаті ім. Ілліча (ММК)

за період з 01.01.2011 по 26.02.2011. Розрахунки проводились у програмному середовищі MATLAB. Для побудови прогнозу було використано 600 точок (значень відсоткового вмісту досліджуваних хімічних елементів, отриманих після кожної плавки), що відповідає близько 54 добам роботи доменної печі.

За результатами роботи запропонованого алгоритму були отримані діаграми, що ілюструють прогноз на 4 кроки вперед (приблизно 8 годин роботи доменної печі) для кожного з досліджуваних компонентів чавуну. Рис. 1 – прогноз відсоткового вмісту кремнію; рис. 2 – прогноз відсоткового вмісту сірки; рис. 3 – прогноз відсоткового вмісту фосфору.

На рис. 4 наведено графіки розподілу усередненої відносної помилки прогнозу, обчисленої за формулою:

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x(i) - x(i)_{пр}}{x(i)} \right), \quad (5)$$

де $x(i)$ – дійсне значення часового ряду; $x(i)_{пр}$ – прогнозне значення; N – обсяг вибірки.

У табл. 1 наведено значення усереднених відносних помилок прогнозу.

Таблиця 1

Усереднені відносні помилки прогнозу

Хімічний елемент	Помилка прогнозу, %
Si, кремній	0,35
S, сірка	0,51
P, фосфор	0,14

З рис. 4 видно, що висота стовпців гістограм зменшується експоненційно (тобто має місце

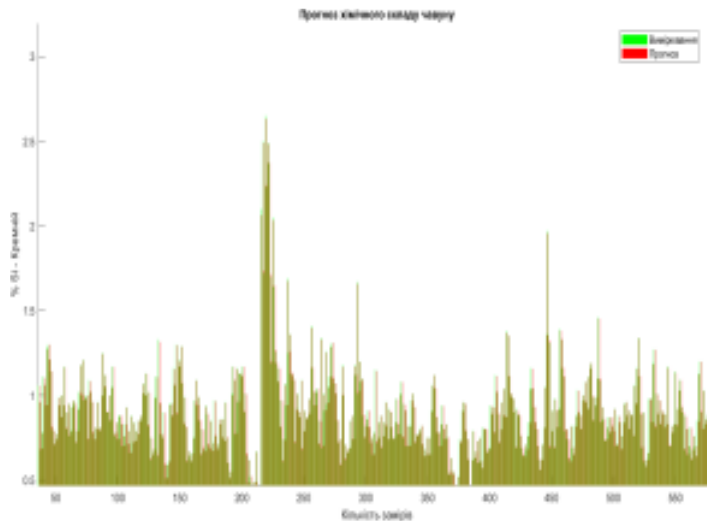


Рис. 1. Прогноз відсоткового вмісту кремнію

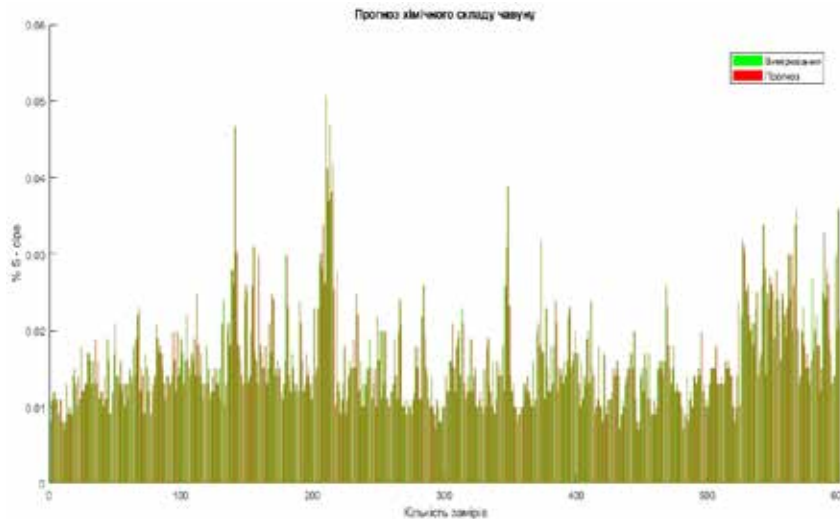


Рис. 2. Прогноз відсоткового вмісту сірки

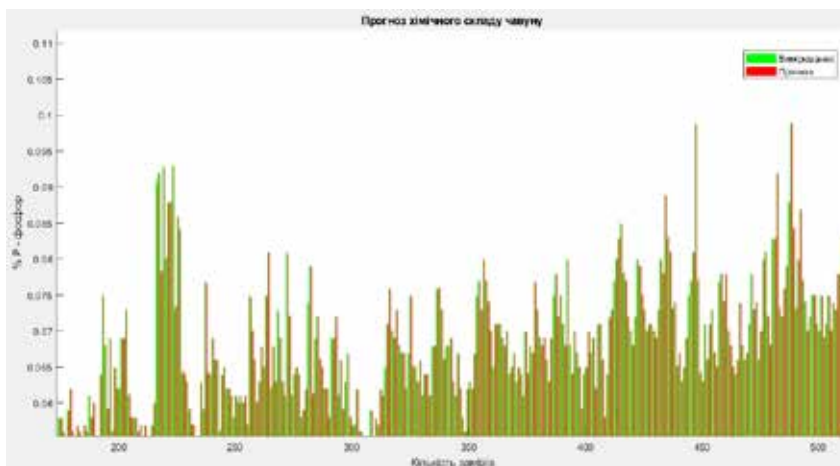


Рис. 3. Прогноз відсоткового вмісту фосфору

експоненційно спадаючий тренд). Це вказує на те, що існує більш висока концентрація вимірювань із меншими відносними помилками та значно менша кількість вимірювань із більшими відносними помилками.

Запропонований модифікований алгоритм на базі калманівської фільтрації сам по собі є лише потужним інструментом оцінки та прогнозу. У контексті основного завдання дослідження запропонований алгоритм має бути інтегрований у систему управління доменною піччю. На цьому етапі потрібно проаналізувати фактори, що впливають на зміни хімічного складу під час плавки, що, зі свого боку, дасть змогу з більшою достовірністю визначити необхідний вплив на процес доменної плавки.

Найбільше на склад чавуну впливає витрата коксу, витрата залізородних матеріалів та їх

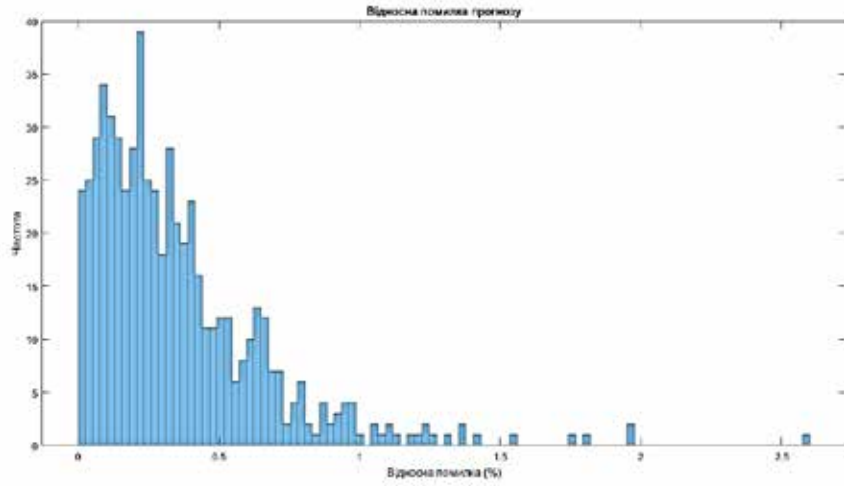
склад, параметри комбінованого дуття, властивості шлаку тощо.

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

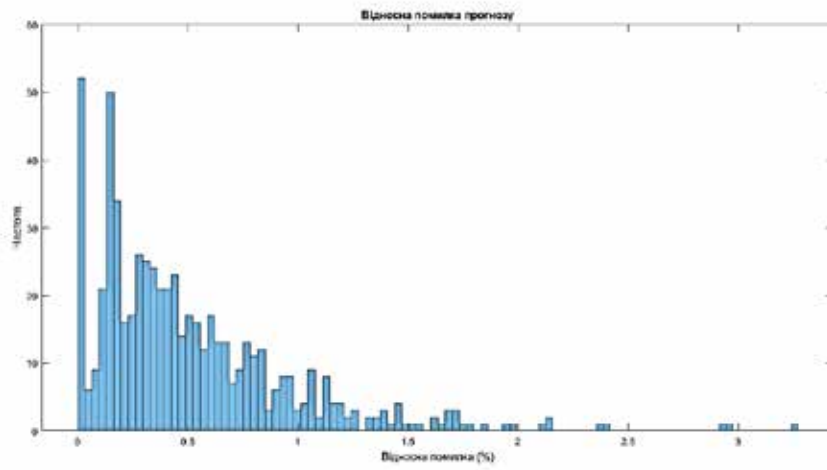
Фосфор P підвищує текучість чавуну, тому допустимий його вміст до 0,4%, але у відповідних чавунних виливках міститься фосфору менше за 0,15%, оскільки зі зростанням вмісту фосфору збільшується крихкість чавуну.

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

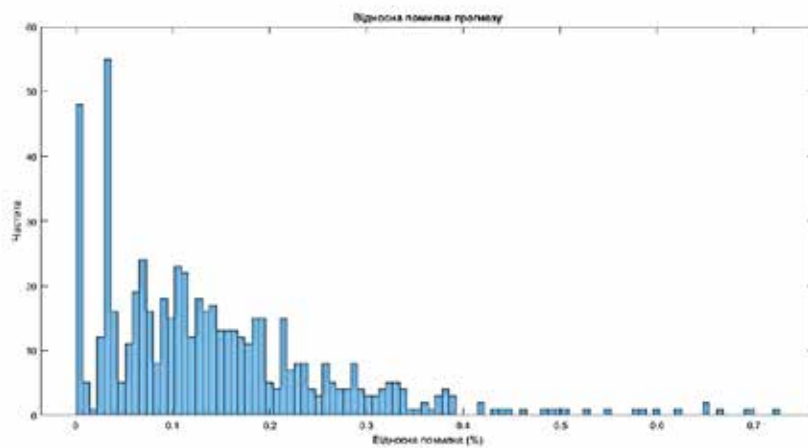
Для управління таким складним технологічним агрегатом, як доменна піч, майстер повинен мати у своєму розпорядженні підсистеми вимірювань, оцінювання, зберігання, обробки інформації, а також інтелектуальні системи управління, включно з блоками прогнозування,



а



б



в

**Рис. 4. Усереднена відносна помилка прогнозу відсоткового вмісту:
а – кремнію; б – сірки; в – фосфору**

завдяки чому він може приймати адекватні рішення щодо внесення коректив у технологічні процеси відповідно до вимог регламенту.

Розглянемо приклад можливої інтеграції запропонованої реалізації модифікованого фільтра Калмана до системи управління тепловим режимом доменної печі (рис. 5), впровадженій 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 режим 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

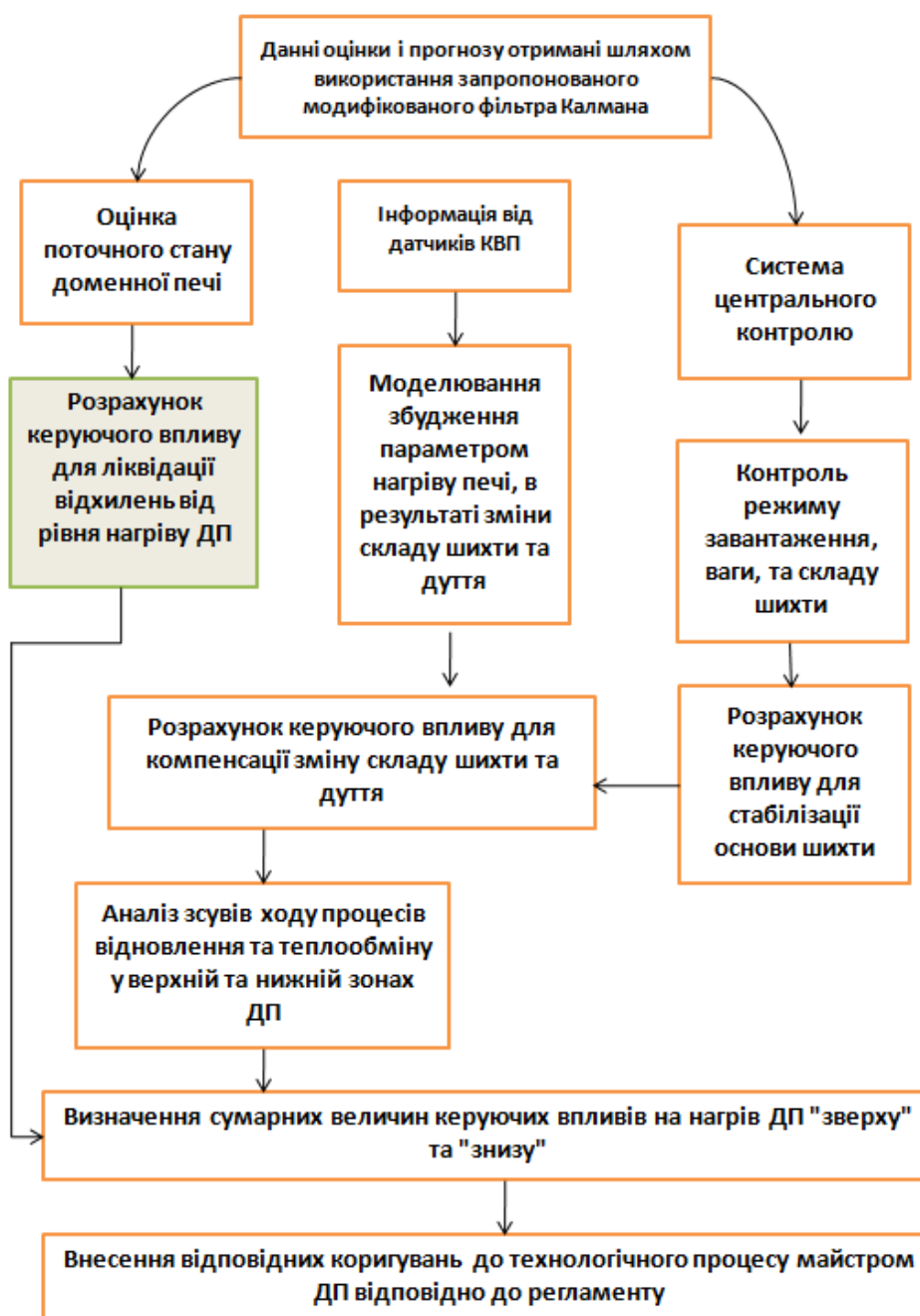


Рис. 5. Приклад можливої реалізації системи управління з урахуванням застосування запропонованого алгоритму

параметрів. Різностороннє опрацювання інформації дасть змогу значно підвищити ефективність використання засобів контролю.

Висновки. У статті було представлено реалізацію фільтра-прогнозатора на основі модифікованого фільтра Калмана. Продемонстровано

ефективність застосування фільтра на реальних даних і показано можливість застосування запропонованого алгоритму для довгострокового прогнозу відсоткового вмісту основних компонентів чавуну на випуску з малою відносною помилкою.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Гусев 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.
2. 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. С. 76–83.
3. Kolmogorov A.N. Interpolation and extrapolation of stationary casual sequences of. *Series are mathematical*. 1941. № 5.
4. Wiener N. The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. *Wiley, New York*, 1949.
5. Kalman R.E., J. *Basic Engineering*. ASME. 1960.
6. Bucy R.S., Joseph P.D. Filtering for Stochastic Processes with Applications to Guidance. *Wiley (Interscience), New York*, 1968.

REFERENCES:

1. Gusev, O.Yu., Sidanchenko, V.V. (2022). Fraktalniy analiz realnykh danykh pro khimichnyi sklad chavunu na vypusku domennoi pechi [Fractal analysis of real data on the chemical composition of cast iron at the output of a blast furnace]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. № 2. P. 24–31 [in Ukrainian].
2. Sidanchenko, V.V., Nikolska, O.I. (2023). Metody neliniinoi dynamiky v zadachi prohnouzuvannia khimichnogo 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. P. 76–83 [in Ukrainian].
3. Kolmogorov, A.N. (1941). Interpolation and extrapolation of stationary casual sequences of. *Series are mathematical*.
4. Wiener, N. (1949). The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. *Wiley, New York*.
5. Kalman, R.E. (1960). *Basic Eng. ASME*.
6. Bucy, R.S., Joseph, P.D. (1968). Filtering for Stochastic Processes with Applications to Guidance. *Wiley (Interscience), New York*.