УДК 621.395.721.5
DOI: https://doi.org/10.17721/AIT.2023.1.07

Тімур ЖЕЛДАК, канд. техн. наук, доц.
ORCID ID: 0000-0002-4728-5889
e-mail: zheldak.t.a@nmu.one
Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

Ілля ЗІБОРОВ, асп.
ORCID ID: 0000-0002-3118-387X
e-mail: ziborov.i.k@nmu.one
Національний технічний університет "Дніпровська політехніка", Дніпро, Україна

СТРУКТУРА ТА ФУНКЦІЇ ІНТЕГРОВАНОЇ СППР У ПРОЦЕСАХ КЕРУВАННЯ БАГАТОЕТАПНИМ ПРОКАТНИМ ВИРОБНИЦТВОМ

Вступ. ***Розглянуто проблему розроблення дворівневої інформаційної технології підтримки прийняття рішень у прокатному металургійному виробництві, яка охоплювала б як рівень окремих технологічних операцій, так і рівень всього виробничого процесу, спираючись на його економічні показники. Основну увагу приділено обґрунтуванню структури системи підтримки прийняття рішень (СППР) та її функціям.***

Методи. ***Використано методи аналізу та синтезу складних систем і побудови комплексних систем керування.***

Результати. ***Запропоновано модульну структуру автоматизованої СППР для керування металургійним виробництвом із конвертерним способом виготовлення сталі, яка містить сім окремих програмних модулів і шість баз даних. Усі обчислювальні, оптимізаційні та рекомендаційні процеси відбуваються в окремих модулях СППР. Розроблено алгоритм і схему взаємодії модулів і баз даних підприємства, сформульовано вхідну та вихідну інформацію для кожного з модулів. Передбачено, що кожен із виділених модулів, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язує певну оптимізаційну задачу, спрямовану на покращення глобального економічного критерію ефективності виробництва. Усі результати роботи окремих модулів розробленої системи виводяться через відповідні інтерфейси і носять рекомендаційний характер. Оператор може брати їх до виконання або ж виконати дії на власний розсуд. Обидва рішення – пропоноване і прийняте – зберігаються у відповідних базах даних.***

Висновки. ***Загалом застосування запропонованої СППР до умов прокатного виробництва за широкого асортименту продукції дозволяє зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %, а готової продукції на 4,25–4,8 % за рахунок додаткового зменшення немірної продукції та кількості обрізків.***

Ключові слова: ***інформаційна технологія, СППР, прокатне виробництво, прийняття рішень, інтеграція, бази даних, інформаційна взаємодія, структура системи.***

Вступ

Актуальною для металургійних підприємств із багатоетапним технологічним процесом є побудова комплексної багаторівневої інформаційної системи збору даних, керування та прийняття рішень. Зауважимо, що слід розглядати різні критерії ефективності такої системи на різних рівнях: локальні для окремих технологічних операцій і глобальні для всього виробничого процесу в цілому.

До глобальних критеріїв у загальному випадку належать обсяг незавершеного виробництва, час виконання замовлення та витратний коефіцієнт металу. Маючи фізичну, а точніше, технологічну природу, всі ці показники носять економічний характер. Адже незавершене виробництво – це втілені у металі кошти підприємства, які мали б працювати на прибуток. Надмірний час виконання замовлення часто призводить до відмови від термінових замовлень, навіть, якщо вони економічно вигідні, а збільшений показник витратного коефіцієнта підвищує собівартість продукції.

У розглянутому докладно в роботах (Технологічна інструкція, 2012; Технологічна інструкція, 2014) технологічному процесі виробництва прокатної продукції на підприємствах повного металургійного циклу можна виокремити такі процеси:

- планування виконання замовлень;
- підготовка плавлення (шихтування);
- виплавляння сталі (рафінація та розкислення);
- нагрівання, підготовка та розкроювання заготовок;
- прокатування та розкроювання готової продукції;
- контроль стану футерування з прогнозуванням терміну її роботи.

З огляду на викладене, для підвищення техніко-економічних параметрів у багатоетапному металургійному виробництві необхідне комплексне розв'язання проблеми керування організаційно-технологічними процесами плавлення, нагрівання, прокатування та контролю якості продукції. Підвищення ефективності виробництва може бути досягнуте за рахунок контролю технологічних параметрів, залишків матеріалів на кожному переділі та стану обладнання, задіяного в усіх послідовних операціях однією інтегрованою системою підтримки прийняття рішень.

Аналіз останніх досягнень і рішень. Проблемам інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень та інтеграції СППР кількох технологічних операцій або навіть процесів у металургійному виробництві присвячено значну кількість робіт як вітчизняних дослідників (Чертов, 2003; Самофалов, & Ходикін, 2011; Руденська, Левицький, & Михайлик, 2016; Рибалко, 2015; Грабовський, 2003; Різніченко, 2009; Гейзер, 2009), так і зарубіжних (Iancu, & Cibotariu, 2013; Ganesh, 2010; Gefrerer et al., 2000; Shanmugam et al., 2021; Zhou et al., 2022; Dering, Swartz, & Dogan, 2020; Fei, Xianyi, & Zhenghai, 2022; Feng et al., 2022; Hongwei et al., 2009; Zagoskina, Barbasova, & Shnaider, 2019; Van De Putte et al., 1999; Stein, Pauster, & May, 2003; Zarandi et al. 2010; Laha, Ren, & Suganthan, 2015; Xie et al., 2021).

У роботі (Чертов, 2003) наголошено на необхідності паралельного виконання завдання всіма ланками багатоетапного виробничого процесу й актуальності створення таких систем, які не тільки оптимальним чином виконували б наявні поточні замовлення, а й прогнозували замовлення майбутніх періодів. Останнє дозволяє увести в алгоритми планування діяльності

© Желдак Тімур, Зіборов Ілля, 2023

та контролю якості виробничого процесу процедури прогностичного керування, чим значно покращити показники якості виробничого процесу, а саме термін виконання замовлення та кількість незавершеного виробництва.

На деяких виробництвах в Україні інтегровані системи автоматизованого керування впроваджено вже понад 10 років (Самофалов, & Ходикін, 2011; Рибалко, 2015; Грабовський, 2003). У функції інтегрованих систем включено автоматизацію технологічного процесу, інформаційне відстежування руху заготовок і готової продукції, моніторинг, диспетчеризацію та аналіз виробництва, а також оперативне планування виробництва.

Авторами (Руденська, Левицький, & Михайлик, 2016) запропоновано процесну модель, що дозволяє підвищити ефективність функціонування вертикально-інтегрованої системи металургійної компанії повного циклу та забезпечити стійкість до негативних факторів зовнішнього середовища. Причому систему розглядають на найвищому економічному рівні, без деталізації технологічних процесів, які вважають детермінованими.

Установлено, що можливості технічного сполучення окремих функціональних підсистем до єдиної моделі керуючого комплексу забезпечуються такими взаємно інтегрованими системами: планування виробничих ресурсів підприємства або цеху; керування виробництвом, відкритою системою керування технологічними процесами та регулювання технологічних параметрів (Грабовський, 2003).

У роботі (Різніченко, 2009) виконано достатньо докладний аналіз існуючих інформаційних систем, які застосовують на металургійних підприємствах України, наголошено на необхідності реалізації у складі загальної інформаційної системи керування металургійним підприємством елементів реєстрації, систематизації та аналізу даних. Водночас, як і в дослідженнях (Гейзер, 2009), зазначено, що всю діяльність щодо прийняття управлінських рішень має виконувати відповідальний фахівець: менеджер, технолог, оператор тощо. Причому наголошено на важливості саме інформаційного зв'язку між окремими системами та комплексами.

Для порівняння, за кордоном на більшості великих підприємств інтеграцію інформаційних систем, створених 10–20 років тому, виконують на рівні підприємства з використанням стандартних корпоративних інформаційних систем (Iancu, & Cibotariu, 2013; Ganesh, 2010), що накладає певні обмеження. Адже будь-який універсальний механізм не дозволяє використовувати знання й аспекти виробничого процесу саме того підприємства, де подібна система застосовується.

Авторами (Gefrerer et al., 2000) наголошено на необхідності інформаційної інтеграції окремих технологічних ланок багатоетапного прокатного виробництва. Для цього пропонують розроблення і впровадження відповідного корпоративного програмного комплексу виконувати на основі сховища даних і терміналів для операторів і менеджерів, задіяних у процесах.

Перспективи розвитку металургійного, зокрема і прокатного виробництва, в Індії та Китаї – країнах, що входять до лідерів у виробництві прокату – проаналізовано в (Shanmugam et al., 2021; Zhou et al., 2022). Автори наголошують на необхідності впровадження інтегрованих інформаційних технологій та підвищенні ефективності виробництва саме за економічними показниками, серед яких – витратний коефіцієнт металу та час виконання замовлень. Також запропоновано замінювати традиційний безпосередній підхід до контролю якості та сертифікації готової продукції інтелектуальними технологіями з метою прискорення та здешевлення цих процесів.

У деяких дослідженнях (Dering, Swartz, & Dogan, 2020; Fei, Xianyi, & Zhenghai, 2022; Feng et al., 2022) застосування сучасних інформаційних технологій сконцентровано на процесі рафінації сталі. Для моделювання процесів у ванні конвертера автори (Dering, Swartz, & Dogan, 2020) використовують систему диференціальних та алгебричних рівнянь, тоді як в (Fei, Xianyi, & Zhenghai, 2022) запропоновано модель на основі прямозв'язаної нейронної мережі зі зворотним поширенням помилки. Альтернативою є запропонований у роботі (Feng et al., 2022) підхід, який ґрунтується на застосуванні для визначення керуючого впливу наївної баєсівської мережі, навченої на попередніх прикладах з відсівом помилок. Останній може бути в подальшому застосований для моделювання процесів розкислення в межах пропонованої інформаційної технології.

Авторами (Hongwei et al., 2009; Zagoskina, Barbasova, & Shnaider, 2019; Van De Putte et al., 1999; Stein, Pauster, & May, 2003; Zarandi et al., 2010) запропоновано використання в металургійних, зокрема і у прокатних виробництвах, технології експертних систем. Наприклад, учені в роботі (Hongwei et al., 2009) пропонують експертну систему для підтримки прийняття рішень оператором доменної печі, що виготовляє чавун. Натомість в (Zagoskina, Barbasova, & Shnaider, 2019) виконано спробу інтелектуального керування положенням фурми під час продування конвертера киснем із метою максимізувати ефективність процесу за економічним критерієм. У дослідженнях (Van De Putte et al., 1999) ідеться про комплексну експертну систему, що охоплює своїми порадами всі дії оператора плавильного цеху від завантаження шихти до розливу готової сталі, упроваджену на одному з підприємств у Нідерландах. Утім описана система не охоплює попередні операції і орієнтована на хімічні й механічні властивості рідкої сталі, а не готової продукції. Її доповненням може служити запропонована в роботі (Stein, Pauster, & May, 2003) експертна система отримання готової продукції у виготовленні титану, якщо її адаптувати до умов виготовлення сталі. Багатоагентна експертна система, описана в (Zarandi et al., 2010), розв'язує одну з головних економічних задач технологічного процесу виплавлення сталі в конвертері – мінімізації собівартості використаних розкислювачів для виведення газових домішок після рафінації. Зазначена система, яка побудована на навчанні нечіткої нейронної мережі ANFIS, має характерний недолік – неможливість ідентифікації та інтерпретації випадків, які не зустрічалися в навчальній вибірці.

Автори (Laha, Ren, & Suganthan, 2015) пропонують застосування технологій машинного навчання у складі експертних систем для прогнозування якості готової сталі. Аналогічний підхід, але для прогнозування механічних властивостей готової продукції прокатного виробництва, запропоновано в (Xie et al., 2021). В обох випадках інформаційна технологія охоплює лише дві послідовні технологічні операції.

З огляду на викладене зазначимо, що основним недоліком підходу більшості виконавців є обмеження кількості розв'язуваних задач рівнем керування однією (іноді двома) технологічними операціями. Проблеми планування і керування виробництвом, а також автоматизація взаємодії різних рівнів системи (технологічного й економічного) з урахуванням впливу "людського фактора" практично не досліджені й не одержали відповідної промислової реалізації.

Постановка задачі. Для підвищення техніко-економічних параметрів у багатоетапному металургійному виробництві необхідне комплексне розв'язання проблеми керування організаційно-технологічними процесами плавлення, нагрівання, прокатування та контролю якості продукції.

ISSN 2788-6603

Підвищення ефективності виробництва можна досягти за рахунок контролю технологічних параметрів, залишків матеріалів на кожному переділі та стану обладнання, задіяного в усіх послідовних операціях однією інтегрованою системою підтримки прийняття рішень. Інтегрована система керування має працювати за узагальненим критерієм оптимальності, видаючи одночасно завдання на кожну виробничу ланку з урахуванням узгодження їхніх процесів.

Для оптимізації керування процесами плавлення, нагрівання, прокатування і термічного оброблення прокатної продукції з урахуванням глобального критерію потрібні сталі та надійні інформаційні зв'язки між окремими виробничими системами, що мають носити як горизонтальний характер (між підсистемами або модулями одного рівня), так і вертикальний (між модулями прийняття рішень і робочими місцями операторів окремих етапів технологічного процесу).

Методи

В роботі використано методи аналізу та синтезу складних систем і побудови комплексних систем керування. З огляду на викладене, пропонуємо методику взаємодії інтегрованої системи планування, контролю та керування (проєктованої СППР) із виробничими системами, основану на паралельній взаємодії цехових систем керування і прийняття рішень.

Саме паралельність роботи систем реалізована завдяки автоматизованим СППР, а не послідовне виконання кожного замовлення, що міститься на поточний момент у системі, на різних етапах багатоетапного виробництва, дозволить значно скоротити середній час виконання одного замовлення, узгодити окремі ділянки за пропускною здатністю, зменшити кількість переналаштувань, скоротити кількість незавершеного виробництва, а отже в підсумку – скоротити собівартість продукції.

З урахуванням переліку процесів, які охоплює проєктована СППР, та великої кількості різних джерел даних, необхідних для розв'язання задач відносно кожного з процесів, пропонується структура автоматизованої системи підтримки прийняття рішень для керування металургійним виробництвом з конвертерним способом виготовлення сталі, що зображена на рис. 1.

До системи включено шість різних баз даних, кожна з яких відповідає своєму підрозділу підприємства і містить дані, що генеруються чи використовуються цим підрозділом, а також сім модулів відповідно до зазначених вище технологічних процесів.

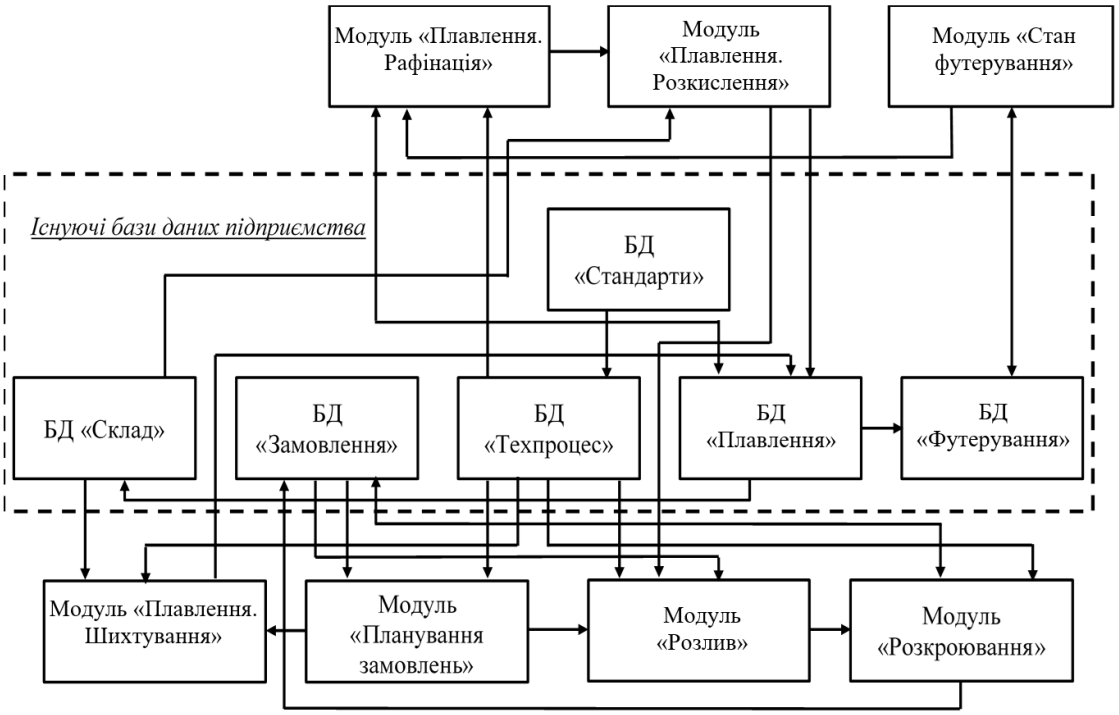

Рис. 1. Структура інтегрованої СППР прокатного виробництва

Зазвичай, бази даних, зображені на рис. 1, існують на підприємстві, адже необхідні для ведення діяльності незалежно від ступеня автоматизації потоків даних.

База даних "Склад" містить відомості про перелік витратних матеріалів, які використовують у виробничому процесі, а також технічних характеристик цих матеріалів та економічних показників (насамперед собівартість). Ця БД є спільною для виробничого відділу (на деяких підприємствах – відділ головного інженера) та відділу матеріального забезпечення.

База даних "Стандарти" містить усі стандарти на марки сталі й види готової продукції, які виготовляють на підприємстві, а також стандарти на певні технологічні операції. Цю БД веде відділ контролю якості та використовує виробничий відділ. Вона забезпечує дані для БД "Техпроцес".

База даних "Техпроцес" використовує стандарти на виготовлення готової продукції та маркувальник сталі й містить технологічні інструкції на кожну з операцій, включно з видом обладнання, яке застосовується, його налаштуваннями залежно від виду продукції, а також діями операторів ділянок технологічних процесів. Це основна база даних відділу головного інженера разом із БД "Плавлення".

База даних "Плавлення" містить відомості про весь хід виготовлення сталі в конвертерному цеху і відомості про таке:

- складові шихтування;
- перебіг процесу з основними та додатковими операціями (азотування та торкретування тощо);
- хід продувки та розкислення (використані матеріали, час, параметри дуття);
- масові, хімічні та фізичні показники готової продукції;
- відповідність замовленню.

База даних "Замовлення" формується відділом маркетингу (відділ продажів на інших підприємствах) і містить деталі замовлень, що надходять на підприємство і виконуються. Включає терміни виконання, ціну, розрахункову собівартість, вид продукції та її стандарт, умови пакування та транспортування. Використовується одразу декількома модулями системи – спочатку під час планування виконання замовлень, а потім у процесі планування контролю операцій розливу та розкроювання заготовок і готової продукції.

Таблиця 1

Взаємодія модулів СППР керування металургійним виробництвом

№ з/п	Модуль системи	Вхідні канали		Вихідні канали	
		Джерело	**Інформація**	**Адресат**	**Інформація**
1	Планування замовлень	БД "Замовлення"	Обсяг замовлення, марка сталі, вид продукції, стандарт	Модуль "Плавлення. Шихтування"	План виробництва
		БД "Техпроцес"	Перелік налаштувань обладнання для випуску певної продукції, час і собівартість робіт	Модуль "Розлив"	План виробництва
2	Плавлення. Шихтування	БД "Склад"	Наявність і собівартість складових шихти	БД "Плавлення"	Шихтування плавлення
		БД "Техпроцес"	Вимоги до готової продукції + стандарти		
		Модуль "Планування замовлень"	План виробництва		
3	Плавлення. Рафінація	Модуль "Стан футерування"	Рекомендації щодо ведення плавлення	БД "Плавлення"	Параметри ведення плавлення
		БД "Техпроцес"	Вимоги до готової продукції + стандарти	Модуль "Плавлення. Розкислення"	Хімічний склад і температура сталі
		БД "Плавлення"	Початковий стан шихти		
4	Плавлення. Розкислення	Модуль "Плавлення. Рафінація"	Хімічний склад і температура сталі	Модуль "Розлив"	Маса сталі і шлаку
		БД "Склад"	Наявність і собівартість розкислювачів	БД "Плавлення"	Характеристики готової продукції, хід плавлення
		БД "Техпроцес"	Вимоги до готової продукції + стандарти		
5	Розлив	БД "Техпроцес"	Параметри зливків та передільних заготовок	Модуль "Розкроювання"	Карти розкроювання
		Модуль "Планування замовлень"	План виробництва		
		Модуль "Плавлення. Розкислення"	Маса сталі і шлаку		
		БД "Замовлення"	Перелік замовлень		
6	Розкроювання	Модуль "Розлив"	Карти розкроювання	БД "Замовлення"	Результати розкроювання
		БД "Замовлення"	Перелік замовлень		
		БД "Техпроцес"	Параметри зливків та передільних заготовок		
7	Стан футерування	БД "Футерування"	Історія експлуатації поточного та попередніх футерувань	БД "Футерування"	Рекомендації щодо ведення плавлення
				Модуль "Плавлення. Рафінація"	Рекомендації щодо ведення плавлення

Нарешті база даних "Футерування" містить історичну агрегацію умов роботи та тривалості роботи попередніх і поточного футерувань. Цю інформацію використовують для формування рекомендації щодо ведення плавлення у відповідному модулі.

За відсутності на підприємстві тієї чи іншої БД як виокремленої інформаційної одиниці, запропонований підхід передбачає створення відповідних баз даних із масиву інформації, використовуваного на виробництві.

Усі обчислювальні, оптимізаційні та рекомендаційні процеси відбуваються в окремих модулях СППР. Для кращого розуміння зв'язків між базами даних і модулями СППР керування металургійним виробництвом, вхідну та вихідну інформацію для кожного з модулів, зображених на рис. 1, зведено в табл. 1.

Кожен із виділених на рис. 1 модулів системи передбачає, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язання певних оптимізаційних задач, математичні постановки яких і підходи до розв'язання описано в роботах (Hnatushenko, Zheldak, & Koriashkina, 2021; Слєсарєв, & Желдак, 2013; Zheldak et al., 2021). Докладно тип цих задач зведено у табл. 2.

Як видно з табл. 2, у більшості модулів розв'язуються складні прикладні задачі умовної оптимізації. Для розв'язання цих задач використовують інформаційну технологію на основі алгоритму моделювання штучної імунної

ISSN 2788-6603

системи людини, описану в (Zheldak et al., 2021). З огляду на структуру СППР на рис. 1 і табл. 2, інтегрована система підтримки прийняття рішень металургійного виробництва має виконувати такі функції:

1. Введення, редагування, перетворення, використання, оновлення та зберігання інформації щодо технологічних процесів на виробництві, стандартів, якими визначаються ці процеси, матеріали та готова продукція, щодо стану обладнання та перебігу технологічного процесу.

2. Розв'язання математичних задач оптимізації, прогнозування, самонавчання та прийняття рішень на окремих етапах технологічного процесу виготовлення металургійної продукції на основі апріорної накопиченої інформації та поточної інформації про вхідні замовлення та перебіг технологічних процесів.

3. Організація паралельної взаємодії у реальному масштабі часу між окремими модулями та базами даних, що відповідають різним етапам технологічного процесу з урахуванням глобальних економних критеріїв та їхнього інформаційного узгодження.

4. Всебічний контроль перебігу технологічного процесу, зокрема, наявність і якість матеріалів, стан обладнання, характеристики сталі, заготовки та готової продукції, її кількість на кожному виробничому відрізку для забезпечення.

5. Ведення динамічної бази даних у складі інтегрованої системи, що дозволяє без витрати часу включати до плану діяльності нові замовлення, що надходять, починаючи вже з наступного етапу планування (зміна чи доба).

6. Формування у зручній для користувача і зрозумілій формі рекомендацій, які дозволять виконувати весь комплекс робіт від отримання замовлення до видачі готової продукції.

Таблиця 2

Модулі СППР керування металургійним виробництвом і задачі, що у них розв'язуються

№ з/п	Модуль системи	Задача, що розв'язується
1	Планування замовлень	Багатокритеріальна комбінаторна задача оптимізації на перестановках
2	Плавлення. Шихтування	Багатокритеріальна дійсночислова задача умовної оптимізації
3	Плавлення. Рафінація	Прийняття рішень на основі самонавчання на прикладах із формуванням сценаріїв-зразків
4	Плавлення. Розкислення	Прийняття рішень на основі самонавчання на основі баєсовської мережі з наступною однокритеріальною оптимізацією
5	Розлив	Однокритеріальна комбінаторна задача оптимізації на двійкових матрицях
6	Розкроювання	Багатокритеріальна цілочислова комбінаторна задача умовної оптимізації
7	Стан футерівки	Формування рекомендацій на основі зворотного висновку по регресійній моделі, побудованій із застосуванням МГВА

Результати

Викладені підходи лягли в основу комплексного програмного забезпечення, що впроваджено на базових підприємствах галузі з Дніпровського регіону. Загальний підхід до інформаційної технології супроводу підтримки прийняття рішень у прокатному виробництві й окремі модулі тестували на виконанні реальних завдань виробництва. Наведемо короткий аналіз результатів такого застосування.

Застосування описаної інтегрованої СППР до оброблення потоку замовлень металургійного підприємства ПАТ "ДМЗ" (м. Дніпро) дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, що за часом виконання фіксованого набору завдань на 10–14 % кращі, ніж отримані за традиційною методикою. Відносний економічний ефект від застосування модуля планування замовлень становить 4,5–9,5 % для різних вхідних даних. Економічного ефекту досягають за рахунок зменшення витрат від переналаштування обладнання та розривів часу між виготовленням і відвантаженням замовлень.

Запропонована інформаційна технологія дозволяє мінімізувати сукупні витрати на виготовлення продукції за обмеженого робочого часу, використовуючи ресурс технологічного процесу на переналаштування обладнання, зменшення розривів часу між виготовленням і відвантаженням замовлень.

Водночас модуль "Розлив", що використовує математичну модель, яка передбачає пошук такої маси металу у ковші і такого її розподілу на зливки, які дозволяли б на наступних операціях розкроювати передільні заготівки і готову продукцію з останніх, мінімізуючи можливі обрізки і враховуючи поточний розмір замовлення на сортовий прокат, дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу за рахунок мінімізації немірної продукції та кількості обрізків на 2,4–2,5 % під час оброблення великих замовлень і на 3–4 % за виконання малих замовлень. Економічний ефект від упровадження лише цього модуля системи може становити 904–1413 тис. грн за добу у разі двозмінної роботи ливарного та прокатного цехів.

Інтелектуальну систему із самонавчанням, що лежить в основі модуля "Плавлення. Рафінація" випробувано на практиці й порівняно з плавками, що виконувались для таких самих марок сталі й типу готової продукції без використання СППР. Застосування запропонованої інформаційної технології, що використовує не всю сукупність навчальних прикладів із бази даних попередніх плавок, а лише кращі за зведеним зовнішнім критерієм з обмеженої підмножини найближчих до поточної плавки за нормалізованою метрикою умов ведення плавлення, дозволяє значно покращити техніко-економічні показники технологічного процесу. Зокрема, застосування запропонованого алгоритму самонавчання підсистеми оператора конвертера інтегрованої СППР металургійного виробництва дозволяє за наявності достатньої кількості попередніх плавок, що є аналогами поточного замовлення, зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %.

Проведено також експериментальну перевірку якості навчання підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі, що включена у запропоновану комплексну СППР як модуль "Плавлення. Розкислення". Перевірено якість добування знань, які використовує підсистема в роботі. Перевірку якості й ефективності прийнятих рішень у складі СППР виконано з використанням даних плавок одного з базових підприємств (загалом 12 039 плавок). Отримана в ході самонавчання база знань на основі мережі Баєса містить 1589 імовірнісних правил з узагальнювальним дефазифікатором на основі чотирьох нечітких вхідних змінних і трьох вихідних. Розроблену систему порівнювали з традиційною для подібних СППР системою правил на основі дерева рішень, яка складалася з 422 чітких правил висновку.

Запропонована підсистема СППР на основі мережі Баєса показала вищу точність апроксимації як на навчальній, так і на тестовій виборці. Помилка прогнозування не перевищує 10 %, що є прийнятним для цього технологічного процесу. У разі зміщення центрів нечітких термів вихідних змінних запропонованої мережі Баєса на 10 % досягається компроміс: за загальної економії феросплавів 0,398 кг/т похибка апроксимації СППР збільшується не більше ніж на 1 %. У грошовому еквіваленті це відповідає економії близько 6,938 млн грн на рік.

У ході експериментальної перевірки впровадження інформаційної технології прогнозування стійкості футерування та підсистеми рекомендацій щодо ведення плавлення з метою збільшення терміну експлуатації футерівки отримано такі результати:

- фактичне значення стійкості футерівки за умови використання рекомендаційної підсистеми у складі СППР керування прокатним виробництвом перевищує апріорний проноз, отриманий за статистичними даними для даної марки вогнетривів, пори року та прогнозованої інтенсивності експлуатації в середньому на 4,25 %;
- наявність системи рекомендацій і відповідного розриву між "реалістичним" прогнозним значенням стійкості та "оптимістичним" за умови оптимальних умов ведення плавлення змушує оператора конвертера проводити плавлення і обслуговування футерівки акуратніше, тим самим збільшуючи термін її експлуатації;
- якщо футерівка вже відпрацювала половину свого терміну експлуатації, прогнозне значення її стійкості з урахуванням порад, не відрізняється більше ніж на 5 % від фактичного.

Останнє дозволяє з точністю 3–5 % запланувати час зупинки конвертера на заміну футерівки ще на половині прогнозованого часу її експлуатації.

Висновки

У роботі досліджено проблему розроблення дворівневої інформаційної технології підтримки прийняття рішень у прокатному металургійному виробництві, яка охоплює як рівень окремих технологічних операцій, так і рівень усього виробничого процесу, спираючись на його економічні показники. Основну увагу приділено обґрунтуванню структури системи підтримки прийняття рішень та її функціям.

Запропоновано модульну структуру автоматизованої СППР для керування металургійним виробництвом з конвертерним способом виготовлення сталі, яка містить сім окремих програмних модулів та шість баз даних. Усі обчислювальні, оптимізаційні та рекомендаційні процеси відбуваються в окремих модулях СППР.

Розроблено алгоритм і схему взаємодії модулів і баз даних підприємства, сформульовано вхідну та вихідну інформацію для кожного з модулів. Передбачено, що кожен із виділених модулів, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язує певну оптимізаційну задачу, спрямовану на покращення глобального економічного критерію ефективності виробництва. Усі результати роботи окремих модулів розробленої системи виводяться через відповідні інтерфейси і носять рекомендаційний характер. Оператор може прийняти їх до виконання або ж виконати дії на власний розсуд. Обидва рішення – пропоноване і прийняте – зберігаються у відповідних базах даних.

Експериментальна перевірка застосування запропонованої інтегрованої СППР до оброблення реальних замовлень показала високу ефективність. Зокрема, відносний економічний ефект від застосування модуля планування замовлень становить 4,5–9,5 % для різних вхідних даних, водночас кількість немірної продукції та кількість обрізків зменшуються на 2,4–2,5 % за обробки великих замовлень і на 3–4 % за виконання малих.

Загалом застосування запропонованої СППР до умов прокатного виробництва у разі широкого сортаменту продукції дозволяє зменшити собівартість виплавленої сталі на 2,5–3,8 %, а готової продукції – на 4,25–4,8 % за рахунок додаткового зменшення немірної продукції та кількості обрізків.

Внесок авторів: Тімур Желдак – розроблення методів і методології дослідження, синтез системи прийняття рішень, опис результатів; Ілля Зіборов – огляд літературних джерел, збір емпіричних даних, проведення емпіричних досліджень і написання висновків.

Список використаних джерел

Гейзер, Г. К. (2009). Проблеми підвищення ефективності внутрішньозаводського планування. *Проблеми економіки та управління у промислових регіонах: Мат. Всеукр. наук.-практ. конф.* (с. 111–112). Маріуполь, Маріупольський державний університет.

Грабовський, Г. Г. (2003). Інтегровані автоматизовані системи керування товстолистовими прокатними станами (розвиток теорії, моделі, алгоритми): [Автореф. дис. д-р техн. наук: спец. 05.13.07 “Автоматизація процесів керування”]. Дніпро, Національний гірничий університет.

Рибалко, Л. П. (2015). Застосування сучасних корпоративних інформаційних систем в управлінні підприємствами. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Економічні науки*, 15 (3), 82–85.

Різніченко, Л. В. (2009). Досвід впровадження корпоративних інформаційних систем управління на вітчизняних підприємствах. *Вісник КДПУ ім. М. Остроградського*, 4(57), Ч. 2, 184–189.

Руденська, В. В., Левицький, С. І., & Михайлик, Д. П. (2016). Моделі інформаційної підтримки процесів інтеграції у металургійній галузі. *Часопис економічних реформ*, (4), 34–40.

Самофалов, В. В., & Ходикін, В. Ф. (2011). Інформаційні технології як основа побудови системи управління металургійного підприємства. *Моделювання регіональної економіки*, (2), 77–85.

Слєсарєв В. В., & Желдак, Т. А. (2013). Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації. *Науковий вісник Національного гірничого університету*, (1), 97–102.

Технологічна інструкція ТІ 243-ТРЗ-01-2002. (2012). *Виробництво сталевих безшовних труб на трубопрокатній установці "ТПА-200" у трубному цеху № 4*. Дніпро: ВАТ "Інтерпайп-НТЗ".

Технологічна інструкція. (2014). *Технологічна інструкція по виробництву блюмів, заготівок і фасонних профілів в прокатному цеху № 1*. Дніпро: ДМЗ ім. Петровського.

Чертов, А. Д. (2003). Паралельний інжиніринг при безперервному вдосконаленні бізнес-процесів і базових систем управління в металургії. *Металург,* (7), 47–61.

Dering, D., Swartz, C., & Dogan, N. (2020). Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*, 8 (4), 483. https://doi.org/10.3390/pr8040483

Fei, H., Xianyi, C., & Zhenghai, Z. (2022). Prediction of oxygen-blowing volume in BOF steelmaking process based on BP neural network and incremental learning. *High Temp. Mater. Process*, (41), 403–416. https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0035

Feng, K., Yang, L., Su, B., Feng, W., & Wang, L. (2022). An integration model for converter molten steel end temperature prediction based on Bayesian formula. *Steel Res. Int*, 93 (2). https://doi.org/10.1002/srin.202100433

Ganesh, R. (2010). *Expert System Applications in Sheet Metal Forming*. InTech. http://doi.org/10.5772/7074.

Gefrerer, R., Kraft, G., Busch, S., Winterhalder, L., Garbracht, K., & Wiese, T. (2000). Supply Chain Management in the steel industry. *Stahl-und-eisen*, (120), 31–36.

ISSN 2788-6603

Hnatushenko V. V., Zheldak, T. A., & Koriashkina, L. S. (2021). Mathematical Model of Steel Consumption Minimization Considering the Two-Stage Billets Cutting. *Naukovyi Visnyk Natsional'noho Hirnychoho Universytety*, (2), 118–124. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/118

Hongwei, G., Jianliang, Z., Haibin, Z. & Xu, Z. (2009). Application of Clustering Algorithm to Blast Furnace Expert System. *Int. Conf. on Advanced Computer Control, Singapore*, (p. 171–175). https://doi.org/10.1109/ICACC.2009.80

Laha, D., Ren, Y., & Suganthan, P. N. (2015). Modeling of steelmaking process with effective machine learning techniques. *Expert Systems with Applications*, 42(10), 4687–4696. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.030

Iancu, E., & Cibotariu, I. (2013). Theoretical and experimental research on the use of expert systems (ES) in assessing risks of failure in metallurgical companies. *Metalurgija*, 52(2), 279–281.

Shanmugam, S. P., Nurni, V. N., Manjini, S., Chandra, S., & Holappa, L. E. K. (2021). Challenges and Outlines of Steelmaking toward the Year 2030 and Beyond–Indian Perspective. *Metals*, (11), 1654. https://doi.org/10.3390/met11101654

Stein, E. W., Pauster, M. C. & May, D. (2003). A knowledge-based system to improve the quality and efficiency of titanium melting. *Expert Systems with Applications,* 24(2), 239. https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00152-5

Van De Putte, L., Haers, F., Haers, L., & Vansteenkiste H. (1999). Expert system for the control of liquid steel production at Sidmar. *Rev. Met. Paris,* 96 (6), 721–728. https://doi.org/10.1051/metal/199996060721

Xie, Q., Suvarna, M., Li, J., Zhu, X., Cai, J., & Wang, X. (2021). Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning. *Materials & Design*, (197), 109201. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109201

Zagoskina, E. V., Barbasova, T. A. & Shnaider, D. A. (2019). Intelligent Control System of Blast-furnace Melting Efficiency. *Int. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk*, 0710-0713. http://10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958221

Zarandi, M. H. F.; Avazbeigi, M.; Anssari M. H. & Ganji B. *A Multi-Agent Expert System for Steel Grade Classification Using Adaptive Neuro-fuzzy Systems*, 2010.

Zheldak, T., Ziborov, I., Lyman, V., & Zhuk, A. (2021). Efficiency Improvement of the Algorithm Based on an Artificial Immune System Modeling Applied to Continuous and Combinatorial Problems. *CEUR Workshop Proceedings,* (3106), 82–95.

Zhou, D., Xu, K., Lv, Z., Yang, J., Li, M., He, F., & Xu, G. (2022). Intelligent Manufacturing Technology in the Steel Industry of China: A Review. *Sensors,* (22), 8194. https://doi.org/10.3390/s22218194

References

Chertov, A. Д. (2003). Parallel Engineering under Continuous Improvement of Business-processes and Base Control Systems in Metallurgy. *Metalworker,* (7), 47–61 [in Ukrainian].

Dering, D., Swartz, C., & Dogan, N. (2020). Dynamic modeling and simulation of basic oxygen furnace (BOF) operation. *Processes*, 8 (4), 483. https://doi.org/10.3390/pr8040483

Fei, H., Xianyi, C., & Zhenghai, Z. (2022). Prediction of oxygen-blowing volume in BOF steelmaking process based on BP neural network and incremental learning. *High Temp. Mater. Process*, (41), 403–416. https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0035

Feng, K., Yang, L., Su, B., Feng, W., & Wang, L. (2022). An integration model for converter molten steel end temperature prediction based on Bayesian formula. *Steel Res. Int*, 93 (2). https://doi.org/10.1002/srin.202100433

Ganesh, R. (2010). *Expert System Applications in Sheet Metal Forming*. InTech. http://doi.org/10.5772/7074

Gefrerer, R., Kraft, G., Busch, S., Winterhalder, L., Garbracht, K., & Wiese, T. (2000). Supply Chain Management in the steel industry. *Stahl-und-eisen*, (120), 31–36.

Geyzer, G. K. (2009). Problems of the Intra-Plant Planning Efficiency Increase. *Problems of Economics and Control in Industrial Regions: Proceeding of All-Ukrainian Scientific-Practical Conference in Mariupol*, (p. 111–112). Mariupol State University [in Ukrainian].

Grabovsky, G. G. (2003). Integrated Automated Systems of the Thick Plates Rolling Mills Control (Theory, Development, Models, Algorithms): [Abstract of the DSc (Engin.) Thesis: Specialty. 05.13.07 “Control Processes Automation”]. Dnipro, National Mountain University [in Ukrainian].

Hnatushenko V. V., Zheldak T. A., & Koriashkina, L. S. (2021). Mathematical Model of Steel Consumption Minimization Considering the Two-Stage Billets Cutting. *Naukovyi Visnyk Natsional'noho Hirnychoho Universytety*, (2), 118–124. https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/118

Hongwei, G., Jianliang, Z., Haibin, Z. & Xu, Z. (2009). Application of Clustering Algorithm to Blast Furnace Expert System. *Int. Conf. on Advanced Computer Control, Singapore* (p. 171–175). https://doi.org/10.1109/ICACC.2009.80

Iancu, E., & Cibotariu, I. (2013). Theoretical and experimental research on the use of expert systems (ES) in assessing risks of failure in metallurgical companies. *Metalurgija*, 52(2), 279–281.

Laha, D., Ren, Y., & Suganthan, P. N. (2015). Modeling of steelmaking process with effective machine learning techniques. *Expert Systems with Applications*, 42(10), 4687–4696. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.01.030

Riznichenko, L.V. (2009). Experience of Corporative Informational Systems Implementation at Domestic Enterprises. *Herald of KDPU after Ostrogradskiy,* 4(57), P. 2, 184–189 [in Ukrainian].

Rudenska, V. V., Levitskiy, S. I., & Mikhaylik, D. P. (2016). Information Support Models of the Integration Processes in Metallurgy Industry. *Chronicles of Economic Reforms*, (4), 34–40 [in Ukrainian].

Rybalko, L. P. (2015). Use of Modern Corporative Information Systems in Enterprise Management. *Scientific Herald of the Kherson State University: Economic Sciences*, 15 (3), 82–85 [in Ukrainian].

Samofalov, V. V., & Hodikin, V. F. (2011). Informational Technologies as a bases for creation of Metal Plant Control System. *Regional Economics Simulation,* (2), 77–85. [in Ukrainian].

Shanmugam, S. P., Nurni, V. N., Manjini, S., Chandra, S., & Holappa, L. E. K. (2021). Challenges and Outlines of Steelmaking toward the Year 2030 and Beyond–Indian Perspective. *Metals*, (11), 1654. https://doi.org/10.3390/met11101654

Slesarev, V. V., & Zheldak, T. A. (2013). Mathematical Model of the Material-Heat Balance of Melting in Oxygen Converter and its Optimization Criteria. *Scientific Herald of the National Mining University*, (1), 97–102 [in Ukrainian].

Stein, E. W., Pauster, M. C. & May, D. (2003). A knowledge-based system to improve the quality and efficiency of titanium melting. *Expert Systems with Application,* 24(2), 239. https://doi.org/10.1016/S0957-4174(02)00152-5

Technological Instruction TI 243-TP3-01-2002. (2012). *Manufacturing of the Steel Seamless Pipes on the pipe rolling mill "TPA-200"in the pipe Workshop № 4*. Dnipro: OSC "Interpipe-NTZ" [in Ukrainian].

Technological Instruction. (2014). *Technological instruction on manufacturing of the blooms, metal workpieces and shaped profiles in rolling workshop № 1.* Dnipro: DMZ after Petrovskiy [in Ukrainian].

Van De Putte, L., Haers, F., Haers, L., & Vansteenkiste, H. (1999). Expert system for the control of liquid steel production at Sidmar. *Rev. Met. Paris,* 96 (6), 721–728. https://doi.org/10.1051/metal/199996060721

Xie, Q., Suvarna, M., Li, J., Zhu, X., Cai, J., & Wang, X. (2021). Online prediction of mechanical properties of hot rolled steel plate using machine learning. *Materials & Design*, (197), 109201. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109201

Zagoskina, E. V., Barbasova, T. A. & Shnaider, D. A. (2019). Intelligent Control System of Blast-furnace Melting Efficiency," *Int. Multi-Conf. on Engineering. Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk*, 0710-0713. http://10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958221.

Zarandi, M. H. F., Avazbeigi, M., Anssari M. H. & Ganji B. (2010). *A Multi-Agent Expert System for Steel Grade Classification Using Adaptive Neuro-fuzzy Systems*.

Zheldak, T., Ziborov, I., Lyman, V., & Zhuk, A. (2021). Efficiency Improvement of the Algorithm Based on an Artificial Immune System Modeling Applied to Continuous and Combinatorial Problems. *CEUR Workshop Proceedings,* (3106), 82–95.

Zhou, D., Xu, K., Lv, Z., Yang, J., Li, M., He, F., & Xu, G. (2022). Intelligent Manufacturing Technology in the Steel Industry of China: A Review. *Sensors,* (22), 8194. https://doi.org/10.3390/s22218194

Отримано редакцією журналу / Received: 10.09.23
Прорецензовано / Revised: 11.09.23
Схвалено до друку / Accepted: 11.09.23

Timur ZHELDAK, PhD (Engin.), Assoc. Prof.
ORCID ID: 0000-0002-4728-5889
e-mail: zheldak.t.a@nmu.one
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

Ilya ZIBOROV, PhD Student
ORCID ID: 0000-0002-3118-387X
e-mail: ziborov.i.k@nmu.one
Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

THE STRUCTURE AND FUNCTIONS OF THE INTEGRATED DSS IN THE MULTI-STAGE ROLLING PRODUCTION MANAGEMENT PROCESSES

Background. ***The problem of a two-level information technology development of decision-making support in terms of metallurgical rolling production was considered. Both levels of individual technological operations and the entire production process are included, basing on economic indicators of the last one. Justification of the decision-making support system (DSS) structure and its functions is mainly focused on.***

Methods. ***Methods of complex systems analysis and synthesis as well as complex control systems design are used.***

Results. ***A modular structure of an automated DSS for managing metallurgical production, based on BOF steelmaking, is proposed, which contains seven separate software modules and six databases. All calculation, optimization and recommendation processes are implemented in separate modules of the DSS. An algorithm and scheme of interaction between modules and enterprise databases are developed. Input and output information for each of the modules is formulated. It is assumed that each of the selected modules, in addition to the organization of the input-output interface, performs the solution of a certain optimization problem aimed at improving the global economic criterion of production efficiency. All the results of the individual modules performance of the developed system are displayed through the appropriate interfaces and are of a recommendatory nature. The operator might accept them for implementation or perform actions at his own discretion. Both decisions, proposed and adopted, are stored in the respective databases.***

Conclusions. ***In general, use of the proposed DSS in rolling production with the wide assortment of the products allows one to decrease cost of manufacturing of the molten steel by 2,5–3,8%, as well as that of the final products – by 4,25–4,8% due to the additional decrease in unmeasured byproducts and the number of the cut-off parts.***

Keywords: ***information technology, DSS, rolling production, decision-making, integration, databases, information interaction, system structure.***

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів.

The authors declare no conflicts of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses or interpretation of data; in the writing of the manuscript; in the decision to publish the results.

ISSN 2788-6603