

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**ЖЕЛДАК ТІМУР АНАТОЛІЙОВИЧ**



УДК 681.512: 004.942

**ІНТЕГРОВАНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ  
КЕРУВАННІ ВИРОБНИЦТВОМ ПРОКАТУ НА ОСНОВІ ДВОРІВНЕВИХ  
ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

**Реферат**  
**дисертації на здобуття наукового ступеня**  
**доктора технічних наук**

**Дніпро – 2026**

**Дисертацією є рукопис.**

Робота виконана в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро)

**Науковий консультант:** доктор технічних наук, професор

**Слесарєв Володимир Вікторович,**  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», професор кафедри системного аналізу та управління

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор

**Купін Андрій Іванович,**  
Криворізький національний університет, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж

доктор технічних наук, професор

**Шекета Василь Іванович,**  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри інженерії програмного забезпечення

доктор технічних наук, професор

**Собчук Валентин Володимирович,**  
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, професор кафедри інтегральних та диференціальних рівнянь

Захист відбудеться « 16 » квітня 2026 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, проспект Дмитра Яворницького, 19.

З дисертацією можна ознайомитись на сайті <https://ir.nmu.org.ua/> та у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, проспект Дмитра Яворницького, 19.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07

доктор технічних наук, професор



Андрій БУБЛІКОВ

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Більшість металургійних виробництв функціонують на основі технологічного циклу, що складається з кількох операцій, розділених у часі, територіально, а також за виконавцями. Виробництво прокату передбачає велику кількість послідовних операцій, оптимальні рішення, прийняті на рівні окремої операції технологічного процесу не забезпечують досягнення максимальної ефективності виробництва в цілому. Як наслідок, основні фактори, які потребують покращення: показники використання робочого часу, завантаження обладнання та швидкості обігу коштів, вкладених у виробництво. Всі перелічені фактори є економічними, у той час як при оптимізації роботи виробничих систем орієнтуються, зазвичай, на такі показники роботи як час виконання операцій, витрати матеріалів та енергії, кількість виконаних операцій, тощо. На практиці економічні та технологічні критерії не лише пов'язані один з одним, а часто суперечать один одному.

Більшість досліджень, що стосуються автоматизації та моделювання виробничих процесів у виробництві прокату, розглядають у якості об'єкту моделювання окрему операцію, що є частиною загального виробничого процесу. Актуальним бачиться перехід на вищий рівень абстракції для побудови ряду моделей оптимізації виробництва прокату на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв. Необхідно також синтезувати критерії та обмеження при моделюванні як всього процесу, так і його частин для вирішення оптимізаційних задач.

Вивченню задач автоматизації та моделювання процесів виробництва прокату та прийняття рішень при керуванні ними присвячені роботи В.М. Куваєва, О.П. Єгорова, D. Dering, D.A. Sala, В.А. Бігеева, В.С. Богушевського, Я.Л. Альперовича, С.П. Пантейкова та ін.. Різні види експертних і рекомендаційних систем у металургійному виробництві досліджувалися в роботах Y. Zhao, Г.Г. Грабовського, Д.Н. Тогобицької, А.В. Шибка та ін. Розвитку еволюційних методів оптимізації для двійкових та безперервних задач присвячені праці М. Dorigo, L.N., DeCastro, В.Є Снитюка, Л.Ф. Гуляницького, С.О. Субботіна, А.П. Карпенка, В.С. Степашка, Ю.П. Зайченка, В.І. Литвиненка та ін. Водночас питання побудови моделей оптимізації виробництва на рівні всього підприємства з використанням узагальнених економічних критеріїв в науковій літературі майже не представлені.

Таким чином, в даній роботі розв'язується актуальна **науково-прикладна проблема** обґрунтування принципів та розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень, проведених в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» за

держбюджетними науково-дослідними роботами: «Задачі моделювання, оптимізації та прийняття рішень в складних системах різної природи» (№0121U109788) та «Задачі аналізу, моделювання та оптимізації технологічних процесів у складних системах різної природи» (№0123U100011), у яких автор був керівником, а також «Інтелектуальні комп'ютерні технології обробки даних, прогнозування та управління» (№ 0108U000538), «Розробка методів синтезу моделей корисних енергетичних, акустичних та вібраційних сигналів для ідентифікації процесів гірничого виробництва» (№ 0113U000402), «Рішення задачі генерації проєктів оперативних планів бойових дій при ліквідації пожеж на шахтах на основі онтологічних баз знань» (№ 0113U003913), «Розробка автоматизованої розпушувальної установки для розвантаження зсипних змерзлих вантажів» (№ 0116U006739), у яких автор був співвиконавцем.

Ідея роботи полягає у створенні методології побудови інтегрованих багаторівневих систем підтримки прийняття рішень у багатоетапному виробництві сортового прокату із застосуванням комплексу математичних моделей і методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень за зведеними економічними критеріями ефективності.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності багатоетапного виробництва прокату шляхом розробки та удосконалення математичних моделей процесів планування та керування, а також розробки обчислювального методу для розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації при плануванні й керуванні цими процесами в складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі основні задачі:

1. Провести огляд та аналіз стану досліджень з проблеми моделювання технологічних процесів багатоетапного металургійного виробництва, методів оптимізації та самонавчання, що застосовуються в системах прийняття рішень в металургії.

2. Розробити математичні моделі

- задачі побудови оптимального розкладу виконання замовлень на продукцію металургійним підприємством повного циклу при широкому сортаменті, яка б враховувала як технологічні, так і економічні критерії у вигляді багатокритеріальної задачі умовної оптимізації;

- задачі оптимізації шихти при конвертерному виробництві з обґрунтуванням вигляду критерію оптимізації собівартості сталі на етапі її виплавки, враховуючи додаткові витрати на встановлення теплового та матеріального балансу;

- задачі прогнозування механічних властивостей майбутньої готової продукції на ранніх етапах виготовлення вуглецевої сталі з метою формування таких керуючих впливів, які б могли скоригувати процес, що вже відбувається;

- задачі оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу в майбутніх переділах;

- задачі оптимізації розкroювання заготовок у багатоетапному прокатному виробництві з використанням критерію мінімуму залишків для заздалегідь невідомої довжини заготовки.

3. Запропонувати методи навчання та побудови інтелектуальних підсистем для підтримки прийняття рішень оператором конвертерного виробництва в процесах рафінації, розкислення та розливки сталі, на основі вибору і усереднення кращих прецедентів з історії виконання попередніх замовлень, найближчих за нормалізованою метрикою.

4. Розробити ефективний метод ідентифікації закономірностей процесу вигоряння футеровки від технічних та технологічних факторів та синтезувати систему математичних й логічних залежностей, що їх описують.

5. Розробити адаптивний еволюційний метод оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи, що уникає недоліків існуючих реалізацій та використовує адаптивні до задачі оператори мутації, схрещування та стиснення популяції. Застосувати розроблений метод як складову інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування металургійним виробництвом для розв'язання задач умовної оптимізації у різних просторах.

6. Обґрунтувати структуру та загальні принципи роботи і навчання інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування багатоетапним металургійним виробництвом. Визначити структуру вхідної та вихідної інформації, перелік задач, що виконуються інтегрованою системою. Розробити спосіб взаємодії системи підтримки прийняття рішень та операторів виплавки та розливки сталі, а також розкроювання заготовок на різних переділах з механізмом навчання для формування керуючих рекомендацій.

7. Реалізувати прототип інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для планування та керування виробництвом прокату та виконати її апробацію на реальних даних, що описують виробничі процеси на металургійних підприємствах. Проаналізувати результати чисельних експериментів, визначити адекватність запропонованих моделей та алгоритмів, обмеження на їх використання та можливі шляхи вдосконалення.

**Об'єкт дослідження** – процеси прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату.

**Предмет дослідження** – математичні моделі процесів прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату, а також обчислювальний метод оптимізації цих процесів у складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач були використані методи математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування складних багаторівневих систем, а також: методи скінченновимірної оптимізації та функціонального аналізу – для побудови та обґрунтування математичних моделей технологічних процесів та формування оптимальних рішень, врахування обмежень і аналізу моделей; методи регресійного, кореляційного аналізу та метод групового врахування аргументів – для побудови багатфакторних прогнозуючих моделей та формування оптимальних керуючих впливів; методи моделювання мурашиної колонії, штучних імунних систем, генетичних алгоритмів та обмеженого локального пошуку – для розв'язання оптимізаційних задач в просторі перестановок, безперервному та двійковому просторах.

**Основні наукові положення, що виносяться на захист:**

1. План виконання замовлень на виготовлення сортового прокату широкого сортаменту синтезується (в рамках вирішення незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці) на основі згортки критеріїв максимізації частки вчасно виконаних замовлень та мінімізації обсягів незавершеного виробництва, часу неробочого стану обладнання та кількості відхилених замовлень, що дозволяє виконувати тижневі та місячні замовлення за мінімальний час.

2. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

3. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Наукові результати, які визначають новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв, як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші, ніж отримані за традиційною методикою.

2. Розроблено математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки та вимоги до розкроювання готової продукції. Застосування розробленої моделі в багатоетапному металургійному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу та загальний обсяг обрізків.

3. Розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції та обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів. Його застосування для задач планування та керування в багатоетапних металургійних виробництвах дозволяє підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

4. Розроблено метод визначення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного поліному. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом

самоорганізації.

5. Набув подальшого розвитку метод прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на основі навчання. Його застосування дозволило будувати прогнозуючі моделі стійкості футеровки та надавати оператору поради щодо збільшення ресурсу в режимі реального часу.

6. Сформульовано принцип роботи системи підтримки прийняття рішень багатоетапного виробництва сортового прокату при вирішенні задач планування та керування, оснований на паралельній обробці замовлення на різних етапах. Це дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

7. Отримали подальший розвиток методи навчання рекомендаційних підсистеми оператора конвертерного виробництва, оснований на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини. Застосування цих методів в процесах рафінації та розкислення сталі дозволило суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та скоротити використання феросплавів.

8. Удосконалено математичну модель задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально–теплого балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Застосування отриманої моделі дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

**Наукове значення роботи** полягає у створенні методології автоматизації процесів керування виробництвом сортового прокату шляхом використання зведених економічних критеріїв ефективності виконання замовлень на виготовлення готової продукції замість технологічних, побудови математичних моделей виконання замовлень, а також застосування методів самонавчання для генерації альтернатив у процесах прийняття рішень при плануванні та керуванні такими виробництвами що дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у тому, що розроблені у дисертаційному дослідженні принципи, моделі і методи доведені до практичної реалізації у вигляді прототипу інтегрованої системи підтримки прийняття рішень у виробництві сортового прокату та можуть використовуватись для підтримки прийняття рішень в управлінні технологічними процесами таких виробництв.

*Реалізація результатів роботи.* Результати теоретичного дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано у виробничому процесі ряду підприємств Придніпровського регіону, що підтверджено відповідними актами. Зокрема, методика планування виконання замовлень на основі розробленої математичної моделі впроваджено у виробничу

практику ТОВ «Інтерпайп Україна» та Іноземного Підприємства «Сайткор Україна». Гібридний адаптивний метод на основі моделювання штучних імунних систем застосовано у практиці ТОВ «Ялантіс Україна». Методика розподілу металу по зливках на основі запропонованої математичної моделі впроваджена у діяльність АТ «Нікопольський завод феросплавів». Методика прогнозування стійкості плавильного агрегату на основі розроблених математичних моделей – в роботі ТОВ Інтерпайп Ніко Тьюб». Метод самонавчання рекомендаційної підсистеми оператора ливарного виробництва впроваджено на АТ «Нікопольський завод феросплавів».

Водночас результати дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано в навчальному процесі на факультеті інформаційних технологій НТУ «Дніпровська політехніка» при викладанні дисциплін «Системи штучного інтелекту», «Самонавчання складних систем», «Інтелектуальний аналіз даних» та «Еволюційні технології прийняття рішень в умовах невизначеності», а також при підготовці курсових і магістерських дипломних робіт студентами спеціальності «124 Системний аналіз», що підтверджено відповідним актом.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота є самостійно виконаним науково-прикладним дослідженням. Всі основні результати, теоретичні та практичні положення і висновки, які виносяться до захисту, одержані та сформульовані автором самостійно. З робіт, опублікованих у співавторстві, використані ті ідеї та розробки, які були отримані автором особисто. Зокрема, автору належать: принцип паралельного виконання замовлень на різних етапах багатоетапного прокатного виробництва [1, 16]; обґрунтування модульного підходу до побудови системи підтримки прийняття рішень в багатоетапному прокатному виробництві [10, 31]; постановка задачі оптимізації витрат металу на виконання певного замовлення шляхом регулювання висоти наливу злитків замість комбінації довжини розкרוювання готового злитка [3, 19, 33, 49, 52]; ідея побудови інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень на основі моделювання дій реального оператора конвертера з урахуванням результатів його дій [2, 4, 13, 43] та використання методів самонавчання для формування баз знань таких систем [6, 8, 22]; математична модель матеріально-теплого балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації, модель оптимізації шихтування [17, 26, 35]; ідея використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосуванні штрафної функції на розмірність апроксимаційного поліному [21, 45] та методика розв'язання задач відновлення математичних залежностей керуючих функцій розкислення та механічних характеристик готової продукції [43, 47]; аналіз проблеми прийняття рішень в багатоетапному прокатному виробництві [7, 27, 28]; аналіз проблеми мінімізації витрат металу на виконання замовлення [9, 11, 25]; методика застосування еволюційних методів до задач оптимізації використання металу [12, 34]; використання підходу на основі агрегованих даних для прогнозування стійкості футеровки [44]; постановка задачі ідентифікації моделі прогнозування стійкості футеровки та критеріїв її оцінювання [5, 46, 48]; метод оптимізації на основі моделювання штучних

імунних систем з використанням порівняльного оператора селекції [18]; метод адаптації операторів кросинговера та мутації евристичного алгоритму [51]; методи підвищення ефективності методу оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи [24, 50]; застосування розробленого методу до прикладних комбінаторних задач [14, 23, 37, 40]; дослідження впливу операторів кросинговеру, мутації та селекції на ефективність пошукових алгоритмів при розв'язанні комбінаторних задач [20].

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на:

**18** міжнародних науково-технічних і науково-практичних конференціях:

«Автоматика 2008» (м. Одеса, 2008); «Автоматика 2010»(м. Харків, 2010); «Системний аналіз та інформаційні технології (SAIT)» (Київ, 2009, 2011 та 2013 рр.); «Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS)» (Дніпро, 2011, 2012 та 2013 рр.); «Системний аналіз. Інформатика. Управління (САГУ)» (Запоріжжя, 2012 та 2013 рр.); «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» ІТММ - 2020, ІТММ - 2021 та ІТММ - 2023 (м. Дніпро, 2020 - 2023 роки); «Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи)» (Черкаси, 2013); «ІНФОТЕХ-2011» (Севастополь, 2011); «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» (Севастополь, 2011); «Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ)» (Черкаси, 2012); «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)» (Київ, 2017);

– II Міжнародному науковому симпозиумі Intelligent Solutions, «IntSol 2021» (Київ-Ужгород, 2021);

– **3** Міжнародних школах-семінарах «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2012, 2014 та 2016 рр.);

– **5** Всеукраїнських науково-практичних конференціях: «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем КМОСС-2020» (м. Дніпро, 2020); «Інформатика та системні науки (ІСН-2013)» (м. Полтава, 2013 р.); III, V та VI Всеукраїнських науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: теорія і практика» (м. Харків, 2020, м. Дніпро, 2022, м. Запоріжжя, 2023);

– наукових семінарах кафедри системного аналізу та управління Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» МОН України та кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій МОН України.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 52 наукових робіт, у тому числі 12 публікацій у закордонних періодичних виданнях та у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз: 4 – у *Scopus* та *Web of Science*, 8 – *Index Copernicus*; 16 наукових статей у фахових виданнях України, 25 матеріалів конференцій і тез доповідей.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 272 найменувань на 32 сторінках та 2 додатків на 8 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 290 сторінок, з них 240 сторінок основного тексту (без анотацій 218 сторінок), 45 рисунків, 41 таблиця.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та основні завдання дослідження. Визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, вказана наукова новизна та практичне значення отриманих результатів роботи. Надано характеристику особистого внеску здобувача у роботах, виконаних у співавторстві, також представлені відомості про апробацію результатів роботи. Подано опис структури та обсягу дисертації.

У **першому розділі** виконаний системний аналіз інформаційного забезпечення прийняття рішень в металургійному виробництві, декомпозиція виробничого процесу та класифікація задач, які є складовими загальної проблеми дослідження.

Металургійне підприємство розглянуто як складна система (рис. 1). Входами для технологічного процесу виступають сировина, енергоносії та потік замовлень на готову продукцію. Керуючими впливами для процесу є стандарти та технічні умови, що діють в галузі, а також цілі ведення бізнесу підприємством. Останні можуть бути виражені через певні критерії ефективності, серед яких мають місце як технологічні так і економічні. До технологічних показників традиційно відносять: обсяг виробництва певного виду продукції в тонах; продуктивність ділянки (цеху) в одиницях продукції за одиницю часу; завантаженість агрегатів та персоналу у відносних одиницях; якість продукції тощо. Водночас головні економічні показники ефективності виробництва прокату – це валовий дохід; валовий прибуток; рентабельність виробництва; темпи приросту обсягів виробництва. Для досягнення цілей діяльності та забезпечення готової продукції відповідно до замовлення та стандартів металургійне підприємство використовує людські, технічні та інформаційні ресурси. Останні є ресурсом для підвищення ефективності виробництва в цілому, а також поліпшення якості продукції.



Рис. 1. Металургійне підприємство як складна система (нотація IDEF)

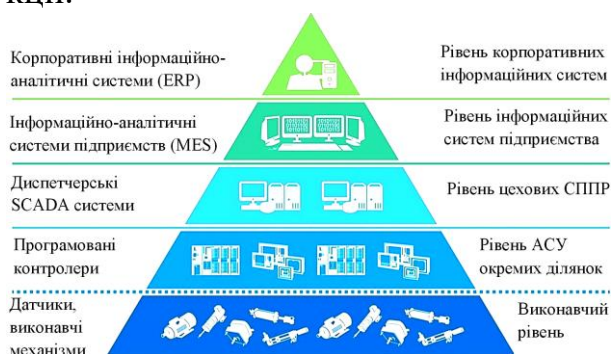


Рис. 2. Багаторівнева система управління промисловим підприємством

В ході аналізу рівнів керування на металургійних підприємствах визначено, що предметом даного дослідження є моделі та методи рівня інформаційно-аналітичної системи підприємства, що виконує завдання синхронізації, координації, аналізу та оптимізації випуску продукції в рамках

всього виробництва (рис. 2).

Наведено класифікацію систем автоматизації, що застосовуються в металургійному виробництві за рівнем прийняття рішень, а також з'ясовано, що існуючі системи підтримки прийняття рішень в більшості не виходять за рівень автоматичного керування і використовують технологічні критерії оптимальності.

Основним недоліком підходу більшості існуючих систем автоматизації при виробництві прокату є обмеження кола розв'язуваних задач рівнем керування однією (іноді двома) технологічними операціями. Проблеми планування і керування виробництвом, а також автоматизація взаємодії різних рівнів системи (технологічного та економічного) з урахуванням впливу «людського фактору» практично не досліджені і не одержали відповідної промислової реалізації. Відповідно зроблено висновок про необхідність побудови ряду математичних моделей складових процесу виготовлення прокатної продукції для розв'язання задач оптимізації цих процесів за запропонованими техніко-економічними критеріями, а також розробки методу розв'язання цих задач.

Виконано аналіз методів планування виконання замовлень металургійними підприємствами. Актуальним вбачається застосування для створення планів виконання замовлень у металургійному виробництві математичної моделі процесу планування на основі економічного критерію з урахування часу переналаштування обладнання та еволюційного методу оптимізації цього процесу.

Зроблено висновок про необхідність удосконалення математичної моделі оптимізації шихти при конвертерному виробництві, яка б враховувала технологічні та економічні критерії. При цьому для забезпечення роботи системи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності і суттєвих зовнішніх збурень актуальним є застосування в процесах керування плавкою методів самонавчання, орієнтованих на найбільш вдалі приклади попереднього ведення плавки.

Виконавши декомпозицію виробничого процесу на окремі технологічні операції, було виділено ключові задачі прогнозування та керування багатоетапного металургійного виробництва, в рамках загальної науково-технічної проблеми дослідження, визначено тип даних задач. Серед останніх значну частину мають однофакторні та багатофакторні задачі оптимізації, що забезпечують особу що приймає рішення (ОПР), необхідними даними щодо забезпечення оптимального перебігу процесу.

Задача умовної оптимізації скалярної цільової функції  $f(X)$  змінних  $x_i \in X$ , заданих на області припустимих значень  $D$  має вигляд

$$f^* = f(X^*) = \min_{X \in D} f(X). \quad (1)$$

Для розв'язання таких задач пропонується універсальний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи (ШС) людини. Метод ШС передбачає роботу з популяцією клітин, кожна з яких є вектором у просторі незалежних змінних. Основними операторами, які використовує метод моделювання штучної імунної системи є оператори клонування, мутації, відбору та стиснення популяції. Клонування є створенням для кожної з клітин поточного покоління множини її копій. В свою чергу мутація є зміною клітини випадковим чином. Вибір кроку й характеру мутації визначає

особливості різних реалізацій методу моделювання штучних імунних систем. Оператор клонального відбору передбачає заміщення поточної популяції кращими з нащадків, які пройшли процедури клонування та мутації. Оператор стиснення популяції вилючає надлишковість популяції

Автором обґрунтована актуальність задачі розробки такого методу оптимізації, який одночасно був би ефективний для комбінаторних і безперервних задач та реалізовував би взаємодію між пошуковими агентами, клональну селекцію і стиснення популяції, а також був би адаптивним до рельєфу цільової функції та мірності простору.

Зроблено висновок про актуальність досліджень, результатом яких має стати розробка та удосконалення математичних моделей технологічних процесів багатоетапного виробництва сортового прокату, а також обчислювального методу для розв'язання багатокритеріальних оптимізаційних задач при плануванні й керуванні цими процесами в складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень, що дозволить в підсумку підвищити ефективність виробництва.

**В другому розділі** розроблені ряд математичних моделей, які описують виконання замовлень на виготовлення сортового прокату, а також операцій поділу загальної маси плавки на зливки і розкроюванням цих злиwkів у двох переділах. Ці моделі об'єднує комбінаторних характер простору рішень та спрямування на мінімізацію глобального економічного критерію роботи, яким обрано витратний коефіцієнт металу.

Розглянуто **модель оптимального планування виконання замовлень при широкому сортаменті готової продукції**. Кожне замовлення  $\Omega$  представимо у вигляді сукупності числових характеристик

$$\Omega = \langle C, Q, P, W, T, Tx, Dx \rangle \quad (2)$$

де  $C$  – ціна за тону продукції;  $P$  – собівартість виконання замовлення з урахуванням додаткових вимог;  $W$  – обсяг замовлення у тонах;  $T$  – час, що дається на виконання замовлення;  $Tx$  – (може бути відсутній) додатковий час, упродовж якого замовлення може бути виконано з певним штрафом  $Dx$ , після ж цього часу замовлення вважається втраченим;  $Q_{n \times n}$  – матриця витрат при переході від виготовлення одного виду продукції до іншого ( $q_{a,b}$  може показувати як час переходу від виконання  $a$  – того замовлення до  $b$  – того, так і матеріальні витрати на здійснення такого переходу).

Якщо в момент прийняття рішень розглядається  $m$  заявок, що очікують виконання, то скінченна множина можливих рішень  $S$  складається з усіх можливих перестановок послідовності обробки цих замовлень. Відтак задача оптимізації плану виконання замовлень має вигляд

$$s^* = \arg \min_{s_j \in S} F(s_j) \quad (3)$$

де  $F(s_j)$  – цільова функція оптимізації, що має часовий або (частіше) матеріальний вимір, і включає розглянуті нижче чотири види небажаних втрат.

Економічні витрати на виконання операцій, що не є обов'язковими для продукції й виконуються залежно від конкретного замовлення включаються в

собівартість продукції по замовленню  $p_i$ , яка надалі пов'язується саме із замовленням  $i = 1, m$ , а не з видом продукції  $g = 1, g_{max}$ .

Враховуючи припущення, цільова функція оптимізації набуває вигляду

$$F(s_j) = \sum_{i=1}^{m1} F_{H,i}^j + \sum_{i=m1+1}^{m1+m2} F_{T,i}^j + \sum_{i=m1+m2+1}^{m1+m2+m3} F_{L,i}^j + F_Q^j, \quad (4)$$

де  $m = m1 + m2 + m3$  – загальна кількість замовлень;  $m1$  – кількість замовлень, що виконуються за час  $x_i \leq T_i$ ;  $m2$  – кількість прострочених замовлень, що виконуються за час  $T_i < x_i \leq Tx_i$ ;  $m3$  – кількість невиконаних замовлень, їх час  $x_i > Tx_i$ ;  $F_{H,i}^j, F_{T,i}^j, F_{L,i}^j$  – додаткові витрати підприємства при  $j$  –тому порядку виконання замовлень відповідно: від наявності незавершеного виробництва, від прострочування терміну виконання замовлення та від втрати замовлення (відмови у виконанні);  $F_Q^j$  – додаткові витрати, обумовлені зупинками для переналаштування обладнання.

Додаткові витрати підприємства від наявності незавершеного виробництва оцінюються для кожного замовлення за формулою

$$F_{H,i} = \max\{0; \alpha \cdot w_i(c_i - p_i)(T_i - x_i)\}, \quad (5)$$

де  $x_i$  – час, за який планується закінчити виконання  $i$  –того замовлення;  $T_i$  – час, через який клієнт планує отримати й сплатити  $i$  –те замовлення;  $c_i$  – відпускна ціна тонни продукції по  $i$  –тому замовленню, грн./тонну;  $p_i$  – собівартість тонни продукції по  $i$  –тому замовленню, грн./тонну;  $w_i$  – обсяг  $i$  –того замовлення, тонн;  $\alpha > 0$  – коефіцієнт дисконтування оборотних коштів, в.о./добу.

Додаткові витрати підприємства від перевищення терміну виконання замовлення оцінюються за формулою

$$F_{T,i} = \max\{0; Dx_i \cdot w_i \cdot c_i(x_i - T_i)\} | x_i \leq Tx_i, \quad (6)$$

де  $Dx_i$  – відносна до ціни продукції величина штрафу за кожен день перевищення директивного терміну виконання  $i$  –того замовлення, в.о./добу;  $Tx_i$  – крайній час, через який  $i$  –те замовлення втрачається.

Додаткові витрати підприємства від втрати замовлення при неможливості його виконати у відведений термін оцінюються за формулою

$$F_{L,i} = w_i(c_i - p_i) | x_i > Tx_i \quad (7)$$

Нарешті, додаткові втрати металургійного підприємства, що обумовлені витратами часу на переналаштування обладнання на новий вид продукції, пропонується розраховувати за формулою

$$F_Q = \sum_{i=1}^{m1+m2-1} q_{i,i+1} \frac{w_i(c_i - p_i) + w_{i+1}(c_{i+1} - p_{i+1})}{x_i + x_{i+1}}, \quad (8)$$

де  $q_{i,i+1}$  – час переналаштування.

Задача (3)–(8), передбачає одночасне зважене за сукупним матеріальним показником виконання критеріїв: максимальна частка замовлень, виконаних у відповідності до встановлених термінів  $x_i = T_i$  (виконання «точно в термін»); мінімальне середнє запізнення виконання всього переліку робіт; мінімальний обсяг незавершеного виробництва упродовж всього періоду планування (так звана «робота без внутрішнього складу»); мінімальний час неробочого стану обладнання; мінімум прибутку від замовлень, які не прийняті до виконання. Альтернативами, які будуть оцінюватись за зведеним критерієм

мінімуму сукупних додаткових втрат від виробничої діяльності (8), будуть послідовності обслуговування замовлень  $s_j$ .

Дана задача належить до класу комбінаторних оптимізаційних задач теорії розкладів, має ознаки незамкненої задачі побудови маршруту руху комівояжера (Travelling salesman problem, TSP). Матриця  $Q$ , що містить витрати часу на переналаштування буде симетричною. Водночас для неї виконується умова трикутника  $q_{ab} \leq q_{ac} + q_{cb}$ , що є ознакою метричності розв'язуваної задачі. В якості метрики пропонується застосовувати так звану максимальну метрику, яка враховує лише найбільшу відстань по координатах. Вибір метрики обумовлений тим, що переналаштування обладнання на різних ділянках може виконуватись персоналом одночасно, при цьому лімітуватиме завжди лише одна ділянка – з найбільшим часом переналаштування.

Аби не порушувати математичну цілісність задачі, між випуском однакової продукції за різними замовленнями пропонується замість нульового часу використовувати малу величину  $q_{i,j}^0 = 0,01 \cdot \min\{q_{i,j}\}$ .

**Математична модель оптимізації ваги зливку з огляду на перебіг технологічного процесу в майбутніх переділах враховує, що рідкий метал виробляють порціями по  $Q$  тон.** Виплавлений метал розливають у виливниці в кількості (стандартно  $N = 8$ ), кожна з яких  $n = 1, \dots, N$  може прийняти масу металу  $q_n$ , що лежить в межах від  $q_{min}$  до  $q_{max}$ . Даний виробничий етап породжує перші обмеження моделі:

$$q_1 + q_2 + \dots + q_N \leq Q, \quad (9)$$

$$q_{min} \leq q \leq q_{max}, \quad n = \overline{1, N} \quad (10)$$

Далі метал виливається у блюми певних перерізів, розкатується і розрізається. Для позначення варіанту блюму, який буде використаний для виконання поточного замовлення вводимо індекс  $i$ , який приймає значення  $i = 1, 2, \dots, I$ , де  $I$  – загальна кількість варіантів блюмів, що використовуються у виробництві. Перетин блюма  $a_i \times c_i$  встановлюється відповідно до виду продукції, що виготовляється.

Для кожного виду продукції  $m = 1, 2, \dots, M$  існує єдиний варіант блюму. При цьому деякі варіанти блюмів передбачають виготовлення не одного виду готового виробу, а відразу кілька. Номер виду розкроювання надалі позначаємо індексом  $p$ , який приймає значення  $p = \{1, 2, 3, 4\}$ , що означає розкроювання готової продукції відповідно на 12м, 11,7м, 9м або 6м.

При побудові моделі будемо вважати, що:

1) можна заздалегідь оцінити кількість блюмів певного перерізу  $w_i$ , яку необхідно використати для виготовлення продукції за планом  $b_m$  з розкроюванням  $p$ ;

2) між виливницями і блюмами встановлена однозначна відповідність;

3) кожна передільна заготовка розкроюється на штанги тільки одного розміру;

4) для кожного виду готової продукції, розкроювання  $p$  і відповідного варіанту блюму наперед відома оптимальна довжина передільної заготовки  $L_m$ .

Сформулюємо задачу розподілу наявного металу між виливницями таким чином, щоб розкроювання отриманих з них злитків на передільні заготовки забезпечувало мінімальну кількість обрізків на цьому та наступному етапах прокатки фасонних профілів.

Для побудови математичної моделі задачі оптимального виробництва продукції надалі вважаємо, що замовлення надходить у прокатний цех у вигляді плану виробництва  $b$  – таблиці, в якій рядок  $m = 1, 2, \dots, M$  відповідає виду продукції, а стовпець  $p = 1, 2, 3, 4$  – варіанту її розкроювання. Для кожного сполучення  $m$  і  $p$  наперед відомі відповідні значення:

-  $L_m^p$  – оптимальна довжина передільної заготовки для виробництва відповідної продукції;

-  $A_m^p$  – кількість штанг відповідної продукції, отримана після розкрою однієї заготовки довжини  $L_m^p$ ;

-  $R_m^p$  – мінімальний залишок злитку після його розкрою для виготовлення відповідної продукції.

Зв'язок між видами продукції, варіантами її розкроювання та наперед відомими параметрами переділу заготовки на етапі розкроювання готової продукції є жорстким і визначається сукупністю зазначених матриць.

Кількість заготовок оптимальної довжини, яку необхідно отримати з блюму для виконання поточного замовлення

$$Z_m^p = b_m^p / A_m^p, \quad m = \overline{1, M}. \quad (11)$$

Для розв'язності задачі припустімо, що розмір замовлення не перевищує об'єм плавки (або воно може бути розбите на такі частини)

$$\sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M g_m^p b_m^p \leq Q \quad (12)$$

де  $g_m^p$  – маса 1 штанги відповідної продукції, що обчислюється як маса 1 погонного метру продукції, помножена на довжину штанги  $L_m^p$ .

Враховуючи (12) та (10), кількість блюмів певного виду для виконання замовлення

$$\frac{1}{q_{max}} \sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M g_m^p (b_m^p \cdot h_{im}) \leq w_i \leq \frac{1}{q_{min}} \sum_{p=1}^4 \sum_{m=1}^M g_m^p (b_m^p \cdot h_{im}), \quad i = \overline{1, I} \quad (13)$$

Довжина блюму з  $n$  – тої виливниці після прокатки обчислюється за формулою:

$$l_n = \frac{q_n}{\bar{a}_n \bar{c}_n \rho}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (14)$$

де  $\rho$  – густина металу (кг/м<sup>3</sup>);  $\bar{a}_n, \bar{c}_n$  – розміри перерізу блюму.

Позначимо через  $x_m^{pn}$  – кількість заготовок довжини  $L_m^p$ , яку отримаємо після розкрою  $n$  – того блюму. Враховуючи викладки (11) – (14) та допоміжні змінні, введені нами вище, математична модель задачі мінімізації кількості металу, що використовується для виготовлення поточного замовлення, яке не перевищує обсяг поточної плавки (9), може бути записана наступним чином: потрібно знайти такі значення величин  $q_n$  та  $x_m^{pn}$  при можливих коефіцієнтах  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $m = 1, 2, \dots, M$  та  $p = \{1, 2, 3, 4\}$ , за яких приймає мінімальне значення функція

$$F(q, x) = \sum_{n=1}^N (l_n - \sum_{m=1}^M \sum_{p=1}^4 (L_m^p \cdot x_m^{p,n}) | \sigma_{mn} = 1) \rightarrow \min \quad (15)$$

при виконанні обмежень (12) – (14).

Побудована математична модель є задачею частково цілочисельного лінійного програмування. Для її розв'язування можна застосувати або методи відсікань Гоморі, або комбінаторні методи, наприклад, метод гілок та меж, або ж евристичні алгоритми. Сформульована задача передбачає економію матеріальних ресурсів за рахунок мінімізації витраченого на виготовлення замовлення металу та часу виконання замовлень за рахунок зменшення кількості переналаштувань механізму розкроювання при виробництві запланованої кількості продукції. Викладений підхід може бути застосований для оптимізації виробництва труб, коліс, фасонного прокату та іншої прокатної продукції.

Запропонована математична модель оптимальної розливки рідкої сталі на зливки була застосована на прикладах виконання типових добових замовлень в умовах роботи металургійних підприємств Придніпровського регіону. Результати застосування математичної моделі та оцінка точності й стійкості розв'язків, що забезпечує розроблена модель при вирішенні оптимізаційних задач для реальних замовлень, наведені в подальших розділах.

**Математична модель оптимального розкроювання заготовок прокатного виробництва.** Задача оптимального розкроювання відносить до класу задач цілочисельного програмування. В загальному випадку, вона формулюється наступним чином.

Необхідно із заготовок з довжинами  $L_1, L_2, \dots, L_j, \dots, L_m$ , що надходять, викроїти штанги довжиною  $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_n$  в заданій кількості  $p_i$ , де  $i = 1, 2, \dots, n$ . Критерієм, що визначає економічність розкроювання, як і всього прокатного виробництва, є витратний коефіцієнт металу (ВКМ), який розраховується за формулою

$$K_{\text{ВКМ}} = \sum_{j=1}^m L_j / \sum_{i=1}^n p_i l_i \rightarrow \min. \quad (16)$$

Окрім мінімізації витрат матеріалу на виготовлення необхідної готової продукції план розкроювання повинен задовольняти умовам мінімізації переналаштувань (кількості різних довжин, на які розкроюється передільна заготовка) та мінімізації заготовок, використаних на виготовлення певного замовлення. З огляду на викладене та використовуючи (27) математична модель задачі набуває вигляду

$$\sum_{j=1}^m L_j / \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} + \alpha \sum_{j=1}^m k_j + \beta \sum_{i=1}^n w_i \rightarrow \min \quad (17)$$

за умов і обмежень:

$$\sum_j^m x_{ij} \geq p_i; \quad x_{ij} \geq 0 \quad (18)$$

де  $x_{ij}$  - кількість штанг  $i$ -того типу довжиною  $l_i$ , що розкроюються з  $j$ -тої заготовки;  $L_j$  - довжина  $j$ -тої заготовки;  $p_i$  - загальна потреба у штангах  $i$ -того типу, необхідна згідно із замовленням;  $k_j = \text{count}(x_{ij} > 0)$  - кількість типів штанг, що виготовляється із  $j$ -тої заготовки;  $w_i = \text{count}(x_{ij} > 0)$  - кількість заготовок, що використані для виготовлення штанг  $i$ -того типу;  $\alpha$  та  $\beta$  - вагові коефіцієнти для штрафних функцій додаткових критеріїв.

Маючи ряд переваг, таких як простота нотації та гнучкість щодо врахування додаткових критеріїв, постановка (17)-(18) не містить у явному

вигляді тої величини, на яку має бути спрямована оптимізація, а саме – кількість залишків (обрізків), що залишається після розкроювання. Використовуючи попередні позначення, переформулюємо задачу наступним чином:

$$\sum_{j=1}^m (L_j - \sum_{i=1}^n l_i x_{ij}) \rightarrow \min \quad (19)$$

вважаючи справедливим (18).

З метою запобігання нерівномірності виконання плану пропонується введення додаткового критерію, який має регулювати рівномірність. З урахуванням нормування та приведення цього критерію запропонована цільова функція оптимізації розкроювання лінійних заготовок на штанги наперед заданої довжини з мінімізацією сумарної кількості обрізків та рівномірним виконанням замовлень набуває вигляду

Аби доданий критерій не порушував загальної мети оптимізації, його необхідно нормувати та привести

$$\sum_{j=1}^m \left( L_j - \sum_{i=1}^n l_i x_{ij} + \lambda \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i}^n \left( \frac{x_{ij}}{p_i - \sum_{q=1}^{j-1} x_{iq} + 1} - \frac{x_{kj}}{p_k - \sum_{q=1}^{j-1} x_{kq} + 1} \right)^2 \right) \rightarrow \min \quad (20)$$

де  $x_{ij}$  ( $x_{kj}$ ) – кількість заготовок, що вирізаються на виконання  $i$  – ого ( $k$  – того) замовлення із заготовки  $j$ ;  $z_i$  ( $z_k$ ) – залишок об'єму замовлення  $p_i$ , яке ще не виконане на момент розкроювання  $j$  – тої заготовки,  $z_i = p_i - \sum_{q=1}^{j-1} x_{iq}$ ;  $q$  – номери вже розкроєних на даний момент штанг,  $\lambda$  – ваговий коефіцієнт для допоміжного критерію, має розмірність довжини.

Постановка (20) з урахуванням (18) дозволяє вирішувати глобальну задачу мінімізації витратного коефіцієнта металу при послідовному прокатуванні заготовок заздалегідь невідомої довжини, застосовуючи принцип оптимальності Беллмана при переході від одного частково-оптимального рішення до іншого. Точне рішення поставленої задачі в умовах обмеження часу й суттєвої невизначеності вхідних даних не має сенсу. Для субоптимального розв'язання наведеної задачі можуть бути застосовані еволюційні методи оптимізації, один з яких запропонований автором у подальших розділах.

**Третій розділ** присвячено побудові та вдосконаленню математичних моделей, що стосуються виробничих процесів, пов'язаних з виготовленням прокату і можуть бути описані в безперервному просторі. Серед процесів розглянуті шихтування сталі, розрахунок оптимальної кількості розкислювачів та сертифікація готової продукції. Також запропоновано модель прогнозування терміну роботи футеровки конвертера з метою визначення дій, що сприятимуть його максимізації, тобто збільшенню частки робочого часу плавильних агрегатів.

Основою **розрахунку шихти**, крім вимог до марки сталі, є так зване рівняння теплового балансу, що має вигляд

$$\sum_{i=1}^n Q_i^{in} - \sum_{j=1}^m Q_j^{out} \rightarrow 0, \quad (21)$$

де  $\sum_{i=1}^n Q_i^{in}$  – сума тепла, що надходить у конвертер від усіх джерел  $i = 1 \dots n$ ;  $\sum_{j=1}^m Q_j^{out}$  – сума тепла, що витрачається у  $j = 1 \dots m$  процесі.

Крім теплового балансу, має підтримуватись матеріальний баланс плавки

$$\sum_{k=1}^p M_k^{in} - \sum_{l=1}^q M_l^{out} \rightarrow 0, \quad (22)$$

де  $\sum_{k=1}^p M_k^{in}$  – сума мас усіх речовин  $k = 1 \dots p$ , що потрапляють до конвертера під час плавки;  $\sum_{l=1}^q M_l^{out}$  – сума мас усіх речовин  $l = 1 \dots q$ , що утворюються у процесі плавки. Оскільки з міркувань оптимізації використання сталі, викладених вище, готова сталь розливається у виливниці заздалегідь відомими порціями, надалі  $M_{st}^{out} = const$ .

При формуванні шихти разом з головним економічним критерієм вигляду

$$J_1: \sum_{k=1}^p (C_k M_k^{in}) \rightarrow \min \quad (23)$$

де  $C_k$  – вартість одиниці маси кожного із матеріалів, що входять до шихти, має враховувати одночасне виконання критеріїв балансу плавки за теплом і масою хімічних речовин (21), (22).

Оскільки порушення в ході ведення плавки умов (31) або (32) призводить до додаткових витрат часу й матеріалів, запропоновано ввести додаткові критерії, які відповідають виконанню умов теплового балансу ( $J_2$ ) та матеріального балансу ( $J_3$ ). Оптимізація шихтування таким чином є багатокритеріальною задачею, що полягає у одночасному досягненні екстремумів цільових функцій (21), (22) та (23). Викладене можна записати наступним чином:

$$J = J_1 \cap J_2 \cap J_3 \rightarrow \min. \quad (24)$$

Змінними, що використовуються в ході оптимізації, є маса тих чи інших речовин, які оператор конвертера може використати в плавці. Обмеженнями у даній оптимізаційній задачі є рівняння фізико-хімічних перетворень, що мають суттєво нелінійний характер. Поставлена задача оптимізації матеріально-теплового балансу конвертерної плавки (24) має ознаки багатокритеріальної задачі з частково цілочисельними змінними. Загальна кількість керованих змінних – 15; кількість лінійних і нелінійних обмежень – 47, серед яких 22 – двосторонні.

Для розв'язання такої задачі запропоновано використовувати еволюційний оптимізаційний алгоритм з використанням комунікативних агентів.

При розв'язанні актуальної **задачі відновлення залежностей** механічних властивостей готової продукції від параметрів виплавки сталі в якості апроксимаційної функції пропонується використовувати традиційні поліноми Колмогорова-Габора

$$y = \sum_{i=0}^{M-1} a_i \cdot \prod_{j=1}^k x_j^{S_{ij}} \quad (25)$$

де  $k$  – кількість змінних;  $M$  – кількість членів полінома;  $a_{ij}$  – коефіцієнти при складових полінома;  $S_{ij}$  – степені аргументів.

Пропонується надалі дозволяти використання в моделях від'ємних степенів  $S_{ij}$

$$\sum |S_{ij}| \leq m, \quad (26)$$

що дозволяє не лише підвищити фізичну відповідність моделей сутності процесів, а й створити новий тип предикторів, а саме співвідношення вигляду  $a_{ij} \frac{x_i}{x_j}$ . Як показали дослідження, саме на подібні співвідношення припадає найбільший внесок інформації на класі розглянутих моделей.

В якості критерію якості моделі апроксимації використовується критерій регулярності, до якого пропонується додати складову штрафу у вигляді тиску розмірності

$$J(A, M) = \sum_{t=1}^N (Y_t - y_t)^2 + \alpha M \rightarrow \min \quad (27)$$

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

Запропонований метод визначення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від’ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного поліному був застосований у складі СППР виробництва прокату. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації. В якості розрахункових алгоритмів розв’язання задачі (27) з обмеженням (26) були застосовані ряд евристичних методів пошуку оптимальних рішень. Найкращу ефективність показав адаптивний метод на основі моделювання штучної імунної системи, докладно описаний нижче.

Задача **прогнозування терміну роботи поточної футеровки** формально полягає у побудові математично-логічної моделі  $M$  за результатами спостережень, такої, що забезпечувала б точне відображення

$$M^*: X \rightarrow Y, \quad (28)$$

де  $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  - множина векторів незалежних параметрів процесу (факторів)  $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ ;  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_k\}$  - множина векторів цільових змінних  $Y_j = (y_{j1}, y_{j2}, \dots, y_{jl})$ ;  $n$  – кількість навчальних прикладів;  $k$  – кількість можливих значень цільової функції (при навчанні на прикладах, вважаючи простір рішень безперервним, слід вважати  $k = n$ );  $m$  - кількість незалежних змінних;  $l$  – кількість змінних у векторі, що описує цільову функцію (спрощено  $l = 1$ , адже нас цікавить насамперед термін експлуатації футеровки).

Подібна модель дозволить оцінити ресурс футеровки, а також – що найважливіше – керувати цим ресурсом, використовуючи множину доступних ресурсів.

Частина факторів, які впливають на стійкість футеровки, мають категорійний характер і не можуть включатися до регресійних моделей, заснованих на дійсних змінних, заданих на вільно масштабованих шкалах. Водночас, ці характеристики мають іноді ключове значення. Зокрема, за критеріями Фішера та Краскела-Уолліса, який надає нам підстави стверджувати, що на стійкість футеровки конвертера значним чином впливають її виробник, сезон початку експлуатації та пора року, на яку припадає більша частина її експлуатації (рис. 3).

У результаті перетворення та масштабування вихідних даних отримано ще один прихований фактор – середнє навантаження на футеровку за час її експлуатації, вплив якого ілюструє рис. 4.

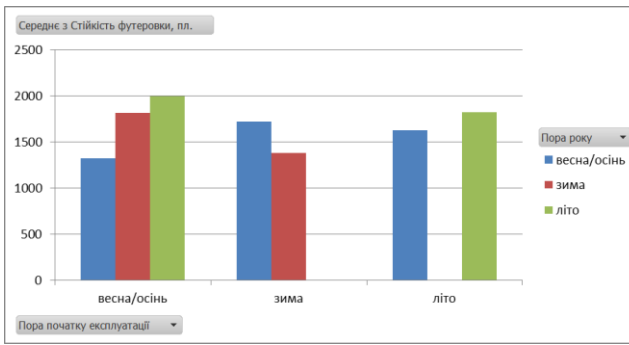


Рис. 3 – Залежність середнього часу роботи футеровки від пори року експлуатації

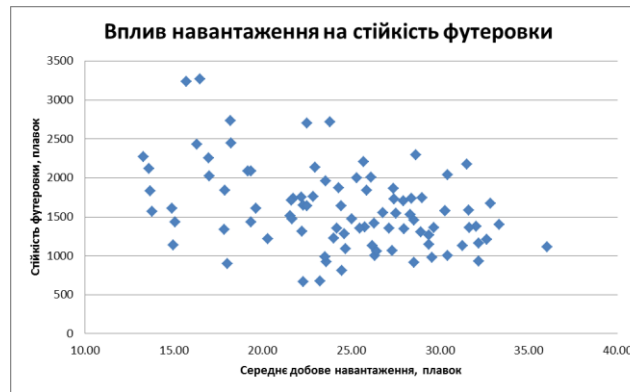


Рис. 4. Вплив середнього навантаження на стійкість футеровки

В підсумку, спираючись на дані про 145 551 плавку, до розгляду були взяті 21 агреговані фактори ведення плавки ( $X_1 - X_{21}$ ), до яких були додані середнє навантаження ( $X_{22}$ ), пора року початку експлуатації ( $X_{23}$ ) та виробник ( $X_{24}$ ). Єдиною залежною змінною  $Y$  за (28) виступає – стійкість футеровки конвертера, що вимірюється у кількості плавки.

Для перевірки однорідності отриманих даних було проведено кластерний аналіз методом Уорда. Виявлено, що в даних є чітко виражені два кластери. Такі ж дані були отримані при кластеризації методом k-середніх з підбором оптимальної кількості кластерів. Розподіл номерів футеровок в просторі перших двох головних компонент наведені на рис.5.

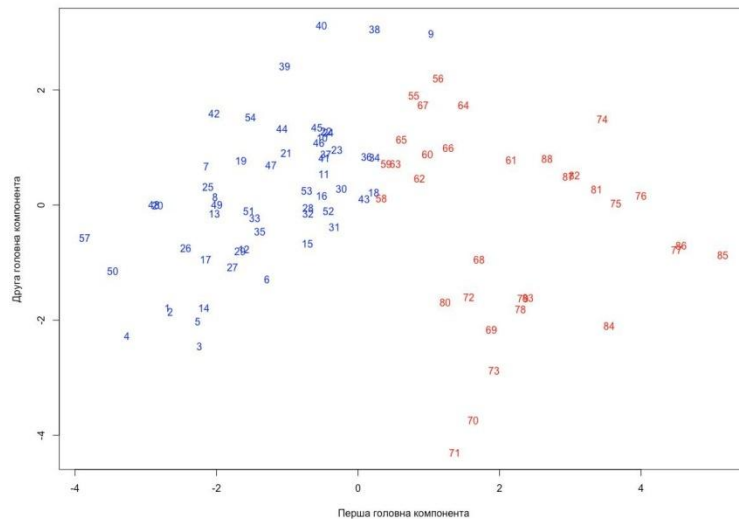


Рис. 5. Експериментальні точки у координатах першої та другої головної компоненти та їх розподіл по кластерах

Розподіл даних по кластерах на рис. 5 показує, що визначальною є перша головна компонента. Її вираз для нормованих і центрованих даних

$$Y = 0.43x_{18} + 0.38x_{24} + 0.33x_{16} + 0.33x_{13} + 0.29x_{11} + 0.27x_1 + 0.23x_4 + 0.13x_{10} + 0.13x_{14} + 0.13x_3 + 0.1x_{23} + 0.07x_{21} + 0.07x_7 \quad (29)$$

З вигляду залежності (29) можна побачити, що кластери суттєво відрізняються кількістю шлакувань, виробником та кількістю торкретувань.

Виконавши нормування, центрування з урахуванням належності до кластера та виключивши можливий вплив автокореляції, були отримані залежності стійкості футеровки від значимих факторів, що мають вигляд:

- для першого кластера

$$Y = a_0 - a_1x_4 + a_2x_{18} - a_3x_{21} + a_4x_{24} \quad (30)$$

- для другого кластера

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_3 - a_3x_{10} - a_4x_{13} - a_5x_{16} + a_6x_{18} \quad (31)$$

Значення F-статистики для кожного з рівнянь менше  $10^{-15}$ . Величина скорегованого  $R^2$  дорівнює відповідно: для моделі (30) першого кластеру – 0.9077, а для моделі (31) другого кластеру – 0.9203. Обидві моделі повністю відповідають умовам теореми Гауса-Маркова (залишки мають нормальний розподіл, постійну дисперсію та не корельовані), а також містять лише статистично значимі коефіцієнти. Виходячи з цього, надалі приймаємо моделі (30) та (31) в якості оціночних при прогнозуванні стійкості футеровки.

Аналізуючи отриманий результат, легко помітити, що моделі суттєво відрізняються, спираючись лише на один спільний фактор, а саме – позитивний вплив кількості азотувань (X18). Для практичного ж застосування моделей (30)-(31) необхідно спочатку вірно ідентифікувати кластер, в який попадає поточна сесія роботи футеровки, а потім скористатися відповідною моделлю.

**Четвертий розділ** присвячений розробці методу умовної та безумовної оптимізації для розв'язання задач, описаних в розділах 2 та 3. Назвемо запропонований метод HINO-SF (Hybrid Immune Network Optimization method with Saaty selection and Fibonacci search). Алгоритм методу складається з наступних кроків:

Крок 1. Задається критерій зупинки (машинний або астрономічний час). Випадково генерується популяція антитіл. Лічильник поколінь  $t = 0$ .

Крок 2. Якщо досягнуто наперед заданий критерій, здійснюється перехід до кроку 11; в іншому випадку – перехід до кроку 3.

Крок 3. За оцінкою пристосованості призначається кількість клонів для кожної з клітин поточного покоління – оператор селекції.

Крок 4. Клонування клітин у кількості, що визначена оператором селекції.

Крок 5. Рекомбінація клонованих особин за допомогою адаптивного оператора ймовірнісного кросинговеру.

Крок 6. Розрахунок динамічної ймовірності мутації для клонів та виконання адаптивного оператора мутацій.

Крок 7. З певною ймовірністю виконання для кожного клону оператору одновимірного локального пошуку за випадковою координатою.

Крок 8. Стиснення спільної популяції батьків та клонів за рахунок відповідного адаптивного оператора до заданого рівня  $N_p$ .

Крок 9. Знищення з поточного покоління клітин, вік яких досяг заданого значення  $t_{max}$ . Їх місце в основній популяції займають клітини, згенеровані випадковим чином в області пошуку.

Крок 10. Лічильник поколінь  $t = t + 1$ . Перехід на крок 2.

Крок 11. Виведення поточного покоління, як множини субоптимальних рішень.

Крок 12. Зупинка методу.

Викладений метод оптимізації на базі гібридної імунної мережі може використовуватись для розв'язування як задач у нескінченному просторі, так і задач комбінаторного типу, зокрема, задач планування виконання замовлень та задач розподілу сталі по виливницях. Ключовою перевагою методу на основі ШИС є забезпечення альтернативних рішень, що мають певну відмінність між

собою, але близькі за цільовою функцією. Ключовим недоліком – відносна повільність в пошуку рішень, адже в кожному циклі, що відповідає поколінню, потрібна велика кількість обчислень. Саме на підвищення швидкості будуть спрямовані удосконалення пропонованого методу в порівнянні з відомими реалізаціями, основаними на ШС.

Зокрема, пропонується в *операторі генерації* особин замість генератора псевдовипадкових чисел застосовувати квазі-випадкові числа, які мають кращу однорідність. Як показали дослідження, застосування квазі-випадкових генераторів при довготривалій роботі евристичного методу забезпечують те ж саме підсумкове рішення в середньому на 12-20% ітерацій швидше.

Задля забезпечення одночасного врахування критеріїв широти охоплення простору рішень (диверсифікації) та швидкості обстеження околів відомих якісних рішень (інтенсифікація) пропонується використання модифікованого *оператора селекції*, заснованого на методі попарних порівнянь Сааті. Матриця парних порівнянь заснована на наступному принципі:

$$b_{ji} = \begin{cases} |a_j - a_i| + 1, & \text{if } a_j \geq a_i, \\ \frac{1}{b_{ji}}, & \text{if } a_j < a_i. \end{cases} \quad (32)$$

Розрахунок ймовірності агента стати батьком виглядає так:

$$\mu(\varphi(X_i)) = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ji}} / \sum_{i=1}^n \left( \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n b_{ji}} \right). \quad (33)$$

На відміну від відомих раніше реалізацій пропонується зняти обмеження на пристосованість пошукового агента як умову виступати батьком для клонів наступного покоління. Порівняння модифікованого оператора селекції з конкуруючими за кількістю ітерацій та кількістю викликів цільової функції показало, що запропонований оператор однаково ефективний як у двійковому, так і в дійсному просторі.

Ключовою відмінністю запропонованого методу є застосування до клонів *адаптивного оператора кросинговеру*. Саме кросинговер дозволяє ідентифікувати запропонований метод як мережевий, адже пошукові агенти обмінюються інформацією на рівні генів. В ході дослідження з'ясовано, що для задач великої розмірності найбільш ефективним є рівномірний кросинговер, а для задач малої і середньої розмірності – кросинговер SBX з наступними налаштуваннями:

- ймовірність кросинговеру для пари батьків обирати в межах  $P_{cross} \in (0.2 \dots 0.6)$ , більші значення – для більшої розмірності задачі;
- ймовірність обміну певним геном обирати в межах  $P_{ind} \in (0.4 \dots 0.9)$ , більші значення – для більшої розмірності задачі;
- індекс варіації  $\eta$  має зростати від 1 до 5 за час розрахунку.

Пропонується адаптивний *оператор мутації*, який випадковим чином застосовує або «вузьку» мутацію з метою інтенсифікації пошуку в околі поточного рішення, або «широку» мутацію для диверсифікації області пошуку. Вибір для поточного нащадка діапазону мутацій («широка» чи «вузька») ґрунтується на оцінці функції корисності його батьківської особини відносно корисності інших пошукових агентів в популяції та від номеру ітерації:

$$mutSelect_j = \left(1 - \gamma \frac{t}{T_{max}}\right) \frac{\varphi_{max} - \varphi_j}{\varphi_{max} - \varphi_{min}}, \quad j = [1: N_c], \dots \dots \dots (34)$$

де  $j$  – номер клону у популяції нащадків;  $N_c$  – розмір популяції клонів;  $t$  – номер ітерації;  $T_{max}$  – максимальна кількість ітерацій;  $\varphi_{max}$  – найгірше значення цільової функції в поколінні;  $\varphi_{min}$  – найкраще значення цільової функції в поколінні;  $\varphi_j$  – значення цільової функції поточного клону;  $\gamma$  – максимально допустима частка широких мутацій.

Якщо для клону  $j$  за (34)  $U(0; 1) < mutSelect_j$ , для нього виконується «вузька» мутація, інакше - «широка». Для дійсного простору пропонується використовувати комбінацію «широкої» мутації Гаусса та «вузької» мутації з використанням поліноміального розподілу. В ході дослідження на тестових задачах було виявлено, що частка «широких» мутацій  $\gamma$ , що входить до виразу (44) повинна збільшуватись до 0,8...0,9 для задач високої розмірності.

Аби інтенсифікувати пошук рішення в околі поточного розташування пошукового агента, до клону певною ймовірністю  $P_{ls}$  пропонується застосовувати оператор *одновимірного локального пошуку* методом золотого перетину (Фібоначчі). В ході експериментів встановлено, що на багатоекстремальних задачах у просторі з мірністю від 2 до 100 ймовірність застосування локального пошуку має бути в межах  $P_{ls} = 0,01 \dots 0,2$ .

*Адаптивний оператор стиснення популяції* визначає успіх пошуку рішень у методі штучних імунних систем. Він запобігає передчасній збіжності рішень. Робота оператора стиснення передбачає сортування всіх пошукових агентів за зменшенням афінності та циклічне вилучення усіх клітин, гірших за відомі й ближчих ніж радіус стиснення  $R$ .

Пропонується пов'язувати радіус стиснення з радіусом мутації клонів в поточному поколінні  $\delta_i(t)$ . Експериментально виявлено, що ефективне значення радіусу стиснення зростає зі збільшенням розмірності задачі. Враховуючи викладене, отримано вираз для адаптивного радіусу стиснення популяції

$$R(n, t) = \frac{1}{2N_{pop}} \sqrt{\frac{2}{1+t}} \sqrt{n} = \frac{1}{N_{pop}} \sqrt{\frac{n}{2(1+t)}}, \quad (35)$$

де  $n$  – розмірність задачі в дійсному просторі;  $N_{pop}$  – розмір популяції;  $t$  – номер поточної ітерації.

Ключовою відмінністю розв'язання *комбінаторних задач* є бінарний характер змінних, що накладає суттєві відмінності на організацію операторів кросинговеру, мутації, стиснення та локального пошуку.

В ході експериментального дослідження на широкому колі задач з'ясовано, що двохточковий кросинговер є найбільш ефективним при застосуванні в складі метод штучної імунної мережі. Оператор кросинговера рекомендується використовувати з ймовірністю 0,9...0,95.

Бінарні мутації, як і в дійсному просторі, можуть бути «вузькі» та «широкі». Оскільки «широка» мутація для комбінаторного простору є оператором диверсифікації напрямку пошуку задачі, рекомендується показник  $\gamma$ , що входить до (34) для комбінаторних задач приймати не вище, ніж 0,15...0,3. Основною характеристикою відмінності хромосоми нащадка від батьківської

після мутації є  $mLevel$  - кількість бітів, які мають інвертуватись або зсуватись одночасно в клона, який піддається мутації. Ця кількість визначається за формулою

$$mLevel = \begin{cases} \left[ mLevel_{max} \left( 1 - \frac{2t}{T_{max}} \right) + \frac{2t \cdot mLevel_{min}}{T_{max}} \right], & \text{if } t < \frac{T_{max}}{2}; \\ mLevel_{min}, & \text{if } t \geq \frac{T_{max}}{2}. \end{cases} \dots\dots (36)$$

Величина  $mLevel_{max}$  обирається залежно від розмірності задачі, але перестає забезпечувати швидку збіжність методу при  $mLevel_{max} \geq 0,1 \cdot$  Величина  $mLevel_{min} = 1$  не залежить від розмірності задачі.

У п'ятому розділі запропоновано структуру і функції інтегрованої СППР в процесах планування та керування багатоетапним виробництвом сортового прокату. Пропонується паралельне виконання замовлень інтегрованою системою підтримки прийняття рішень в процесах планування, контролю та керування. Структура СППР з огляду на технологічний процес виробництва прокату ілюструється рис.6. До системи включено шість баз даних, кожна з яких відповідає своєму підрозділу підприємства, а також сім модулів у відповідності до розглянутих виробничих процесів.

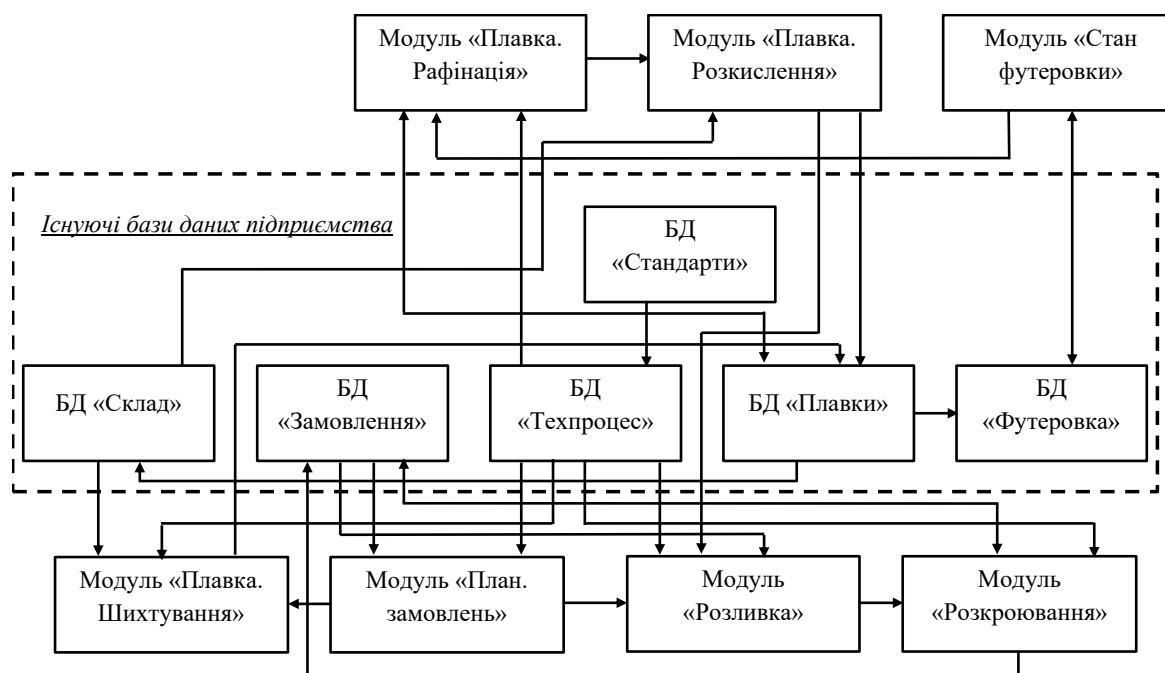


Рис. 6. Схема взаємодії модулів СППР виробництва прокату та баз даних

Всі обчислювальні, оптимізаційні та рекомендаційні процеси відбуваються у окремих модулях СППР. Кожен з виділених на рис. 6 модулів передбачає, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язання певної задачі, математичні постановки яких і підходи до вирішення описані в розділах 2 і 3. Для розв'язання цих задач використовується обчислювальний метод на основі моделювання штучної імунної системи, описаний в розділі 4.

Запропоновані методи навчання рекомендаційних підсистем оператора конвертерного цеху, що використовують попередній досвід ведення виробничого процесу з оцінкою дій оператора для формування рекомендацій у

подальших виробничих циклах. Для цього процес плавки представлено схематично у вигляді об'єкта управління, як показано на рис. 7, де керуючі величини об'єднані у вектор  $U$ , контрольовані збурення –  $Z_1$ , неконтрольовані збурення –  $Z_2$ , задані технічні характеристики отриманої сталі –  $X$ , економічні показники технологічного процесу –  $X_1$ .

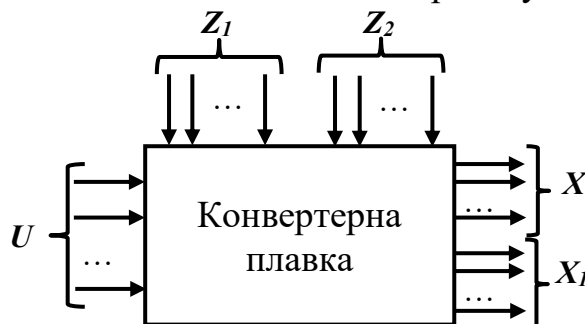


Рис. 7. Конвертерна плавка як об'єкт управління

	C	Si	Mn	S	P	t
Чавун рідкий	4.3	0.8	0.7	0.035	0.05	1290
Чавун в чушках	4.2	0.8	0.7	0.035	0.05	
Брухт чавуну	4.25	0.9	0.65	0.035	0.05	
Брухт (10% Кремнію)	0.2	10	0.5	0.200	0.05	
Брухт сталевий	0.2	0.1	0.5	0.040	0.025	Тпрот
Шихта загалом	4.045	0.765	0.734	0.049	0.051	29

Готова сталь	C	Mn	S	P	t	Маса
	0.18	0.15	0.03	0.009	1630	59

Рис. 8. Вхідні дані поточної плавки для пошуку аналога

Пропонується порівнювати поточні початкові умови шихтування (ілюструються рис. 8) та протоколами всіх попередніх плавок. Наведені на рис. 8 величини разом з масовими показниками шихтування створюють вектор контрольованих збурень  $Z_1$ , а параметри готової сталі – вектор цільових змінних внаслідок керування  $X^*$ . В базі даних попередніх плавок відшукувались протоколи, які мають найменшу зважену відстань до поточного  $Z$  та  $X^*$  в просторі координат. Близькість  $D$  вираховується за нормованою метрикою

$$D = \alpha \sum_{i=1}^n \left( \frac{z_i - z_i^0}{z_i^0} \right)^2 + \sum_{j=1}^m \left( \frac{x_j^* - x_j^{*0}}{x_j^{*0}} \right)^2 \rightarrow \min, \quad (37)$$

де  $\alpha$  – ваговий коефіцієнт початкових умов ( $\alpha \gg 1$ , якщо виплавляється традиційна марка сталі, та  $\alpha = 0,1..0,25$ , якщо виплавляється нова сталь;  $n$  – довжина вектору початкових умов;  $m$  – довжина вектору що описує готову сталь;  $z_i$  – числове значення  $i$  – того параметра попередньої плавки (зразка),  $i = \overline{1, n}$ ;  $z_i^0$  – числове значення  $i$  – того параметра поточної плавки;  $x_j^*$  – значення  $j$  – того параметру готової сталі для плавки-зразка,  $j = \overline{1, m}$ ;  $x_j^{*0}$  – значення  $j$  – того параметру готової сталі для поточної плавки.

Серед найближчих аналогів обираються протоколи плавок, які мають найменшу нормовану відстань за (3) та водночас найкращі економічні показники (вектор  $X_1$  згідно схеми рис. 7). Згортка економічних критеріїв має вигляд

$$C = \frac{c_1 V'_{O_2} + c_2 t' + c_3 N_d t_d + \sum_{k=1}^p (c_{4k} m'_k) + c_5 p H'}{c_{st} M_{st}} \rightarrow \min, \quad (38)$$

де  $c_i$  – приведена до грошової оцінки вартість додаткових витрат на плавку за  $i$  – тою причиною, грн.,  $i = \overline{1, 5}$ ;  $c_{st}$  – вартість 1 тони готової сталі, грн;  $M_{st}$  – розрахункова маса плавки, тон;  $V'_{O_2}$  – понаднормова витрата кисню, м<sup>3</sup>;  $t'$  – перевищення запланованого часу продувки, сек;  $N_d$  – кількість додувок;  $t_d$  – загальний час додувок, сек;  $m'_k$  – маса додаткових витрати охолоджувача  $k$  – того виду, тон,  $k = \overline{1, p}$ ;  $p$  – кількість доступних видів охолоджувачів, зазвичай  $p = 3 \dots 6$ ;  $pH'$  – відхилення основності шлаку від заданого значення.

Оцінка кращих зразків ведення плавки з бази даних виконується за рівноважною згорткою за нормалізованими значеннями векторів  $Z$ ,  $X$  та  $X_1$  та їх відповідності до реальних умов:

$$F = e^{-(C+D)} \rightarrow \max. \quad (39)$$

Якщо декілька попередніх плавки мають однакову якість за (52), вони всі беруться до розгляду. В іншому випадку за зразок обирається обмежена підмножина потужністю  $\nu$  найкращих варіантів ведення плавки в минулому, для яких показник за (52) є вищим. Сценарій поведінки оператора конвертера будується як вектор, усереднений за найкращими відібраними з пам'яті зразками. Вектори однакової довжини усереднюють зваженою згорткою всіх взятих до розгляду сценаріїв, де ваговими коефіцієнтами є оцінки близькості за (39)

$$t'_i = \sum_{l=1}^{\nu} (t_{il} F_l) / \sum_{l=1}^{\nu} F_l, \quad W'_i = \sum_{l=1}^{\nu} (W_{il} F_l) / \sum_{l=1}^{\nu} F_l, \quad (40)$$

де  $t'_i$  – зважений час виконання  $i$  –тої дії, сек;  $W'_i$  – зважений числовий показник  $i$  –тої дії у відповідних одиницях виміру;  $t_{il}$  – час виконання  $i$  –тої дії в сценарії  $l = \overline{1, \nu}$ , сек;  $W_{il}$  – числовий показник  $i$  –тої дії в сценарії  $l = \overline{1, \nu}$ ;  $\nu$  – кількість «кращих» сценаріїв, відібраних за (39);  $F_l$  – значення зведеного критерію оптимальності  $l$  –того сценарію за (39).

Послідовність рекомендацій щодо дій оператора виводиться на інтерфейс користувача робочого місця оператора. Протокол ведення плавки і її результати зберігаються в БД «Плавки».

Запропонований підхід до самонавчання рекомендаційної підсистеми оператора конвертера в процесі рафінації сталі був реалізований на одному з підприємств Дніпропетровщини. Отримані в результаті експериментів результати свідчать про те, що використання запропонованої підсистеми дозволяє уникнути випадків отримання сталі, яка не відповідає заданій марці за хімічним складом; зменшити відсоток плавки з порушенням основності в середньому на 42%, плавки з перевищенням температури – на 79%; зменшити середні витрати охолоджувача на 6%, а середню витрату кисню – на 4%; зменшити кількість додувок в 2,88 рази, а середній час плавки – на 19%.

Однією із задач прийняття управлінських рішень у багатоетапному прокатному виробництві є **задача оптимізації кількості феросплавів**, що використовуються в ході розкислення сталі. В складі запропонованої СППР багатоетапного виробництва прокату пропонується вирішувати цю задачу шляхом застосування системи самонавчання на основі «наївної» нейронної мережу Байеса. Вхідними для даної задачі є показники хімічного складу сталі та феросплавів  $x_k$  (загалом 14), а цільовими керованими змінними є кількості феросплавів, доступних до використання  $z_m$  (феросиліцій, феромарганець, силікомарганець).

База знань для розробленої ІС ППР формується за наявною базою даних і представляється за допомогою продукційної моделі представлення знань, тобто системи правил «**якщо... то...**». Для виділення правил вхідні та цільові змінні дискретизовані: для вхідних змінних були визначені від 3 до 6 вербальних термів, для цільових змінних – від 3 до 5 термів.

Оскільки змінні  $z_m$  залежать від вхідних параметрів та водночас взаємозалежні, кожному сполученню їх лінгвістичних значень поставлено у відповідність певний клас.

Для усіх отриманих класів визначається їх ймовірність:

$$P(x_k = c_{kh} | z = c_r) = \frac{P(x_k = c_{kh} | z = c_r)}{P(z = c_r)}, \quad (41)$$

що дорівнює відношенню кількості об'єктів у навчальній виборці, для яких  $x_k = c_{kh}$  та  $z = c_r$ , до кількості об'єктів, для яких  $z = c_r$ .

Таким чином отримуємо систему правил вигляду

$$\text{Якщо } x_k = c_{kh}, \text{ то } z = c_r \quad (42)$$

де ймовірність застосовності кожного правила визначається за (41).

Отримана база знань містить усі можливі поєднання значень вхідних змінних (термів) й усіх ідентифікованих класів використання розкислювачів. Належність поточного прикладу до певного класу розраховується за виразом:

$$\mu(c_r) = \frac{P(z=c_r) \cdot \prod_{k=1}^n P(x_k=c_{k,h})}{\sum_{r=1}^q [P(z=c_r) \cdot \prod_{k=1}^n P(x_k=c_{k,h})]} \quad (43)$$

де  $r = 1, \dots, q$ ,  $q$  – кількість вихідних класів;  $P(z = c_r)$  – апіорні ймовірності класів;  $P(x_k = c_{kh})$  – апіорні ймовірності термів для вхідних змінних.

Комплексні правила виведення мають вигляд:

$$R_c: x_1 = c_{1,h} \dots \wedge x_k = c_{k,h}, \rightarrow z = c_r \quad (44)$$

для усіх  $q$  класів. Загальна кількість правил виду (44), що з достовірністю  $P_{\Sigma} = 1$  описують зазначену предметну область розглянутого набору даних на одному з підприємств – 1589. При збільшенні кількості марок сталі, що виплавляються в однакових умовах, ця кількість може зростати до 7-9 тисяч.

Дефазифікація нечітких розв'язків у чіткі виконується за формулою

$$z_m = \sum_{r=1}^q \mu(c_r) \cdot c_{m,r}, \quad m = \overline{1,3} \quad (45)$$

де  $c_{m,r}$  – центральне значення терму, що позначає необхідну масу  $m$ -того феросплаву.

Викладений метод самонавчання підсистеми оптимізації процесу розкислення сталі пройшов експериментальну перевірку якості навчання на реальних даних. Було експериментально з'ясовано, що метод забезпечує точніше прогнозування у порівнянні з традиційним (дерево рішень), помилка прогнозування не перевищує 10%, що близько до інструментальної помилки системи автоматичного регулювання подачі феросплавів. Додатково було проведено дослідження чутливості похибки апроксимації розроблених ІС ППР до зміщення центрального значення термів вихідних змінних з метою визначення меж економії феросплавів. В результаті дослідження встановлено, що при зміщенні центру термів наївної мережі Байєса на 10% досягається компромісний оптимум: при загальній економії феросплавів 0,398 кг/т похибка апроксимації СППР збільшується не більше ніж на 1%.

**Шостий розділ** присвячено експериментальній верифікації запропонованих моделей та методів, а також перевірці роботи інтегрованої СППР в процесах планування та керування багатоетапним виробництвом прокату при виконанні реальних замовлень.

В ході експериментальної перевірки роботи запропонованого методу оптимізації в складі СППР вирішувались задачі планування виконання замовлень, розподіл металу по зливках, шихтування та відновлення математичних залежностей на реальних даних. Аналізуючи результати експериментів можна відзначити:

1) запропонований метод оптимізації на основі моделювання ШС має високу точність і повторюваність результатів при розв'язанні широкого кола практичних задач. З ймовірністю більше 0,885 він знаходить найкраще рішення з помилкою до 1,7%;

2) для комбінаторних задач пропонується метод знаходить такі ж рішення, що й методи-конкуренти, але має вищу повторюваність (не менше 94%);

3) для пошуку рішення в дійсному просторі запропонований метод забезпечує якість рішень, вищу ніж у методів-конкурентів в середньому в 1,33 – 1,56 рази, а повторюваність – у 2,6 - 3,0 рази.

Експериментальна перевірка математичної моделі оптимального розподілу металу по зливках з урахуванням паралельного виконання замовлень та налаштувань обладнання в наступних операціях була перевірена на типових добових та тижневих замовленнях на прокатну продукцію. Запропонована модель розподілу металу по виливницях, в складі інтегрованої СППР в процесах планування та керування металургійним виробництвом, дозволяє використовувати меншу кількість металу на виконання добового замовлення за рахунок керування висотою розливу в середньому на 1,8%.

Двоетапна модель прогнозування стійкості футеровки конвертера в якості модуля «Футеровка» була включена до складу СППР керування виробництвом прокату, та експериментально перевірена на 11 футеровках, що були встановлені на двох різних конвертерах і відпрацювали 23046 плавов за 653 дні.

Результати дослідження показали, що в 8 випадках з 11 футеровка пропрацювала довше, ніж апріорний прогноз, отриманий за статистичними даними. В середньому футеровки з рекомендаційною системою працюють на 4,25% часу довше.

Графік на рис.9, що ілюструє залежність відхилення прогнозу рекомендаційної підсистеми, від часу роботи футеровки у відносних одиницях. Помітно, що коли футеровка вже відпрацювала половину свого терміну експлуатації, прогнозне значення її стійкості з врахуванням порад, відрізняється від фактичного не більше ніж на 5%. Отриманий висновок дозволяє на практиці з точністю 3-5% запланувати час зупинки конвертера на заміну футеровки ще на половині прогнозованого часу її експлуатації.

У додатках наведено список опублікованих праць за темою дисертації та акти впровадження результатів дисертаційних досліджень.



Рис. 9. Відносне відхилення прогнозованого значення від фактичного залежно від часу експлуатації футеровки

## ВИСНОВКИ

Запропонована робота є завершеним науковим дослідженням, в якому вирішена актуальна наукова проблема обґрунтування принципів та розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

Встановлено, що:

1. План виконання замовлень на виготовлення сортового прокату широкого сортаменту синтезується (в рамках вирішення незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці) на основі згортки критеріїв максимізації частки вчасно виконаних замовлень та мінімізації обсягів незавершеного виробництва, часу неробочого стану обладнання та кількості відхиленних замовлень, що дозволяє виконувати тижневі та місячні замовлення за мінімальний час.

2. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросингвера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

3. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції.

Основні наукові та практичні результати наведеної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв, як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші, ніж отримані за традиційною методикою.

2. Розроблено математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки та вимоги до розкроювання готової продукції. Застосування розробленої моделі в багатоетапному металургійному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу та загальний обсяг обрізків.

3. Розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори

кросинговера, мутації та стиснення популяції та обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів. Його застосування для задач планування та керування в багатоетапних металургійних виробництвах дозволяє підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

4. Розроблено метод відновлення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного поліному. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

5. Набув подальшого розвитку метод прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на основі навчання. Його застосування дозволило будувати прогнозуючі моделі стійкості футеровки та надавати оператору поради щодо збільшення ресурсу в режимі реального часу.

6. Сформульовано принцип роботи системи підтримки прийняття рішень багатоетапного виробництва сортового прокату при вирішенні задач планування та керування, оснований на паралельній обробці замовлення на різних етапах. Це дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

7. Отримали подальший розвиток методи навчання рекомендаційних підсистем оператора конвертерного виробництва, оснований на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини. Застосування цих методів в процесах рафінації та розкислення сталі дозволило суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та скоротити використання феросплавів.

8. Удосконалено математичну модель задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально-теплого балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Застосування отриманої моделі дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України*

1. Желдак Т.А., Зіборов І.К. Структура та функції інтегрованої СППР у процесах керування багатоетапним прокатним виробництвом”, Сучасні інформаційні технології, vol.1, pp. 49–56, 2023.

2. Желдак, Т., Зіборов, І. Самонавчання підсистеми оператора конвертеравпроцесірафінаціїсталівскладіСППРкеруванняметалургійнимвиробн

ИЦТВОМ.

Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security, 2022, 2, 32–40. Doi: <https://doi.org/10.32782/IT/2022-2-4>.

3. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень про використання металу в багатоетапному прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна, Д.М. Гаранжа, Д.О. Сердюк // System technologies. N6 (137). Dnipro, 2021. – р. 85-98.

4. І.К. Зіборов, Т.А. Желдак Розробка інтелектуальної систем підтримки прийняття рішень з самонавчанням для керування технологічними процесами виробництва сталі / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // System technologies. N3 (140). Dnipro, 2022. – р. 35-46.

5. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають стійкість футеровки конвертера та побудова прогнозуючої моделі / Т.А. Желдак, Н.А. Антоненко // System technologies. N 6 (131). - Dnipro, 2020. – р. 73-91. DOI: 10.34185/1562-9945-6-131-2020-08

6. Желдак Т.А. Застосування методів формування знань в складі інтелектуальної СППР оптимізації процесу розкислення сталі в конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, В.В. Слесарев, Д.О. Воловенко // System technologies. N3 (86). - Dnipropetrovsk, 2013. - р. 29 – 39.

7. Слесарев В.В. Інтегровані системи керування багатоетапним металургійним виробництвом на прикладі прокатки труб / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // System technologies. – N 4.(74), Dnipropetrovsk, 2011. — р. 77–84.

8. Желдак Т.А. Використання систем самонавчання для ідентифікації марки сталі в киснево-конвертерному виробництві / Т.А. Желдак, Н.А. Кучеренко // Науковий вісник НГУ – Д.: Національний гірничий університет. – 2011. - №1. – с. 94-98.

9. Гаранжа Д.М. Факторний аналіз впливу технологічних параметрів процесу гарячої прокатки на довжину розкату і побудова прогнозуючої моделі [Текст] / Гаранжа Д.М., Желдак Т.А., Краєв М.В. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2011. – №1 – С. 44–49.

10. Желдак Т.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Т.А. Желдак, Д.А. Воловенко // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2011. - №5 – с. 133–136.

11. Желдак Т.А. Системний аналіз факторів, що визначають мірність сортового прокату та шляхи мінімізації немірної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Науковий вісник НГУ, №8. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – с. 73-77.

12. Желдак Т.А. Оптимальне одновимірне розкромлювання матеріалу у прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. — 2009. — N 4. — С. 43-46.

13. Нестеров М.Е. Повышение эффективности устаревшего производства с помощью современных самообучающихся систем поддержки принятия решений на примере кислородно-конвертерного цеха ДМЗ им. Петровского / М.Е. Нестеров, Т.А. Желдак // Збірник наукових праць НГУ – Д.: НГУ. – 2010. - №34,

т. 2. – с. 202-207.

14. Слесарев В.В. Оптимізація розкроявання продукції прокатного виробництва з використанням методу пошуку із заборонами / Слесарев В.В., Желдак Т.А., Гаранжа Д.М., Станіна О.Д. // Збірник наукових праць НГУ. – 2010. - № 35, т.2 – с. 41-50.

15. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об'єктів та систем / Т.А. Желдак // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2012. — № 3. — С. 95–106.

16. Желдак Т.А. Застосування методу моделювання колонії мурах до розв'язання комбінаторних задач планування виконання замовлень металургійними підприємствами / Математичні машини і системи. – 2013. – № 4. – С. 95 – 106.

#### *Статті в міжнародних виданнях*

17. Слесарев В.В. Математична модель матеріально-теплового балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / В.В. Слесарев, Т.А. Желдак // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2013. - №1 – с. 97–102. (*Scopus*)

18. Zheldak T. A. The algorithm of artificial immune system simulation with Saaty selection operator and one-dimensional local search / T. A. Zheldak, V. V. Slesarev, I. G. Gulina // Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk, 2016, 5: 149–156. (*Scopus*)

19. Hnatushenko, V. V. Mathematical Model Of Steel Consumption Minimization Considering The Two-Stage Billets Cutting / V. V. Hnatushenko, T. A. Zheldak, L. S. Koriashkina // Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk, 2021, 2: 118-124. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-2/118> (*Scopus*)

20. Avramenko S.E. Guided hybrid genetic algorithm for solving global optimization problems / S.E. Avramenko, T.A. Zheldak, L.S. Koriashkina // Radio Electronics, Computer Science, Control. 2021, 2.: 174-188. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-18> (*WoS*)

21. Slesaryev, V.V. Using of the Tabu search method in optimization the rolled stock layout / V.V. Slesaryev, T.A. Zheldak, D.M. Garanzha and O.D. Stanina // Scientific Reports on Resource Issues. Vol. 2, 2012: Rock Strength, Rock Fragmentation and Effective Use of Energy Potential of Geotechnical Systems. – TU Bergacademie Freiberg. – p. 87-99.

22. Zheldak, T.A. Knowledge-Based Intellectual DSS of Steel Deoxidation in BOF Production Process. / T.A. Zheldak, V.V. Slesarev, and D.O. Volovenko // American Journal of Mining and Metallurgy 1.1 (2013): 7-10. DOI:10.12691/ajmm-1-1-2

23. Zheldak, T.A., and Redko V.. "Using an Evolutionary Heuristics for Solving the Outdoor Advertising Optimization Problem." Journal of Computer Sciences and Applications 2.2 (2014): 23-30. DOI: 10.12691/jcsa-2-2-2

*Публікації, які підтверджують апробацію результатів дослідження*

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

25. Желдак Т.А. Проблема оптимального одновимірного розкроювання матеріалу у прокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Автоматика – 2008: Тези доповідей XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23 – 26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА. – с. 769 – 771.

26. Воловенко Д.О. Факторний аналіз процесу виготовлення товарної продукції в умовах прокатного цеху №1 ДМЗ ім. Петровського / Д.О. Воловенко, Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2009. – с. 307.

27. Шев’яков В.О. Програмна підтримка прийняття рішень при виборі маршруту прокатки безшовних труб в умовах «НТЗ–Інтерпайп» / В.О. Шев’яков, Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф., Київ, 26-30 травня 2009 р. – К.: НТУУ “КПІ”, 2009. – с. 376.

28. Желдак Т.А. Система підтримки прийняття рішень планування виробництва та контролю перебігу технологічного процесу [Текст] / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // 17-та Міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика-2010”. Тези доповідей. Т. 1. – Харків: ХНУРЕ, 2010. – с. 212-214.

29. Желдак Т.А. Застосування зворотних залежностей у математичних моделях складних об’єктів та систем / Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали 13-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011, Київ, 23-28 травня 2011 р. – К.: НК “ПСА” НТУУ “КПІ”, 2011. – с. 244.

30. Желдак Т.А. Системный анализ процесса горячей прокатки бесшовных труб с оптимизацией системы обработки заказов / Т.А. Желдак // Тезисы докл. Междун. науч.-техн. конф. «Информационные технологии и информационная безопасность в науке, технике и образовании "ИНФОТЕХ-2011"». Севастополь, 5-10 сентября 2011 г. – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – с. 133-134.

31. Воловенко Д.А. Подходы к построению интеллектуальной системы, управляющей кислородным конвертером / Д.А. Воловенко, Т.А. Желдак // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Севастополь, 5-9 вересня 2011 р. – Севастополь: СевНТУ. – 2011. – с. 225-227.

32. Желдак Т.А. Про вдосконалення однієї еволюційної стратегії дійсночисельної оптимізації / Т.А. Желдак // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2011): тези доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції, 23-25 листопада 2011 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2011. – с. 82-83.

33. Желдак Т.А. Автоматизована система регулювання висоти наливу злитків при сортопрокатному виробництві / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали III Міжнар.

наук.-практ. конф., Запоріжжя, 14-16 березня 2012 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2012. – с. 107-109.

34. Гаранжа Д.М. Розв'язання задачі одновимірного розкроювання за допомогою метаевристичних алгоритмів // Д.М. Гаранжа, Т.А. Желдак // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САГУ-2012): матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 14-16 березня 2012 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2012. – с. 63-65.

35. Желдак Т.А. Математична модель матеріально-теплого балансу плавки в кисневому конвертері та критерій її оптимізації / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Інформаційні технології в освіті, науці й техніці (ІТОНТ-2012): матеріали міжнар. наук.-практ. конф.: Черкаси, 25-27 квітня 2012 р. – Черкаси: ЧДТУ. – 2012. – т.1. – с. 23-24.

36. Желдак Т.А. Застосування технології OLAP для ідентифікації параметрів складних технічних систем при багатоетапному виробництві / Т.А. Желдак // VI міжнародна школа-семінар - "Теорія прийняття рішень", Ужгород, 1-6 жовтня 2012 р. – Ужгород: "Інвізор", 2012 – 118с.

37. Желдак Т.А. Застосування методу оптимізації на основі моделювання переміщення бактерій та його модифікацій / Т.А. Желдак, Д.О. Воловенко // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САГУ-2013): матеріали IV Міжнар. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 13-16 березня 2013 р. – Запоріжжя: КПУ. – 2013. – с. 105-107.

38. Желдак Т.А. Планування виконання замовлень металургійними підприємствами на основі розв'язків комбінаторних задач / Т.А. Желдак // Мат. IV Всеукр. наук.-практ. конф. "Інформатика та системні науки" ІСН – 2013. Полтава, 21–23 березня 2013 р. – Полтава: «Видавництво». – 2013. – с. 125 – 128.

39. Желдак Т.А. Метод моделювання штучної імунної системи в задачах оптимізації мультимодальних функцій / Т.А. Желдак // Обчислювальний інтелект (результати, проблеми, перспективи): Матеріали 2-ї міжнар. наук.-техн. конф. 14-17 травня 2013 р. – Черкаси: Маклаут, 2013. – с. 33-36.

40. Желдак Т.А. Використання модифікованого методу моделювання штучних імунних систем для вирішення комбінаторних оптимізаційних задач / Т.А. Желдак // Системний аналіз та інформаційні технології: Матеріали 15-ї міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2013, Київ, 27-31 травня 2013 р. – К.: ННК "ІПСА" НТУУ "КПІ", 2013. – с. 271-272.

41. Желдак Т.А. Адаптація алгоритму моделювання штучної імунної системи з селективним оператором Сааті та обмеженим локальним пошуком / Т.А. Желдак // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (MPZIS-2013): тези доповідей XI Міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 листопада 2013 р. – Дніпропетровськ: ДНУ, 2013. – с. 80-81.

42. Желдак Т.А. Використання технології OLAP для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – с. 105-106.

43. Желдак Т.А. Експертна система статистичного контролю механічних властивостей прокатної продукції / Т.А. Желдак, Д.М. Гаранжа // Праці VII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ,

2014. – с. 107-108.

44. Антоненко Н.А. Використання штучної нейронної мережі для прогнозування стійкості футеровки конвертера [текст] / Н.А. Антоненко Н.А., Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 30-31.

45. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі прогнозування стійкості футеровки конвертера з урахуванням мультиколінеарності [текст] / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Праці VIII міжнародної школи-семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2016. – с. 124-125.

46. Антоненко Н.А. Використання методу групового врахування аргументів для прогнозування стійкості футеровки конвертера / Н.А. Антоненко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 193-194.

47. Зінченко О.В. Побудова регресійної моделі стійкості футеровки кисневого конвертера / О.В. Зінченко, Т.А. Желдак // Матеріали міжнар. конф. «Комп'ютерний інтелект (результати, проблеми і перспективи)». – Київ, КНУ, 2017. – с. 232-233.

48. Желдак Т.А. Статистичні підходи до прогнозування стійкості футеровки конвертера / Т.А. Желдак., Н.А. Антоненко // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – с. 149-151.

49. Желдак Т.А. Оптимізація двоетапного виробництва металопрокату шляхом формування зливків / Т.А. Желдак, Л.С. Коряшкіна // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем. СМОС-2020: тези доповідей 6-ї міжн. наук.-техн. конф. – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ. 2020. – с. 80-81. doi:10.32434/СМОС-2020

50. Желдак Т.А. Керування параметрами оптимізаційного алгоритму на основі моделювання штучної імунної системи / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2021: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – с. 136-140. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.045>

51. Зіборов І.К. Адаптивний оператор стиснення популяції як запорука успішності еволюційних пошукових алгоритмів / І.К. Зіборов, Т.А. Желдак // «Наукова весна» 2022: мат. XII Всеукр. наук.-техн. конф., Дніпро, 23–24 травня 2022 року – Дніпро : НТУ «ДП», 2022 – с 161-162.

52. Желдак Т.А. Алгоритм роботи підсистеми розкרוювання заготовок СППР керування багатоетапним прокатним виробництвом / Т.А. Желдак, І.К. Зіборов // Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2023: тези доповідей міжн. наук.-практ. конф. – Дніпро: УДУНТ, 2023. – с. 294 – 297. DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.079

## АНОТАЦІЯ

**Желдак Т.А. Інтегрована система підтримки прийняття рішень при керуванні виробництвом прокату на основі дворівневих техніко-економічних моделей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування. – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка». Україна. Дніпро. 2025.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної науково-технічної проблеми обґрунтування принципів та розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату шляхом розробки комплексу математичних моделей цих процесів, методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень з використанням узагальнених економічних критеріїв.

Метою роботи є підвищення ефективності багатоетапного виробництва прокату шляхом розробки та удосконалення математичних моделей процесів планування та керування, а також розробки обчислювального методу для розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації при плануванні й керуванні цими процесами в складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Об'єкт дослідження – процеси прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату.

Предмет дослідження – математичні моделі процесів прогнозування, керування та прийняття рішень в багатоетапному виробництві сортового прокату, а також обчислювальний метод оптимізації цих процесів у складі інтегрованої системи підтримки прийняття рішень.

Основні наукові положення, що виносяться на захист:

1. План виконання замовлень на виготовлення сортового прокату широкого сортаменту синтезується (в рамках вирішення незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці) на основі згортки критеріїв максимізації частки вчасно виконаних замовлень та мінімізації обсягів незавершеного виробництва, часу неробочого стану обладнання та кількості відхилених замовлень, що дозволяє виконувати тижневі та місячні замовлення за мінімальний час.

2. Запропонований гібридний метод оптимізації на базі штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросингвера, мутації та стиснення популяції, забезпечує знаходження глобального оптимуму багатовимірних задач умовної оптимізації з вищою ймовірністю, ніж у відомих еволюційних алгоритмів, що підвищує ефективність розв'язання цих задач в процесах планування та керування у виробництві прокату.

3. Використання в регресійних моделях механічних характеристик сортового прокату від'ємних ступенів предикторів та штрафу на розмірність поліному забезпечує підвищення точності моделі з одночасним зменшенням кількості її параметрів, що дозволяє замінити безпосередні вимірювання статистичними прогнозами та скоротити час і вартість сертифікації готової продукції.

Наукові результати, які визначають новизну дисертаційної роботи полягають у наступному:

1. Розроблено математичну модель побудови плану виконання замовлень на виготовлення прокату широкого сортаменту з урахуванням часу переналаштування обладнання, що передбачає одночасне зважене врахування критеріїв, як незамкненої задачі комівояжера у максимальній метриці. Застосування такої моделі дозволило будувати в реальному масштабі часу плани, ефективніші, ніж отримані за традиційною методикою.

2. Розроблено математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, що спирається на наперед відомий оптимальний розмір передільної заготовки та вимоги до розкроювання готової продукції. Застосування розробленої моделі в багатоетапному металургійному виробництві дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу та загальний обсяг обрізків.

3. Розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросинговера, мутації та стиснення популяції та обґрунтовані методи адаптації згаданих операторів. Його застосування для задач планування та керування в багатоетапних металургійних виробництвах дозволяє підвищити надійність та точність отриманих розв'язків.

4. Розроблено метод визначення математичних залежностей прогнозуючих моделей металургійних виробництв від хімічних та фізичних параметрів отримання сталі за рахунок використання в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосування штрафу на розмірність апроксимаційного поліному. Це дозволило підвищити відповідність моделей сутності фізичних процесів, та отримати прогностичні моделі оптимальної складності шляхом самоорганізації.

5. Набув подальшого розвитку метод прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на основі навчання. Його застосування дозволило будувати прогнозуючі моделі стійкості футеровки та надавати оператору поради щодо збільшення ресурсу в режимі реального часу.

6. Сформульовано принцип роботи системи підтримки прийняття рішень багатоетапного виробництва сортового прокату при вирішенні задач планування та керування, оснований на паралельній обробці замовлення на різних етапах. Це дозволило підвищити загальну ефективність виробництва за рахунок зменшення витратного коефіцієнту металу, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

7. Отримали подальший розвиток методи навчання рекомендаційних підсистеми оператора конвертерного виробництва, оснований на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини. Застосування цих методів в процесах рафінації та розкислення сталі дозволило суттєво зменшити вплив «людського фактору» на ведення плавки та скоротити використання феросплавів.

8. Удосконалено математичну модель задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально–теплого балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями. Застосування отриманої моделі дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими.

Практичне значення одержаних результатів полягає у тому, що розроблені у дисертаційному дослідженні принципи, моделі і методи доведені до практичної реалізації у вигляді прототипу інтегрованої системи підтримки прийняття рішень у виробництві сортового прокату та можуть використовуватись для підтримки прийняття рішень в управлінні технологічними процесами таких виробництв. Результати теоретичного дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано у виробничому процесі ряду підприємств Дніпропетровщини, а також в навчальному процесі на факультеті інформаційних технологій НТУ «Дніпровська політехніка» .

**Ключові слова:** прогнозування, керування, виробництво прокату, СППР, ретроспективне навчання, інтегрована система, критерій, оптимальність, регресійні моделі, параметричні методи, багатокритеріальність, математичні моделі, умовна оптимізація, еволюційний метод, адаптивний алгоритм, штучні імунні системи, техніко-економічні моделі.

## ABSTRACT

**Zheldak T.A. Integrated decision support system for managing rolled steel production based on two-level technical and economic models. – Qualification: scientific work in the form of a manuscript.**

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.07 – Automation of control processes. – National Technical University “Dnipro Polytechnic”. Ukraine. Dnipro. 2025.

The dissertation is devoted to solving the current scientific and technical problem of substantiating the principles and developing methods and means of creating integrated information and analytical decision support systems in the tasks of forecasting and controlling the processes of multi-stage production of rolled steel by developing a complex of mathematical models of these processes, self-learning methods, and optimizing order fulfillment using generalized economic criteria.

Most metallurgical productions operate according to a technological cycle consisting of several operations, separated in time, space, and by performers. Rolled steel production involves many sequential operations; optimal decisions made at the level of a single technological process operation do not ensure the achievement of maximum overall production efficiency. As a result, the main factors that need improvement are indicators of working time use, equipment utilization, and the speed of turnover of funds invested in production. All the above factors are economic, whereas, when optimizing the operation of production systems, they are usually focused on performance indicators such as execution time, material and energy consumption, number of operations performed, etc. In practice, economic and

technological criteria are not only related to each other but often contradict each other.

The purpose of the work is to increase the efficiency of multi-stage rolled steel production by developing and improving mathematical models for planning and control processes, and by creating a computational method for solving multi-criteria optimization problems when planning and controlling these processes within an integrated decision support system.

The object of the study is the processes of forecasting, control, and decision-making in multi-stage rolled steel production.

The study examines mathematical models for forecasting, control, and decision-making in multi-stage rolled steel production, along with a computational method for optimizing these processes within an integrated decision support system.

The order fulfillment plan for the production of wide-range rolled products is synthesized (within the framework of solving the open-ended traveling salesperson problem in the maximum metric) based on the convolution of criteria for maximizing the share of orders completed on time and minimizing the volume of unfinished production, equipment downtime and the number of rejected orders, which allows fulfilling weekly and monthly orders in the minimum time.

The proposed hybrid optimization method based on artificial immune systems, which uses adaptive crossover, mutation, and population compression operators, provides a higher probability of finding the global optimum of multidimensional conditional optimization problems than known evolutionary algorithms, which increases the efficiency of solving these problems in the planning and control processes in rolled products production.

The use of negative degrees of predictors and a penalty for the dimension of the polynomial in regression models of mechanical characteristics of long-rolled products provides an increase in the accuracy of the model with a simultaneous reduction in the number of its parameters, which allows replacing direct measurements with statistical forecasts and reducing the time and cost of certification of finished products.

The scientific results that determine the novelty of the thesis are as follows:

1. A mathematical model for building a plan for fulfilling orders for the manufacture of wide-range rolled products has been developed, considering the time of equipment reconfiguration, which involves simultaneously weighted consideration of criteria as an open-ended traveling salesperson problem in the maximum metric. The use of such a model enabled the creation of building plans in real time that are more effective than those produced by the traditional method.

2. A mathematical model for minimizing the amount of metal used to manufacture a particular order has been developed, which is based on the optimal size of the reworked workpiece, and the requirements for cutting the finished product are known in advance. The use of the developed model in multi-stage metallurgical production allows for reducing the metal consumption coefficient and the total volume of scrap.

3. A hybrid adaptive optimization method based on modeling artificial immune systems has been developed, which uses adaptive operators of crossover, mutation, and population compression and substantiated methods for adapting the operators. Its application to planning and control problems in multi-stage metallurgical production

increases the reliability and accuracy of the solutions obtained.

4. A method has been developed for determining the mathematical dependencies of predictive models of metallurgical production on the chemical and physical parameters of steel production by using negative degrees of predictors in regression models and applying a penalty on the dimension of the approximation polynomial. This allowed for greater correspondence between models and the essence of physical processes and for the emergence of predictive models of optimal complexity through self-organization.

5. The method of predicting the lining stability of a steelmaking unit based on technical parameters and statistical indicators of smelting with a two-stage classification of the current process based on training has been further developed. Its application has enabled the development of predictive models of lining stability and provided the operator with real-time advice on increasing the resource.

6. The principle of operation of the decision support system for multi-stage production of long-rolled products when solving planning and control problems has been formulated, based on parallel processing of orders at different stages. This has increased the overall production efficiency by reducing metal consumption, unmeasured products, and work in progress.

7. The methods of training the recommended subsystem of the converter production operator has been further developed, based on the analysis of previous activities, using templates of successful prior experience with correction for human behavior. The use of these methods in the refining and deoxidation processes of steel has significantly reduced the influence of the "human factor" on the smelting process and reduced the need for ferroalloys.

8. The mathematical model of the converter smelting optimization problem according to the combined economic criterion, considering the material and heat balance as a multi-criteria problem with fuzzy constraints, has been improved. The application of the resulting model allows maintaining steel costs at a minimum during fluctuations in material prices, significant changes in cast iron properties, or when replacing some coolers with others.

The practical significance of the results obtained is that the principles, models, and methods developed in the dissertation research have been brought to practical implementation in the form of a prototype of an integrated decision support system in the production of long-rolled products and can be used to support decision-making in the management of technological processes of such productions. The results of theoretical research, conclusions and recommendations contained in the dissertation work were used in the production process of several enterprises in the Dnipropetrovsk region, as well as in the educational process at the Faculty of Information Technologies of the Dnipro University of Technology.

**Keywords:** forecasting, control, rolled steel production, DSS, retrospective learning, integrated system, criterion, optimality, regression models, parametric methods, multi-criteria, mathematical models, conditional optimization, evolutionary process, adaptive algorithm, artificial immune systems, technical and economic models.