

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Желдака Тімура Анатолійовича на тему:

«Інтегрована система підтримки прийняття рішень при керуванні виробництвом прокату на основі дворівневих техніко-економічних моделей»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів виробництва

Відгук складено на основі вивчення дисертаційної роботи та її реферату, а також опублікованих здобувачем результатів досліджень та матеріалів, що свідчать про реалізацію та впровадження результатів досліджень.

1. Обґрунтування актуальності обраної теми досліджень та зв'язок з науковими програмами, планами і темами

Актуальність розв'язання задачі, висвітленої в дисертаційній роботі, обумовлена значними економічними втратами вітчизняних підприємств в умовах складних виробничих процесів, спричиненими військовим станом і ослабленням потужностей. Автор показав, що прийняття рішень на всіх виробничих ділянках відбувається в умовах значної невизначеності, часто за браком часу та неповної інформації. Це зумовлено низкою випадковостей, які неможливо передбачити, включаючи природні та технічні збурення, а також «людський фактор». Наявні автоматизовані й автоматичні системи планування та керування, зокрема у прокатному виробництві, обмежуються автоматизованим керуванням окремих операцій або технологічних ланок, використовують технологічні критерії прийняття рішень та не враховують економічні аспекти виготовлення готової продукції загалом.

Автор провів детальний контекстний аналіз аби висвітлити релевантність мети та вирішуваних у роботі задач, а саме: 1) проблеми інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень у складних виробничих процесах в домені прокатного виробництва; 2) наявних інформаційних технологій супроводу та підтримки рішень у складних виробничих процесах; 3) існуючих методів умовної та безумовної оптимізації у дійсному та двійковому просторі. В дисертації якісно опрацьований існуючий науковий фундамент сучасників міжнародного масштабу.

Таким чином, з огляду на сучасні виклики в металургійній галузі, зокрема при виробництві прокату, актуальною науковою проблемою є 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.

Запропонований підхід здатен стати основою для комплексної методології побудови інтегрованих багаторівневих систем підтримки прийняття рішень у багатоетапному металургійному виробництві із застосуванням комплексу математичних моделей і методів самонавчання та оптимізації виконання замовлень за зведеними економічними критеріями ефективності.

Дисертаційна робота виконана відповідно до держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України за період 2008- 2025 рр.: № 0108U000538 «Інтелектуальні комп'ютерні технології обробки даних, прогнозування та управління», № 0113U000402 «Розробка методів синтезу моделей корисних енергетичних, акустичних та вібраційних сигналів для ідентифікації процесів гірничого виробництва», № 0113U003913 «Рішення задачі генерації проєктів оперативних планів бойових дій при ліквідації пожеж на шахтах на основі онтологічних баз знань», № 0116U006739 «Розробка автоматизованої розпушувальної установки для розвантаження зсипних змерзлих вантажів», №0121U109788 «Задачі моделювання, оптимізації та прийняття рішень в складних системах різної природи» та №0123U100011 «Задачі аналізу, моделювання та оптимізації технологічних процесів у складних системах різної природи», у яких автор був керівником або співвиконавцем.

Дисертаційна робота відповідає Концепції сталого розвитку чорної металургії України і є елементом забезпечення її науково-практичної реалізації.

2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна

Наукові положення, а також теоретичні й прикладні результати, викладені у дисертації, є змістовними та обґрунтованими, що підтверджується комплексним аналізом, систематизацією й узагальненням результатів досліджень, виконаних у контексті завдань щодо автоматизації процесів керування технологічним процесом виробництва прокатної продукції у відповідності до замовлень на неї.

Наукові положення, що захищаються у дисертації:

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 отриманих результатів чітко й коректно сформульована, має належне обґрунтування та полягає, зокрема, у наступному:

Вперше:

- 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.

- 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.

- розроблено гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучних імунних систем, який використовує адаптивні оператори кросингвера, 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.

- 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.

- сформульований 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.

Отримали подальший розвиток:

- 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.

- 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.

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.

3. Практичне значення отриманих результатів досліджень

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 впроваджено у виробничу практику ТОВ «Інтерпайп Україна», ІП «Сайткор Україна», ТОВ «Ялантіс Україна», АТ «Нікопольський завод феросплавів», ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб». Водночас результати дисертаційного дослідження використано в навчальному процесі на факультеті інформаційних технологій НТУ «Дніпровська політехніка» при підготовці здобувачів спеціальності «124 Системний аналіз».

4. Оцінка змісту роботи та повнота викладу положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях

Дисертаційна робота складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел з 272 найменувань, 2 додатків на 8 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 290 сторінок, з них 45 рисунків, 41 таблиця.

Дисертаційна робота характеризується логічною структурою, а її текст викладено чітко, коректно та грамотно, із застосуванням фахової науково-технічної термінології.

У **вступі** дисертації обґрунтовано актуальність обраної тематики, висвітлено зв'язок дослідження з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету, ідею й завдання роботи, окреслено об'єкт, предмет і методи дослідження. Також представлено основні наукові положення, розкрито наукову новизну й практичну значущість отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, охарактеризовано апробацію результатів та структуру дисертації.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу проблеми інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень у виробництві сортового прокату. Металургійне підприємство розглянуто як складна система, визначені її вхідні та вихідні потоки, обмеження та засоби підвищення ефективності. Введені критерії ефективності технологічного та економічного рівня. Автором виділено ключові задачі інформаційно-аналітичного супроводу процесів прийняття рішень, визначено тип даних задач та шляхи їх розв'язання в рамках загальної науково-технічної проблеми дослідження.

В розділі наведено класифікацію керуючих систем, що застосовуються в металургійному виробництві за рівнем прийняття рішень та 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 та обґрунтовано необхідність урахування часу переналаштування обладнання при переході від одного замовлення до іншого. Наголошено ефективність підходу на основі штучних імунних систем до розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації у дійсному та двійковому просторах та обґрунтована необхідність розробки для розв'язання багатокритеріальних задач умовної оптимізації в дійсному та двійковому просторах адаптивного еволюційного методу оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи людини.

У **другому розділі** дисертації запропоновані ряд математичних моделей, які описують виконання замовлень на прокатну продукцію металургійним підприємством, а також налаштування окремих його виробничих операцій на мінімізацію глобального економічного критерію роботи, яким обрано витратний коефіцієнт металу.

Зокрема, запропоновано математичну модель оптимізаційної задачі побудови плану виконання замовлень широкого асортименту з урахуванням часу переналаштування обладнання, характерну для металургійних підприємств. Альтернативами, що оцінюються за зведеним критерієм мінімуму сукупних додаткових втрат від виробничої діяльності є послідовності обслуговування замовлень. Також в даному розділі побудовано математичну модель мінімізації кількості металу, використаного для виготовлення певного замовлення, розмір якого не перевищує об'єм однієї плавки. Для випадків, коли в силу впливу людського фактору між розливкою сталі на зливки заданої ваги та отриманням прямокутної заготовки стаються технологічні порушення, розроблена додаткова модель мінімізації втрат в двоетапному прокатному виробництві, яка використовує прогнозоване значення довжини розкату і виконує її розкроювання з точки зору мінімуму витратного коефіцієнту металу.

У **третьому розділі** представлено ряд математичних моделей задач прогнозування властивостей готової продукції та робочого обладнання. Розроблена математична модель розв'язання задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально-теплого балансу як багатокритеріальної задачі з нечіткими обмеженнями, що передбачає підтримку собівартості сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими. Розроблено математичну модель відновлення залежностей керуючих функцій розкислення та стану об'єкта управління, що відрізняється використанням в регресійних моделях від'ємних ступенів предикторів та застосуванням штрафної функції на розмірність апроксимаційного поліному. Запропонована двоетапна математична модель, яка за технічними характеристиками футеровки та статистичними показниками ведення плавки операторами забезпечує статично значимий прогноз щодо залишку терміну роботи поточної футеровки, що дозволяє суттєво зменшити простір пошуку за рахунок формулювання для кластерів простих регресійних моделей з високою точністю прогнозування.

Четвертий розділ присвячений розробці та удосконаленню у відповідності до кола вирішуваних задач універсального еволюційного алгоритму розв'язання задач умовної та безумовної оптимізації в безкінечному та двійковому просторах на основі

моделювання штучної імунної системи. Автором запропоновано гібридний адаптивний імунний алгоритм оптимізації, що на відміну від відомих використовує оператор клональної селекції на основі методу парних порівнянь Сааті, адаптивний ймовірнісний кросинговер, адаптивні оператори мутації та стиснення популяції та обмежений локальний пошук. Для дослідження алгоритму було використано набір тестових функцій різної розмірності в безперервному та двійковому просторах. За рахунок запропонованих адаптивних операторів алгоритму суттєве зменшення кількості оцінок цільової функції та часу роботи при розв'язанні типових задач умовної та безумовної оптимізації. Практична цінність отриманих в розділі результатів полягає в тому, що отримано стійкий до початкових умов ефективний алгоритм розв'язання багатовимірних задач глобальної оптимізації, який може бути застосований, зокрема для вирішення завдань планування та контролю в металургійному виробництві для оптимізації технологічних процесів.

У **п'ятому розділі** дисертаційної роботи запропонована структура інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування виробництвом сортового прокату з конвертерним способом виготовлення сталі, яка містить сім окремих програмних модулів та шість баз даних. Структура системи враховує перелік процесів, що охоплює інтегрована СППР та наявні джерела даних, що використовуються для рішення задач відносно кожного з процесів. Розроблено методику та схему взаємодії модулів та баз даних підприємства, сформульовані вхідна та вихідна інформація для кожного з модулів. Кожен з виділених модулів системи передбачає, крім організації інтерфейсу вводу-виводу, розв'язання певної задачі, математичні постановки яких і підходи до вирішення описані в попередніх розділах. В розділі також визначено функції інтегрованої СППР в процесах керування прокатним виробництвом. Запропонована методика взаємодії інтегрованої системи підтримки прийняття рішень з виробничими системами оснований на принципі паралельної обробки замовлення підприємством на різних етапах багатоетапного виробництва.

Шостий розділ дисертаційної роботи висвітлює експериментальну перевірку запропонованих раніше математичних моделей технологічних процесів та алгоритмів роботи окремих підсистем СППР виробництва прокату. Також розділі виконано математичний аналіз отриманих числових результатів. Показана ефективність застосування математичної моделі планування виконання замовлень, яка з урахуванням переналаштувань обладнання дозволяє будувати плани, кращі ніж отримані за традиційною методикою. Водночас математична модель, що передбачає пошук такої маси металу в ковші і такого її розподілу на зливки, які б дозволяли на наступних операціях розкрюювати передільні заготовки і готову продукцію з останніх, мінімізуючи можливі обрізки і враховуючи поточний розмір замовлення на сортовий прокат, була застосована до виконання замовлень різного об'єму в склад СППР. Розроблена модель дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу за рахунок мінімізації немірної продукції та кількості обрізків на 2,4-2,5% при обробці великих замовлень та на 3-4% при виконанні малих замовлень.

Практична перевірка викладеного підходу до побудови апроксимуючої функції з використанням від'ємних степенів у поліномах апроксимаційної функції показала, що його застосування дозволяє будувати апроксимуючі моделі оптимальної

складності в реальному масштабі часу із заданою надійністю. Експериментально доведено, що запропонований гібридний адаптивний метод оптимізації на основі моделювання штучної імунної системи знаходить найкраще рішення з помилкою до 1,7% на широкому колі реальних задач з ймовірністю більше 0,885.

Зміст дисертаційної роботи відповідає її назві, а отримані наукові й практичні результати щодо побудови математичних моделей та алгоритмів роботи систем підтримки прийняття рішень в процесах керування та планування виробництва сортового прокату відповідають спеціальності 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Результати дисертаційної роботи опубліковано в 52 наукових працях, у тому числі: 4 статі у журналах, що індексуються наукометричними базами даних Scopus і Web of Science Core Collection, 19 статей в українських та міжнародних фахових виданнях, 1 публікація у матеріалах міжнародних конференцій, що індексуються наукометричними базами даних Scopus і WoS; 26 тез доповідей у матеріалах всеукраїнських і міжнародних конференцій. Кількість наукових праць здобувача, у яких опубліковано результати роботи відповідає встановленим вимогам МОН України.

5. Значення роботи для науки та практики та суспільства

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 метала, кількості немірної продукції та незавершеного виробництва.

Практичне значення одержаних результатів полягає у забезпеченні можливості врахування карт розкроювання у двох переділах та припустимість паралельного виконання кількох замовлень, що в свою чергу дозволяє зменшити витратний коефіцієнт металу, що є головним техніко-економічним показником ефективності виробництва прокату. Водночас розв'язання задачі оптимізації шихти дозволяє підтримувати собівартість сталі на мінімальному рівні при коливаннях цін на матеріали, значній зміні властивостей чавуну або ж при заміні одних охолоджувачів іншими. Разом з тим застосування викладеного підходу до синтезу і мінімізації моделей регресійних залежностей дозволило побудувати та використати у складі загальної інтегрованої СППР керування виробництвом прокату математичні моделі оптимальної складності для прогнозування механічних характеристик готової продукції та потреби у феросплавах.

Математична модель прогнозування терміну експлуатації футеровки конвертера використовується в якості складової автоматизованої інтелектуальної СППР металургійного виробництва, сповіщаючи оператора конвертерного цеху про ресурс поточної футеровки, а також надаючи поради щодо методів ведення плавки, які дозволяють збільшити її ресурс. Отриманий метод розв'язання багатовимірних

задач глобальної оптимізації застосовується для вирішення завдань планування, керування та контролю в металургійному виробництві. Запропоновані параметри операторів алгоритму дозволяють скоротити час оптимізації в 2-4 рази без втрати точності, що робить викладений алгоритм ефективним для вирішення оптимізаційних задач на обчислювальних платформах обмеженої потужності.

Запропонована структура автоматизованої СППР для керування виробництвом прокату з конвертерним способом виготовлення сталі, яка містить сім програмних модулів у відповідності до технологічних процесів. Розроблено алгоритм та схему взаємодії модулів та баз даних підприємства, сформульовані вхідна та вихідна інформація для всіх модулів, кожен з яких передбачає розв'язання певної оптимізаційної задачі. Результати дослідження використано у навчальному процесі шляхом видання навчального посібника та семи матеріалів методичного забезпечення.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності

В результаті детального ознайомлення із дисертаційною роботою та зі звітом з перевірки запозичень встановлено, що порушень академічної доброчесності не було, виявлено. При цитуванні інших вчених зроблено відповідні посилання.

7. Дискусійні положення та зауваження по роботі:

1. Автором запропоновано обчислювальний метод пошукової оптимізації, який використовує цілий ряд кроків (кросинговер, мутація, відсів, локальний пошук), що потребують значних обчислювальних ресурсів. При цьому недостатньо детально проаналізовано обчислювальну складність запропонованого гібридного алгоритму та ключові налаштування, які її визначають.

2. Потребує уточнення адаптація наведених систем планування та керування технологічними процесами до виробництва нових марок сталі, що стає особливо актуальним в умовах активної диверсифікації виробництва.

3. В окремих розділах спостерігається перевантаженість формулами без достатнього інтерпретаційного супроводу. Внаслідок цього важко відділити параметри керування, на які згідно із запропонованими методами здійснюється вплив від параметрів, які автор приймає як «параметри процесу».

4. Потребує розширення перелік міжнародних аналогів запропонованих систем і моделей прийняття рішень. Перевага над існуючими вітчизняними аналогами наголошена автором може бути обумовлена їх науково-технологічним відставанням від світового рівня.

5. Автором наголошується позитивний соціальний та економічний ефект при застосуванні запропонованих підходів до планування виконання замовлень на тиждень і навіть місяць. При тому не передбачається якогось механізму адаптації при нестабільному попиті і постачанні, про які йдеться в першому розділі.

8. Загальний висновок щодо дисертаційної роботи

Вважаю, що наведені вище зауваження носять несуттєвий, уточнювальний характер та жодним чином не знижують загального рівня наукової та практичної цінності дисертаційної роботи, не впливають на її логічну цілісність, обґрунтованість

висновків та високу позитивну оцінку дослідження в цілому. Робота є завершеним науково-дослідним дослідженням, її основні положення, рекомендації та висновки є науково-обґрунтованими, достовірними та актуальними як у теоретичному, так і практичному планах.

Дисертація відповідає пп.7 та 9 «Порядок присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року №1197, «Вимогам до оформлення дисертації», затвердженим наказом МОН України від 12.01.2017 року №40.

За вирішення актуальною наукової 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 *Желдак Тімур Анатолійович* заслуговує на присудження ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри інтегральних та
диференціальних рівнянь
механіко-математичного факультету
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка

Валентин СОБЧУК

ВІРНО:

Начальник відділу кадрів



Відгук отриманий
Вз. секр. 20.08.2026
Будніков А.В.
30.03.2026р.

