

## 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 сформовано на основі детального вивчення дисертаційного дослідження, автореферату, наукових публікацій здобувача, а також документів, що засвідчують практичне застосування та впровадження отриманих наукових результатів.

### 1. **Актуальність обраної теми досліджень та зв'язок з науковими програмами, планами і темами**

Металургійне виробництво належить до складних багатостадійних промислових систем, у яких технологічний процес формується як послідовність взаємопов'язаних операцій, розподілених у часі, просторі та між різними підрозділами підприємства. У таких умовах ефективність функціонування підприємства визначається не лише якістю виконання окремих операцій, а й узгодженістю їх роботи в межах єдиного виробничого процесу. Проте практика автоматизації металургійних підприємств свідчить, що оптимізація окремих технологічних ланок, навіть за умови використання сучасних систем керування, не гарантує досягнення максимальної результативності діяльності підприємства в цілому. Основною причиною цього є розбіжність між локальними цілями окремих виробничих підсистем та глобальними економічними цілями підприємства.

Виконання всіх операцій технологічного циклу виробництва прокату забезпечують певні інформаційні системи, які проводять контроль протікання процесу. Здебільшого це системи автоматичного управління (САУ) та автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУ ТП). Водночас інформаційно-аналітичні системи управління виробничими процесами, що виконують завдання синхронізації, координації, аналізу та оптимізації випуску продукції в рамках всього виробництва, впроваджені недостатньо.

Останнє породжує проблемну ситуацію, адже згадані вище цілі діяльності, виражені економічними критеріями, напряду чи опосередковано конфліктують з критеріями якості процесів управління нижніх рівнів. На рівні САУ та АСУ ТП інженери та технологи орієнтуються зазвичай на технічні показники роботи, а саме час виконання операцій, витрати матеріалів та енергії, кількість виконаних операцій, тощо. Водночас при переході до загальнозаводського рівня прийняття рішень стає явним зв'язок між економічними показниками діяльності підприємства, потоком вхідних замовлень та обсягами і якістю готової продукції.

Будь-яка виробнича система може розглядатися на кількох рівнях абстракції: технічному, технологічному, економічному та організаційному. Система керування виробництвом прокату, що розглядається в даній роботі охоплює економічний та технологічний рівень. Її мета – за рахунок оптимізації

певних технологічних процесів досягти покращення загальних економічних показників діяльності підприємства. Необхідність такої системи керування обумовлена відсутністю на ряді підприємств інтегрованих інформаційно-аналітичних систем, яка б охоплювала всі операції технологічного циклу виробництва готової продукції.

Дисертація підготовлена в рамках державних бюджетних досліджень, які здійснюються за тематичними напрямками, визначеними планом наукових робіт Міністерства освіти і науки України на 2013-2025 рр., що забезпечує відповідність отриманих результатів пріоритетним завданням галузі.

Дослідження тематично і концептуально вписується в стратегічні завдання реформування паливно-енергетичного комплексу України до 2030 року, зокрема в напрямі підвищення ефективності використання вітчизняних енергоресурсів. Крім того, робота відповідає викликам часу відносно цифровізації та автоматизації усіх галузей виробництва в Україні, серед яких провідне місце займає металургія.

## **2. Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна**

Наукові висновки та результати, представлені в дисертаційній роботі, вирізняються високим рівнем обґрунтованості та доказовості. Це забезпечено комплексним використанням перевірених теоретичних підходів, експериментальних методик і чисельного моделювання. Дослідження виконано з акцентом на фундаментальні положення математичного та функціонального аналізу, теорії автоматичного керування та теорії ймовірностей та математичної статистики, що дало можливість отримати достовірні результати. Значний обсяг експериментальних даних підтверджує надійність отриманих висновків, а узгодженість аналітичних і експериментальних результатів свідчить про коректність застосованих методів.

*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.

Представлені у дисертації результати мають суттєву *наукову новизну*, яка чітко визначена та належно аргументована автором. Здобувачем 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 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.

- 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.

Окрім вищезазначеного важливим аспектом наукової новизни є подальший розвиток методів прогнозування стійкості футеровки сталеплавильного агрегату за технічними параметрами та статистичними показниками ведення плавки з двоетапною класифікацією поточного процесу на основі навчання та методи навчання рекомендаційних підсистеми оператора конвертерного виробництва, оснований на аналізі попередньої діяльності, що використовують шаблони вдалого попереднього досвіду з корекцією на поведінку людини.

Автором також 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

Практичне значення полягає в тому, що отримані та сформульовані автором 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.

Практичні результати дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Можливість врахування карт розкроювання у двох переділах та припустимість паралельного виконання кількох замовлень дозволяють зменшити витратний коефіцієнт металу, що є головним техніко-економічним показником ефективності виробництва прокату.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Результати дослідження використано у навчальному процесі шляхом видання навчального посібника та семи матеріалів методичного забезпечення.

Практична значущість підтверджена передачею розроблених методичних матеріалів і рекомендацій на виробничих підприємства, серед яких ТОВ «Інтерпайп Україна», ІП «Сайткор Україна», ТОВ «Ялантіс Україна», АТ «Нікопольський завод феросплавів», ТОВ «Інтерпайп Ніко Тьюб».

#### **4. Оцінка структури та змісту роботи, 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 відзначається послідовною побудовою та внутрішньою логікою викладу. Матеріал подано чітко, коректно та грамотно з використанням належної науково-технічної термінології. У вступі аргументовано актуальність теми в науковому та прикладному вимірах, показано її відповідність пріоритетам програмних і планових наукових досліджень, визначено мету, провідну концепцію та сукупність завдань, конкретизовано об'єкт і предмет дослідження, а також охарактеризовано застосований методичний інструментарій. Також у вступній частині наведені положення, що виносяться на захист, окреслені складові наукової новизни, теоретична та практична значущість результатів, представлені відомості про особистий внесок здобувача, апробацію і загальну структуру дисертації.

Перший розділ містить систематизований огляд і критичне узагальнення світового досвіду розробки методів і засобів створення інтегрованих систем інформаційно-аналітичної підтримки прийняття рішень в задачах прогнозування та керування процесами багатоетапного виробництва сортового прокату. На основі огляду наявних розробок визначено актуальні підходи до обґрунтування структури та загальні принципів роботи і навчання інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування багатоетапним виробництвом прокату.

Другий розділ присвячений розробці та обґрунтуванню 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.

У третьому розділі наведено ряд математичних моделей задач прогнозування властивостей готової продукції та робочого обладнання. Зокрема, удосконалена математична модель розв'язання задачі оптимізації конвертерної плавки за зведеним економічним критерієм з урахуванням матеріально-теплого балансу, розроблена математична модель відновлення залежностей керуючих функцій розкислення та стану об'єкта управління від хімічного складу розпеченої сталі в кисневому конвертері, а також двоетапна математична модель, яка за технічними характеристиками футеровки та статистичними показниками ведення плавки операторами забезпечує статично значимий прогноз щодо залишку терміну роботи поточної футеровки.

Четвертий розділ присвячений розробці та дослідженню функціонування на широкому колі тестових та практичних завдань універсального еволюційного алгоритму розв'язання задач умовної та безумовної оптимізації в безкінечному та двійковому просторах на основі моделювання штучної імунної системи. Отримано стійкий до початкових умов ефективний алгоритм розв'язання багатовимірних задач глобальної оптимізації, який може бути застосований для

вирішення завдань планування та контролю у виробництві прокату для оптимізації технологічних процесів.

П'ятий розділ мстить обґрунтування структури інтегрованої системи підтримки прийняття рішень для керування виробництвом сортового прокату з конвертерним способом виготовлення сталі. Розроблено методику та схему взаємодії модулів та баз даних підприємства, сформульовані вхідна та вихідна інформація для кожного з модулів. Визначено функції інтегрованої СППР в процесах керування прокатним виробництвом. Запропонована методика взаємодії інтегрованої системи підтримки прийняття рішень з виробничими системами основана на принципі паралельної обробки замовлення підприємством на різних етапах багатоетапного виробництва.

Шостий розділ зосереджений на експериментальних дослідженнях запропонованих математичних моделей технологічних процесів та алгоритмів роботи окремих підсистем СППР виробництва. Також виконано математичний аналіз отриманих числових результатів. Показана порівняна економічна ефективність запропонованих науково-технічних рішень у порівнянні з існуючими аналогами.

Зміст дисертації відповідає заявленій назві, а сукупність отриманих наукових і практичних результатів, спрямованих на 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, цілком відповідає паспорту спеціальності 05.13.07 – Автоматизація процесів керування.

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 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. Публікаційна активність здобувача, зокрема кількість наукових праць у яких висвітлено основні результати дисертаційного дослідження, є достатньо високою та повністю відповідає чинним вимогам Міністерства освіти і науки 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.

Практична цінність 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 дослідження, висновки і рекомендації, що містяться в дисертаційній роботі, використано в навчальному процесі НТУ «Дніпровська політехніка» при викладанні дисциплін «Системи штучного інтелекту», «Самонавчання складних систем», «Інтелектуальний аналіз даних» та «Еволюційні технології прийняття рішень в умовах невизначеності».

#### **6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності**

За результатами ретельного опрацювання дисертаційної роботи та аналізу звіту перевірки на наявність запозичень встановлено відсутність порушень принципів академічної доброчесності. Використання праць інших авторів здійснено коректно. Наведено належні посилання та оформлено цитування відповідно до вимог.

#### **7. Дискусійні положення та зауваження по роботі:**

1. З опису програмної реалізації системи підтримки прийняття рішень важко зрозуміти саму структуру програмного забезпечення (шари, модулі). Доцільним було б використання UML-діаграм для опису програмної взаємодії.

2. При описі модулів, які реалізують супровід людини-оператора у взаємодії з автоматизованою системою (розділ 5) недостатню увагу приділено питанням логування дій та моніторингу можливих помилок.

3. Автором запропонований доволі складний обчислювальний метод, який задля універсальності ще й потребує певної підготовки вхідних даних для свого застосування до певної задачі. При цьому не наведено порівняння з існуючими бібліотеками оптимізації, що містять готові програмні рішення на кожен тип задач.

4. У роботі не достатньо уваги приділяється розкриттю фізичного чи математичного сенсу деяких коефіцієнтів. Зокрема «коефіцієнт тиску розмірності» вводиться автором в розділі 3, досліджується в розділі 6, але його сутність залишається не розкритою.

5. З роботи не зрозуміло, які сам математичні припущення покладені основу розробленої автором математичної моделі поділу металу на зливки в розділі 2.2 і яким чином вони звужують застосовність цієї моделі до реальних процесів?

6. Автор пропонує новий обчислювальний метод для розв'язання задач довільного типу в складі СППР, однак у розділі 3.3 стверджує, що найкращим для задачі прогнозування стійкості футеровки є багаторядний метод групового врахування аргументів і не пояснює цього.

7. В шостому розділі дисертації наводяться результати експериментальної перевірки запропонованих моделей та методів. При цьому більшість експериментів мають обмежений характер, хоча з тексту дисертації зрозуміло, що моделі будувалися на багаторічних даних.

Наведені зауваження мають переважно уточнювальний характер і **не впливають** на рівень наукової новизни та практичної значущості отриманих результатів. Вони не порушують логіку викладу; не знижують цілісності структури роботи та не ставлять під сумнів обґрунтованість сформульованих висновків, а отже, не змінюють загальної позитивної оцінки дисертаційного дослідження. У цілому дисертація є самостійною, завершеною науковою роботою, в якій основні положення, рекомендації та висновки є актуальними, достовірними і належним чином аргументованими.

## 8. Загальний висновок

Дисертаційна робота **Желдака Тімура Анатолійовича** є завершеною науково-дослідною роботою, в якій вирішено нову актуальну наукову проблему 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..

Робота вирізняється виразною науковою новизною та значним прикладним потенціалом. Це підтверджується належною аргументацією теоретичних положень, достовірністю результатів експериментальних досліджень, а також реальними перспективами практичного використання запропонованих розробок у діяльності підприємств металургійної галузі. Запропоновані підходи та технічні рішення спрямовані на підвищення ефективності прокатного виробництва з орієнтацією на підвищення прибутковості, скорочення простоїв та зменшення витратного коефіцієнту металу при виконанні замовлень.

Робота відповідає вимогам, що ставляться до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за своїм науково-практичним рівнем та змістом («Вимоги до оформлення дисертації», наказ МОН України від 12.01.2017 року №40) і задовольняє пп. 7 та 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» Кабінету Міністрів України від 17.11.2021 року № 1197.

На підставі вищезазначеного вважаю, що **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 інженерії

програмного забезпечення

Івано-Франківського національного

технічного університету нафти і газу

Підпис(и) **Василя ШЕКЕТА**

Посада/посади **В. Хомин**

Учений секретар ІДНТУНГ

« 26 » 03 2026 р.



**Василь ШЕКЕТА**

Відрук отриманий  
Кудряков А.В. 30.03.2026  
08.080.07  
1.К.02070855