

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Воловецького Олександра Остаповича

«Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації

на основі ядерних функцій»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань

15 Автоматизація та приладобудування за спеціальністю

151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Актуальність теми дисертаційного дослідження, її зв'язок з науковими програмами і планами. Магнітна сепарація є домінуючою операцією збагачення залізистих кварцитів на комбінатах Криворізького басейну, і навіть незначне підвищення коефіцієнта вилучення заліза дає відчутний економічний ефект у масштабах галузі. Керування цим процесом ускладнюють нелінійні статичні характеристики, перехресні зв'язки між каналами, транспортне запізнення та мінливість мінералогічного складу сировини, тоді як наявні системи побудовано переважно на локальних ПІД-контурах, які діють реактивно й не враховують технологічних обмежень у явній формі. Здобувач слушно виводить задачу з протиріччя між вимогами нелінійної адекватності, обчислювальної ефективності та інтерпретованості прогнозної моделі, жодну пару яких відомі класи моделей задовольняють лише частково. Такий підхід надає темі чіткої наукової постановки, а не лише прикладної спрямованості.

Роботу виконано в межах науково-дослідної роботи Криворізького національного університету (державний реєстраційний номер 0126U000841, 2026–2028 рр.), замовником якої є Міністерство освіти і науки України.

Зміст та характеристика результатів дослідження. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і дев'яти додатків.

У вступі викладено актуальність, мету та чотири задачі дослідження, наукову новизну і практичне значення одержаних результатів. Схвальної оцінки заслуговують окремі підрозділи «Межі дослідження» та «Використання інструментів штучного інтелекту», а також зведення методологічних припущень у додатку А: здобувач самостійно окреслює межі інтерпретації власних результатів, що для робіт такого рівня трапляється нечасто.

У розділі 1 виконано системний аналіз процесу магнітної сепарації як об'єкта керування, узагальнено вітчизняний і світовий досвід автоматизації збагачувальних виробництв та порівняно шість класів математичних моделей, за результатами чого сформульовано мету і задачі роботи.

Розділ 2 присвячено побудові ядерної прогнозної моделі на основі гребеневої регресії з RBF-ядром, одержанню замкненого аналітичного градієнта та синтезу алгоритму предиктивного керування; тут же розроблено трирівневу адаптивну архітектуру $SVR \rightarrow KRR \rightarrow GP$ зі стратегією консервативного керування.

У розділі 3 побудовано модель простору стану, сформульовано та доведено достатні умови асимптотичної стійкості замкненої системи, виконано незалежну верифікацію аналітичного градієнта і GP-предиктора та проведено колінеарний порівняльний аналіз шести методів керування на верифікаційних сценаріях.

Розділ 4 містить програмну реалізацію системи, налаштовану на технологічні умови п'яти комбінатів Кривбасу для трьох типів руди, опис верифікаційної платформи рівня Model-in-the-Loop та поетапний план переходу до промислової експлуатації з визначеними умовами переходу між етапами.

Загальні висновки узгоджуються з поставленими задачами, є коректними та достатньо аргументованими. Додатки містять методологічні припущення, розроблені методики, довідки про використання результатів і відомості про апробацію. Список використаних джерел із 80 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дослідження.

Відповідність дисертації встановленим вимогам. Зміст, структура, обсяг роботи та її оформлення відповідають чинним вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. Роботу виконано державною мовою з дотриманням наукового стилю, виклад матеріалу є логічним і послідовним, розділи смислово взаємопов'язані. Загальний обсяг роботи становить 254 сторінки, з яких основний текст — 164 сторінки; робота містить 46 таблиць і 13 рисунків.

Наукова новизна результатів дослідження. У роботі розв'язано наукову задачу підвищення якості керування процесом магнітної сепарації за рахунок побудови предиктивної системи керування на основі ядерних функцій.

Вперше:

- обґрунтовано критерій вибору ядерної прогновної моделі для задачі предиктивного керування магнітною сепарацією — введенням вимоги наявності замкненого аналітично обчислюваного градієнта, що дозволило виділити ядерну гребеневу регресію з RBF-ядром як єдину придатну з розглянутих моделей і забезпечити строгу опуклість задачі квадратичного програмування;

- встановлено достатню умову прийнятності локальної лінеаризації, за якої матриця штрафних ваг регулятора сама утримує похибку лінеаризації в допустимих межах без зовнішнього механізму обмеження кроку оптимізації;

- запропоновано стратегію адаптивного консервативного коригування параметрів регулятора за оцінкою апостеріорної невизначеності гаусівського процесу, що активується при виході робочої точки за межі навчального домену моделі.

Набули подальшого розвитку:

- підхід до адаптивної ідентифікації процесу магнітної сепарації — поєднанням SVR, KRR і GP у єдиній архітектурі зі спільним ядром та функціональним розподілом ролей між фільтрацією аномалій, прогнозуванням і оцінюванням невизначеності;

- метод доведення асимптотичної стійкості систем предиктивного керування — спеціалізацією для випадку нелінійної ядерної прогновної моделі

через формулювання достатніх умов на точність моделі, вагові коефіцієнти регулятора та термінальний член.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні комплексу алгоритмічних і програмних засобів предиктивного керування, придатного до промислового впровадження на збагачувальних комбінатах Кривбасу. Обчислювальна ефективність алгоритму — близько 3 мс на такт при такті дискретизації 60 с — свідчить про сумісність рішення з промисловими контролерами рівня PLC/IPC. Розроблено три методики (побудови нелінійної прогновної моделі, налаштування матриці штрафних ваг та адаптивної ідентифікації), які передано до ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» і прийнято до використання. Практичну спрямованість роботи посилює чотирифазний план впровадження з кількісними критеріями переходу між фазами та механізмом обмеженого авторитету керування, що передбачає автоматичне повернення до ПД-режиму при відмовах. Результати використовуються в навчальному процесі Криворізького національного університету.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій. Обґрунтованість одержаних результатів забезпечується коректною постановкою задач, застосуванням апарату відтворюваних ядерних гільбертових просторів, методу функцій Ляпунова та квадратичного програмування, а також статистичною валідацією прогновної моделі. Достовірність підтверджується узгодженістю результатів числового моделювання з теоретичними оцінками стійкості та незалежною верифікацією окремих компонентів системи. Методи дослідження відповідають поставленим задачам і забезпечили досягнення мети роботи.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. У дисертаційній роботі Воловецького О.О. не виявлено ознак академічного плагіату та інших порушень, які ставили б під сумнів самостійний характер

виконаного дослідження. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела; допоміжний характер застосування інструментів штучного інтелекту розкрито здобувачем прозоро.

Апробація матеріалів дисертації та публікації. Основні положення роботи доповідалися й обговорювалися на 13 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях. За результатами дослідження опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 5 статей, з яких 1 — у зарубіжному виданні, що індексується базою даних Scopus, 1 — у фаховому виданні України, що індексується Scopus, та 3 — у наукових фахових виданнях України; а також 13 тез доповідей. Кількість і рівень публікацій відповідають установленим вимогам, а основні наукові положення роботи в них відображено повною мірою.

Зауваження до дисертаційної роботи та дискусійні положення. Попри загальне позитивне враження, робота має низку недоліків і дискусійних положень:

1. Критерій першої фази впровадження ($n \geq 500$ точок) є суто кількісним і не гарантує ідентифіковності моделі: за пасивної реєстрації даних під час штатної роботи у замкненому ПД-контурі керуючі впливи змінюються мало й корельовано, тому покриття робочого домену залишається неконтрольованим. Критерій переходу $RMSE < 0,8 \%$, обчислений LOO-крос-валідацією на тій самій вузькій вибірці, вузькості домену не виявляє. Вимогу до обсягу вибірки доцільно доповнити метрикою покриття робочого діапазону.

2. Самозабезпечення прийнятності лінеаризації жорстко прив'язано до конкретного налаштування матриці штрафних ваг $R_0 = \text{diag}(1/\Delta u^2_{\max})$. Якщо технологічний персонал зменшить R заради швидшої компенсації збурень, гарантія $e_{\text{lin}} \ll \delta_{\max}$, а разом з нею й умова (ii) достатніх умов стійкості, формально втрачається. Отже, ступінь свободи налаштування регулятора фактично принесено в жертву гарантії коректності лінеаризації, проте межі цієї жертви — діапазон R , у якому гарантія зберігається, — у роботі не окреслено.

3. Перевагу у швидкодії у 17–70 разів одержано порівнянням з реалізацією NMPC на повному NLP-рішувачі (50–200 мс), тоді як сучасні обчислювально ефективні схеми — послідовне квадратичне програмування та real-time iteration — до порівняння не залучено. До того ж за такту дискретизації 60 с і запасу реального часу близько $20\,000\times$ обидва підходи вкладаються у такт із багатократним резервом, тож середній час обчислення не є вирішальним показником. Формулювання переваги доцільно уточнити, перенісши акцент на структурні гарантії — опуклість задачі та детермінованість збіжності.

4. Модель шуму вимірювань прийнято гаусівською незалежною (2.3), проте систематичний дрейф калібрування XRF-аналізатора не розглянуто, хоча адаптивний механізм його небезпечно асимілює: SVR-фільтр налаштовано на раптові викиди та залипання сенсорів, а повільна зміна передається ковзному вікну як параметричний дрейф процесу. У результаті дрейф вимірювального каналу буде сприйнято як зміну властивостей об'єкта, і система стабілізуватиме показ приладу, а не фактичний вміст заліза в концентраті. Механізм звірки з незалежним референсом у роботі не специфіковано.

5. Робастність досліджено лише за шириною ядра — варіацією $\pm 30\%$ при фіксованому $\lambda = \lambda^*$, — тоді як поведінку замкненої системи визначають щонайменше сім налаштовуваних параметрів: λ , горизонти N_p і N_c , пороги GP-наглядача θ_1 , θ_2 та коефіцієнт α адаптивної матриці штрафних ваг. Висновок про збереження стійкості охоплює один параметр із цього набору, що послаблює твердження про робастність; обґрунтованим доповненням був би факторний аналіз чутливості за повним набором налаштовуваних параметрів.

6. Актуальність роботи мотивовано економічним ефектом у масштабах галузі, проте самого економічного розрахунку в тексті немає: величина «+1–2 п.п. вилучення» наведена лише як технологічне очікування, узгоджене з довідкою підприємства. Для роботи прикладного спрямування доцільно навести орієнтовну методику переведення технологічного ефекту стабілізації βFe в

економічні показники або чітко зазначити, на якому етапі впровадження така оцінка формується.

Висновок. Наведені зауваження мають переважно дискусійний характер, стосуються повноти обґрунтування окремих положень та меж застосовності одержаних гарантій і не впливають на позитивну оцінку роботи та її наукового рівня.

Дисертаційна робота Воловецького Олександра Остаповича «Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій» є завершеною науковою працею, яка за актуальністю обраної теми, обсягом і рівнем виконаних досліджень, новизною та ступенем обґрунтованості одержаних результатів відповідає вимогам постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 р. «Порядок присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а її автор Воловецький Олександр Остапович заслуговує присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

20.08.2026

Офіційний опонент,
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри автоматизації
та інформаційних систем
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського

Підпис Конох І.О.
ЗАСВІДЧУЄТЬСЯ
Ст. інспектор відділу кадрів
КРЕМЕНЧУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
Білогінська Т.О.
20. 08 2026 р.


Ігор КОНОХ