

Висновок

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації**

**«Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на
основі ядерних функцій»**

здобувача вищої освіти ступеня доктора філософії за спеціальністю

151 «Автоматизація та комп'ютерно інтегровані технології»

(галузь знань Автоматизація та приладобудування)

Воловецького Олександра Остаповича

1. Актуальність теми дисертації

Криворізький басейн є найбільшим залізорудним регіоном України, де функціонують п'ять гірничо-збагачувальних комбінатів, а магнітна сепарація є домінуючою технологічною операцією збагачення залізистих кварцитів. Навіть незначне підвищення коефіцієнта вилучення заліза забезпечує суттєвий економічний ефект у масштабах галузі. Існуюча практика керування на основі локальних ПД-контурів не забезпечує багатовимірної координації керуючих впливів (магнітної індукції, густини пульпи та витрати живлення), не враховує технологічних обмежень у явній формі та не здатна адаптуватися до параметричної нестационарності процесу.

Предиктивне керування (Model Predictive Control, MPC) є визнаною методологією розв'язання подібних задач у суміжних галузях, проте його ефективне застосування до магнітної сепарації стримується відсутністю прогнозної моделі, яка одночасно задовольняє три суперечливі вимоги: нелінійної адекватності (R1), обчислювальної ефективності (R2) та інтерпретованості параметрів (R3). Подолання цього системного протиріччя є необхідною передумовою побудови ефективної предиктивної системи керування, що визначає актуальність теми дисертації та її значення для підвищення ефективності збагачувальних виробництв Кривбасу.

1.1 Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Дисертаційне дослідження виконано на кафедрі автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету відповідно до її наукового напряму. Окремі результати роботи використано при виконанні науково-дослідної роботи Криворізького національного університету «Удосконалення технологій підземного видобутку руд критичних мінералів з використанням ядерно-фізичних методів та електронної інклінометрії» (державний реєстраційний номер 0126U000841, 2026–2028 рр.), замовник – Міністерство освіти і науки України.

Особистий внесок здобувача

Усі наукові результати, що виносяться на захист, одержано здобувачем особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить: розроблення математичних моделей ядерної регресії для прогнозного керування, синтез алгоритмів К-МРС, проведення обчислювальних експериментів, аналіз та інтерпретація результатів [1, 3, 5, 10, 11, 12]; формулювання критерію вибору ядерної моделі на основі властивостей аналітичного градієнта [12]; порівняльний аналіз методів регресії SVR та GPR для моделювання динамічних систем [3]; розроблення алгоритмів оптимізації SVR для прогнозування параметрів збагачення [5]; реалізація алгоритму швидкого предиктивного керування для промислових об'єктів [10]; діагностика числової деградації Kernel-MPC при збільшенні горизонту прогнозування [11]. Співавтору Троню В. В. належить наукове керівництво та консультування щодо постановки задач дослідження. Номери публікацій відповідають списку наукових праць здобувача (додаток Б).

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів, висновків і рекомендацій

Достовірність та обґрунтованість наукових положень забезпечується коректним застосуванням теорії відтворюваних ядерних гільбертових просторів (RKHS), методів ядерної регресії (KRR, SVR, GP), теорії оптимального керування з ковзним горизонтом і квадратичного програмування, методу функцій Ляпунова для дослідження асимптотичної стійкості та статистичних методів валідації (довірчі інтервали гаусівського процесу, аналіз залишків). Аналітичний градієнт ядерної моделі

верифіковано незалежно від числового еталона (відносне відхилення $< 10^{-6}$). Достатні умови асимптотичної стійкості замкненої системи підтверджено монотонним спаданням функції Ляпунова з показником збіжності $\lambda_{\max} \approx 0,819 < 1$ та збереженням стійкості при варіації ширини ядра у діапазоні $\pm 30\%$. Ефективність системи К-МРС підтверджено колінеарним порівняльним аналізом шести методів керування на єдиній моделі технологічного процесу, що методологічно усуває спотворення при зіставленні різних контролерів. Одержані результати узгоджуються з відомими положеннями теорії предиктивного керування та ядерних методів.

Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

1. Вперше для задачі предиктивного керування процесом магнітної сепарації обґрунтовано критерій вибору ядерної прогновної моделі – введенням вимоги наявності замкненого аналітично обчислюваного градієнта на додаток до нелінійної адекватності, обчислювальної ефективності та інтерпретованості, – що дозволило виділити KRR з RBF-ядром як єдину з розглянутих моделей, придатну для К-МРС, і забезпечило шестикратне прискорення обчислення градієнта порівняно з числовим диференціюванням та гарантовану строгу опуклість QP-задачі.

2. Вперше для К-МРС з ядерною RBF-моделлю встановлено достатню умову прийнятності локальної лінеаризації – доведенням, що матриця штрафних ваг $R_0 = \text{diag}(1/\Delta u_{\max}^2)$ утримує відносний крок керування у припустимих межах, – що дозволило обмежити похибку лінеаризації на рівні $e_{\text{lin}} \approx 0,11\text{--}0,28\%$ (проти допустимого $\delta_{\max} = 5\%$) без зовнішнього механізму trust region, із використанням лише $15\text{--}24\%$ допустимого діапазону приростів.

3. Набув подальшого розвитку підхід до адаптивної ідентифікації процесу магнітної сепарації — поєднанням SVR, KRR і GP у єдиній архітектурі зі спільним ядром та функціональним розподілом ролей (фільтрація аномалій, прогнозування, оцінювання невизначеності), – що, на відміну від відомих однорівневих схем, дозволило підвищити точність ідентифікації у 36,3 рази при зміні типу руди та у 15–20 разів при повільному дрейфі параметрів відносно статичної моделі.

4. Набув подальшого розвитку метод доведення асимптотичної стійкості систем предиктивного керування – спеціалізацією для К-МРС з нелінійною ядерною моделлю через формулювання достатніх умов на точність моделі, вагові коефіцієнти регулятора та термінальний член, – що дозволило формально гарантувати монотонне спадання функції Ляпунова з показником збіжності $\lambda_{\max} \approx 0,819 < 1$ та підтвердити збереження стійкості при варіації ширини ядра у діапазоні $\pm 30\%$.

5. Вперше для задачі предиктивного керування процесом магнітної сепарації запропоновано стратегію адаптивного консервативного коригування параметрів К-МРС за оцінкою апостеріорної невизначеності GP, що активується при виході робочої точки за межі навчального домену, – реалізовану збільшенням матриці штрафних ваг $R(k)$ пропорційно дисперсії σ^2_{GP} , – що дозволило знизити RMSE ідентифікації з 0,3–0,5 (архітектура без GP-наглядача) до 0,22 нормалізованих одиниць та скоротити час відновлення з 6–9 до 5–8 тактів.

Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 5 статей, з них 1 – у зарубіжному виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 1 – у науковому фаховому виданні України, що входить до бази даних Scopus, та 3 – у наукових фахових виданнях України; 13 тез доповідей на наукових конференціях. Основні наукові результати дисертації викладено у статтях [1–5], а також у тезах доповідей [6–18]. Повний перелік публікацій з конкретизацією особистого внеску здобувача наведено в додатку Б. Опубліковані праці повно відображають основні положення та результати дисертації.

Апробація основних результатів дослідження

Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на: Міжнародній науково-технічній конференції «Розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2023, 2025); XIV Всеукраїнській конференції «Молоді вчені 2024 – від теорії до практики» (м. Дніпро, 2024); XVII, XVIII та XIX Всеукраїнських науково-практичних WEB-конференціях аспірантів, студентів та молодих вчених «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (м. Кривий Ріг, 2024, 2025, 2026); Всеукраїнській науково-практичній on-line конференції

«Проблеми енергоефективності та автоматизації в промисловості та сільському господарстві» (м. Кропивницький, 2024); International Scientific and Practical Internet Conference «Development of Education, Science and Business: Results 2025» (Dnipro, 2025); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2025» (м. Одеса, 2025); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Виклики майбутнього: трансформації, стратегії адаптації та стійкість у міждисциплінарному вимірі» (м. Чернігів, 2025); конференції Міжнародного центру наукових досліджень (м. Суми, 2025); XVI Всеукраїнській конференції «Молоді вчені 2026 – від теорії до практики» (м. Дніпро, 2026); III (IX) Міжнародній науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (Харків–Запоріжжя–Дніпро, 2026).

Наукове значення виконаного дослідження

Наукове значення дослідження полягає в розвитку методів предиктивного керування нелінійними багатовимірними технологічними процесами на основі ядерних функцій. Отримані результати можуть бути застосовані в наукових галузях автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, теорії автоматичного керування і машинного навчання для систем керування, а також у розділах навчальних курсів з ідентифікації систем, оптимального та предиктивного керування, автоматизації технологічних процесів збагачення корисних копалин.

Практична цінність результатів дослідження

Практична цінність полягає у створенні комплексу алгоритмічних та програмних засобів предиктивного керування процесом магнітної сепарації, придатного для промислового впровадження на гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького басейну. Реалізовано програмне забезпечення системи К-МРС у вигляді модульної чотирирівневої архітектури, параметризованої за даними п'яти ГЗК Кривбасу для трьох типів руди; наскрізний час обчислення одного такту становить $t_{p95} \approx 3$ мс при такті дискретизації 60 с (запас реального часу $\approx 20\,000\times$) за ресурсних вимог близько 2 МБ оперативної пам'яті, що сумісно з промисловими контролерами рівня PLC/IPC. Розроблено чотирифазний план промислового впровадження відповідно до ІЕС 62381 з кількісними критеріями переходу між фазами та механізмом обмеженого авторитету ($\Delta B \leq 0,005$ Тл/крок, $\Delta p \leq 20$ кг/м³/крок, $\Delta Q \leq 50$ м³/год/крок).

Результати дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі Криворізького національного університету при підготовці здобувачів другого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти (додаток Г). Розроблені за результатами роботи три методики (додатки Д, Е, Ж) передано до ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Кривий Ріг), де їх прийнято до використання (додаток И); очікуваний ефект – підвищення стабільності вмісту заліза в концентраті β_{Fe} зі зменшенням середньоквадратичної похибки керування до 0,5–0,7 %, утримання β_{Fe} на цільовому рівні 65–68 % за частки часу з падінням нижче регламентного мінімуму 65 % не більш ніж 1 %, та підвищення коефіцієнта вилучення заліза ϵ на 1–2 п.п. Основні результати дисертаційної роботи розглянуто фахівцями ПРАТ «ПВНГЗК», які підтвердили їх практичну значущість для розвитку рішень щодо моделювання та керування процесами збагачення мінеральної сировини (акт, додаток К).

Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (80 найменувань) та 9 додатків, містить 46 таблиць і 13 рисунків; основний текст викладено на 164 сторінках, загальний обсяг роботи – 256 сторінок. За структурою, мовою та стилем викладення дисертація відповідає вимогам МОН України.

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

2. 3 урахуванням зазначеного, на засіданні кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій ухвалили:

1) Дисертація Воловецького О. О. «Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано актуальне наукове завдання – розроблення методології побудови інтегрованої предиктивної системи керування процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій, що забезпечує узгоджене багатовимірне керування нелінійним об'єктом з явним дотриманням технологічних обмежень та адаптацію до мінливості сировини, – що має важливе значення для галузі знань Автоматизація та приладобудування.

2) За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 18 наукових праць, у яких повністю відображено основні результати

дисертації, з них 5 статей (1 – у зарубіжному виданні, що входить до бази даних Scopus; 1 – у науковому фаховому виданні України, що входить до бази даних Scopus; 3 – у наукових фахових виданнях України) та 13 тез доповідей на наукових конференціях.

3) Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

4) З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Воловецького О. О. дисертація «Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій» рекомендується для подання до розгляду та захисту у разовій спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

науково-педагогічні працівники кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій:

1. д-р техн. наук, професор, Щокін В. П.
2. д-р техн. наук, професор Купін А. І.
3. д-р техн. наук, професор Попов С. О.
4. д-р техн. наук, доцент Котов І. А.
5. канд. техн. наук, доцент, зав. каф. Рубан С.А.
6. канд. техн. наук, доцент Тиханський М. П.
7. канд. техн. наук, доцент Савицький О. І.
8. канд. техн. наук, доцент Тронь В. В. (науковий керівник здобувача)
9. канд. техн. наук, доцент Маринич І. А.
10. канд. техн. наук, доцент Курганов І. Д.
11. канд. техн. наук, доцент Харламенко В. Ю.
12. канд. техн. наук, доцент Жосан А. А.
13. ст. викладач Бурнасов П. В.
14. ст. викладач Сердюк О. Ю.
15. ст. викладач Тиханська А. М.
16. асистент Ляшок В. Г.

та запрошені:

17. проректор з наукової роботи Криворізького національного університету д-р техн. наук, професор Бровко Д. В.
- від факультету механічної інженерії та транспорту :
18. канд. техн. наук, доцент Пікільняк А.В.
- від кафедри збагачення корисних копалин і хімії:
19. д-р техн. наук, проф. Олійник Т.А.
- від кафедри комп'ютерних систем та мереж:
20. канд. техн. наук, доцент Музика І. О.
21. канд. техн. наук, доцент Кузнецов Д. І.
22. канд. техн. наук, ст. викладач Сенько А. О.

23. канд. техн. наук, доцент Кумченко Ю.О.
- від кафедри моделювання та програмного забезпечення :
24. канд. техн. наук, доцент Гриценко А.М.
25. канд. техн. наук, доцент Швець Д.В.
- від кафедри професійної та соціально-гуманітарної освіти:
26. канд. техн. наук, доцент, докторант каф. АКНТ Ткачук В. В.
- від науково-дослідної частини:
27. д-р техн. наук, головний науковий співробітник Азарян А. А.
28. д-р техн. наук, головний науковий співробітник Моркун В. С.

Також присутні аспіранти кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій: Романенко О.О., Макогонов А.В., Моїсейченко В.В., Лещенко Є.В., Лінський М. П. (участь у голосуванні не приймали).

З присутніх – 8 докторів наук та 11 кандидатів наук – фахівці за профілем представленої дисертації.

за	-	двадцять вісім
проти	-	немає
утримались -		немає

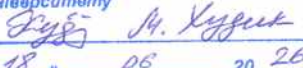
Головуючий на засіданні кафедри,
завідувач кафедри АКНТ,
к.т.н., доцент

« 18 » 06 2026 р.



Сергій РУБАН



Підпис	
ЗАСВІДЧУЮ	
Учений секретар Криворізького національного університету	
	
« 18 » 06 20 26 р.	