

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Воловецького Олександра Остаповича
*«Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі
ядерних функцій»*

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
у галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування
зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Актуальність теми дисертації.

Підвищення ефективності збагачення залізорудної сировини є стратегічним завданням гірничо-металургійного комплексу України. Магнітна сепарація є домінуючою технологічною операцією збагачення залізистих кварцитів на гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького басейну, від якості керування якою безпосередньо залежать вміст заліза у концентраті та коефіцієнт вилучення корисного компонента. Навіть незначне підвищення показника вилучення забезпечує суттєвий економічний ефект у масштабах галузі.

Процес магнітної сепарації на барабанному сепараторі ПБМ-90/250 характеризується нелінійними статичними характеристиками, перехресними зв'язками між каналами, транспортним запізненням та параметричною нестационарністю, зумовленою варіабельністю мінералогічного складу руди. Існуюча практика керування на основі локальних ПІД-контурів не забезпечує багатовимірної координації керуючих впливів і не враховує технологічних обмежень у явній формі. За таких умов побудова нелінійної предиктивної системи керування на основі ядерних функцій постає як актуальна науково-технічна задача, що має суттєве значення для підвищення ефективності збагачувальних виробництв Кривбасу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Окремі результати дисертаційного дослідження використано при виконанні науково-дослідної роботи Криворізького національного університету (державний реєстраційний номер 0126U000841, 2026–2028 рр.), замовником якої є Міністерство освіти і науки України. Зазначене підтверджує включення роботи до планової наукової тематики закладу вищої освіти.

Наукова новизна дисертаційного дослідження.

У дисертації одержано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності розв'язують актуальну науково-технічну задачу підвищення якості керування процесом магнітної сепарації. Наукова новизна полягає у такому:

- уперше для задачі предиктивного керування процесом магнітної сепарації обґрунтовано критерій вибору ядерної прогновної моделі, за яким модель ядерної гребеневої регресії (KRR) з RBF-ядром забезпечує аналітично обчислюваний градієнт і тому є придатною для побудови обчислювально ефективного К-МРС;

- уперше для К-МРС з ядерною RBF-моделлю встановлено достатню умову прийнятності локальної лінеаризації, за якої матриця штрафних ваг регулятора обмежує похибку лінеаризації без застосування зовнішнього механізму обмеження кроку;

- уперше запропоновано стратегію адаптивного консервативного коригування параметрів К-МРС за оцінкою апостеріорної невизначеності гаусівського процесу (GP), що активується при виході робочої точки об'єкта за межі навчального домену моделі;

- набув подальшого розвитку підхід до адаптивної ідентифікації, який поєднує SVR, KRR і GP у єдиній архітектурі зі спільним ядром та функціональним розподілом ролей (фільтрація аномалій, прогнозування, оцінювання невизначеності);

- набув подальшого розвитку метод доведення асимптотичної стійкості систем предиктивного керування, спеціалізований для К-МРС з нелінійною

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

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків і рекомендацій. Відсутність порушень академічної доброчесності.

Аналіз дисертаційної роботи дозволяє зробити висновок, що отримані наукові положення, висновки та рекомендації є обґрунтованими й достовірними. Дослідження вирізняється високим рівнем наукової обґрунтованості, що підтверджується коректним застосуванням апарату ядерної гребеневої регресії у контурі предиктивного керування. Отримання аналітичного виразу градієнта дало змогу після локальної лінеаризації формувати на кожному кроці керування детерміновану задачу квадратичного програмування. Доведення асимптотичної стійкості замкненої системи та розроблення багаторівневої адаптивної архітектури ідентифікації об'єкта становлять вагомий внесок у теорію автоматичного керування. Достовірність забезпечується коректним застосуванням сучасного науково-методичного апарату: теорії відтворюваних ядерних гільбертових просторів (RKHS), методів ядерної регресії (KRR, SVR, GP), теорії оптимального керування з ковзним горизонтом і квадратичного програмування, а також методу функцій Ляпунова для дослідження стійкості. Запозичення в роботі оформлено з посиланнями на відповідні джерела; ознак порушення академічної доброчесності не виявлено.

Практичне значення роботи.

Практична цінність полягає у створенні комплексу алгоритмічних та програмних засобів предиктивного керування процесом магнітної сепарації, придатного для промислового впровадження на ГЗК Криворізького басейну. Реалізовано модульну чотирирівневу програмну архітектуру, параметризовану за даними п'яти ГЗК для трьох типів руди, а обчислювальна ефективність алгоритму забезпечує багатократний запас реального часу відносно такту

дискретизації. Результати використано у навчальному процесі Криворізького національного університету (підтверджено довідкою). Розроблені методики передано до ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Кривий Ріг), де прийнято до використання (підтверджено довідкою).

Повнота викладення наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 18 наукових праць, у тому числі 5 статей, з яких 1 – у зарубіжному періодичному виданні, що входить до міжнародної наукометричної бази Scopus, 1 – у науковому фаховому виданні України, що входить до бази Scopus, та 3 – у наукових фахових виданнях України; а також 13 тез доповідей на наукових конференціях. Кількість і рівень публікацій відповідають установленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. У публікаціях у достатній мірі відображено основні наукові положення, висновки та рекомендації роботи.

Загальна характеристика структури і змісту роботи.

Структуру дисертації побудовано відповідно до мети та задач дослідження. Робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 80 найменувань та 9 додатків, містить 46 таблиць і 13 рисунків. Основний текст викладено на 164 сторінках, загальний обсяг роботи – 254 сторінки. Виклад матеріалу логічний та аргументований, оформлення відповідає чинним вимогам.

У першому розділі виконано системний аналіз процесу магнітної сепарації як об'єкта керування та порівняльний аналіз шести класів математичних моделей, на основі чого виявлено системне протиріччя між вимогами нелінійної адекватності, обчислювальної ефективності та інтерпретованості. У другому розділі побудовано ядерну прогнозу модель на основі KRR з RBF-ядром, отримано аналітичний вираз градієнта в замкненій формі і синтезовано алгоритм

K-MPC з адаптивною архітектурою $SVR \rightarrow KRR \rightarrow GP$. У третьому розділі сформульовано й доведено достатні умови асимптотичної стійкості та проведено порівняльний аналіз ефективності шести методів керування. У четвертому розділі реалізовано програмне забезпечення системи та виконано верифікацію на MiL-платформі.

Зауваження до дисертаційної роботи та дискусійні положення.

Поряд із загальною позитивною оцінкою роботи слід висловити такі зауваження й дискусійні положення:

1. У підрозділах 2.1–2.2 уведено низку понять апарату ядерних методів (відтворюваний ядерний гільбертів простір, матриця Грама, аналітичний вираз градієнта в замкненій формі) без стислих робочих означень, що ускладнює сприйняття матеріалу читачем, який не є фахівцем саме з ядерних методів. У тексті анотації аббревіатури (наприклад, MIMO, MISO, RKHS, SVR, KRR, NMPC, ADMM) використовуються без первинного розшифрування та перекладу українською мовою, що є обов'язковою вимогою до академічних текстів. Доцільно при першому вживанні навести короткі означення цих понять. У тексті паралельно вживаються позначення «K-MPC», «Kernel-MPC» та «ядерне предиктивне керування». Для уникнення неоднозначності доцільно уніфікувати термінологію та позначення в межах усієї роботи.

2. Налаштування гіперпараметрів ядерної моделі (ширини RBF-ядра та параметра регуляризації λ) виконано аналітичною LOO-крос-валідацією; $\lambda \approx 0,01$ – апріорна оцінка як початкове наближення. Водночас обґрунтування меж та кроку сіткового пошуку гіперпараметрів подано недостатньо детально; бажано пояснити, як обрано діапазон пошуку та наскільки результат є чутливим до цього вибору.

3. Адаптивну ідентифікацію реалізовано через ковзне вікно фіксованого розміру $W = 500$. Оскільки процес характеризується нестационарністю з характерними часами від годин до місяців, доцільно детальніше розкрити

поведінку системи на межі різних класів нестационарності та чутливість результату до фіксованого розміру вікна. Не розглянуто доцільність застосування адаптивного розміру вікна $W(k)$, що могло б покращити компроміс між дисперсією оцінок та чутливістю до динаміки рудного тіла.

4. У роботі транспортне запізнення розглядається як сталий параметр, значення якого перебуває в діапазоні 120–180 с. Водночас зміна об'ємної витрати пульпи може впливати на фактичний час проходження матеріалу. Доцільно було б дослідити чутливість системи до зміни цього параметра та можливість його оперативного коригування, наприклад шляхом подання τ як функції поточної витрати пульпи.

5. Перспективним напрямом подальших досліджень є напівнатурна перевірка або дослідно-промислова апробація розробленої системи, що дала б змогу додатково оцінити її робастність до структурно-параметричної невизначеності реального об'єкта.

6. Перехід від синтетичних навчальних даних до промислових передбачено фазою Offline-ідентифікації. Доцільно уточнити процедуру та критерії перенавчання KRR-моделі в умовах експлуатації (періодичність оновлення, тригери перенавчання, контроль якості оновленої моделі).

7. Окремі таблиці з результатами порівняння методів керування та верифікаційних сценаріїв доцільно було б супроводити більш розгорнутою текстовою інтерпретацією ключових показників.

8. Оформлення списку публікацій здобувача має розбіжності. Для статей у вітчизняних фахових виданнях застосовано англомовний стиль оформлення і навпаки у англомовних статтях присутні елементи оформлення для вітчизняних джерел. Необхідно узгодити всі джерела з правилами національного стандарту з відповідною пунктуацією.

Висновок.

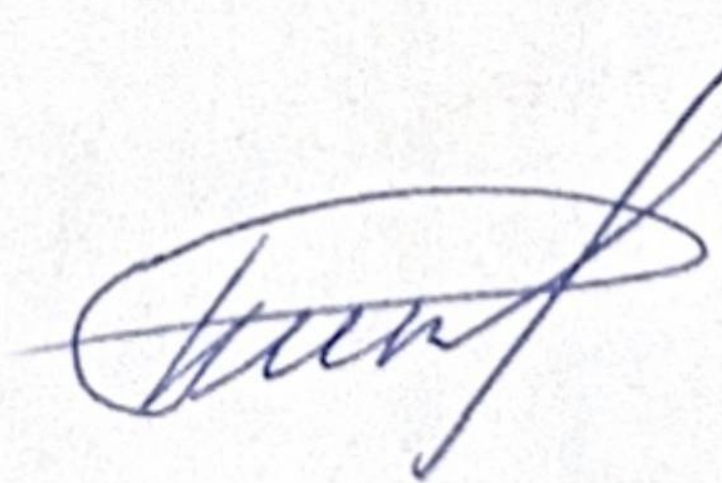
Детальний аналіз дисертаційної роботи та опублікованих праць дає підстави стверджувати, що робота Воловецького Олександра Остаповича «Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій» є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають наукове та практичне значення. Матеріал викладено послідовно, у науковому стилі; публікації автора відображають основні положення та результати роботи. Висловлені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

Враховуючи актуальність теми, достовірність отриманих наукових результатів, їх наукову та практичну значущість, а також достатню повноту висвітлення основних положень у опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, а її автор – Воловецький Олександр Остапович – заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології.

Рецензент,
кандидат технічних наук, доцент,
декан факультету механічної інженерії та транспорту,
Криворізький національний університет

Андрій ПІКІЛЬНЯК

«14» серпня 2026р.



Підпис	<u>А. П. П. П.</u>
ЗАСВІДЧУЮ:	
Відділ кадрів Криворізького національного університету	
<u>14</u>	<u>08</u> 20 <u>26</u> р.