

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію Воловецького Олександра Остаповича
на тему: «ПРОГНОЗУЮЧЕ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМ ПРОЦЕСОМ
МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ НА ОСНОВІ ЯДЕРНИХ ФУНКЦІЙ»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань
15 «Автоматизація та приладобудування»,
спеціальності 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

1. Актуальність теми дисертаційного дослідження.

Автором проведено аналіз проблемної сфери дисертаційної роботи – керування процесом магнітної сепарації залізорудної сировини на гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького басейну за рахунок розроблення методології побудови інтегрованої предиктивної системи керування.

Автором зазначено, що Криворізький басейн є найбільшим залізорудним регіоном України, де функціонують п'ять гірничо-збагачувальних комбінатів, а магнітна сепарація залишається ключовою операцією збагачення залізистих кварцитів. Підвищення коефіцієнта вилучення заліза та стабілізація вмісту заліза у концентраті безпосередньо впливають на собівартість продукції та конкурентоспроможність підприємств галузі. Тому пошук ефективних рішень керування цим процесом має чітку прикладну спрямованість.

Автор обґрунтував актуальність проблеми побудови системи керування, що забезпечує узгоджене багатовимірне керування нелінійним об'єктом з явним дотриманням технологічних обмежень та адаптацію до стохастичної мінливості параметрів сировини.

У роботі зазначено, що поширені сьогодні системи керування побудовано переважно на локальних ПІД-контурах, які працюють реактивно, не координують керуючі впливи в багатовимірному режимі та не адаптуються до змінюваності мінералогічного складу сировини. З огляду на це розроблення

придатної до впровадження предиктивної системи керування на основі ядерних функцій є актуальним як з наукового, так і з прикладного погляду.

Автором сформульований тезис про наявність системного протиріччя між трьома вимогами до прогнозної моделі у контурі предиктивного керування процесом магнітної сепарації – нелінійною адекватністю, обчислювальною ефективністю та інтерпретованістю параметрів. За таких умов необхідна розробка нових науково-технічних рішень, що дозволяють подолати вказане протиріччя. Отже, обрана тема дисертації є актуальною.

2. Ступінь обґрунтованості наукових результатів, висновків і рекомендацій сформульованих у дисертації, їх наукова новизна.

Дисертація характеризується системним підходом до вивчення проблемної області та завдань, які поставлені перед здобувачем. Наукові положення та висновки, що містяться в роботі, є теоретично обґрунтованими й підтверджуються результатами числового моделювання на колінеарній верифікаційній MiL-платформі за стандартом IEC 62381, а також апробацією на наукових конференціях. Достовірність підкріплено незалежною верифікацією компонентів системи та статистичною валідацією прогнозної моделі. Автором логічно викладені основні результати дослідження, їх аналіз та висновки, що дозволяє послідовно розглянути всі визначені проблеми, що повною мірою підтверджує обґрунтованість наукових положень дисертаційного дослідження. Отже, можна констатувати, що наукові результати, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації, повною мірою обґрунтовані.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується:

- збіжністю результатів числового моделювання з теоретичними оцінками стійкості (§3.4) та результатами незалежної верифікації компонентів системи;
- публікацією наукових друкованих праць в провідних фахових виданнях України і за кордоном;
- апробацією отриманих нових наукових результатів на 13 міжнародних та всеукраїнських науково-технічних конференціях;

- впровадженням отриманих результатів в навчальний процес кафедри Автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету для підготовки здобувачів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» з дисципліни другого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти «Інтелектуальні системи керування»;

- передачею ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Кривий Ріг) до використання методик, розроблених за результатами дисертаційної роботи, які можуть бути враховані у подальших роботах, спрямованих на підвищення ефективності керування нелінійними технологічними процесами збагачувального виробництва, а також при розробці алгоритмічного та програмного забезпечення системи предиктивного керування барабанными магнітними сепараторами.

Новизна отриманих наукових результатів дисертаційної роботи Воловецького О.О. полягає в наступних положеннях:

- Уперше для задачі предиктивного керування магнітною сепарацією обґрунтовано критерій вибору ядерної прогновної моделі на основі властивостей аналітичного градієнта, а також встановлено достатню умову прийнятності локальної лінеаризації, що дозволяє відмовитися від зовнішнього механізму обмеження кроку оптимізації;

- Подальшого розвитку набув підхід до адаптивної ідентифікації, що поєднує SVR як фільтр аномалій, KRR як прогнозну модель та GP як наглядач невизначеності у єдиній архітектурі зі спільним ядром;

- Набув подальшого розвитку метод доведення асимптотичної стійкості, спеціалізований для систем з ядерною прогнозною моделлю. Зазначені результати орієнтовано на практичну реалізованість у промислових умовах;

- Уперше у задачі предиктивного керування процесом магнітної сепарації запропоновано стратегію адаптивного консервативного коригування параметрів на основі Kernel Model Predictive Control (K-MPC) за оцінкою апостеріорної

невизначеності GP, що активується при виході робочої точки об'єкта за межі навчального домену.

3. Оцінка структури і змісту дисертації, її завершеності в цілому

Структура дисертації є загальноприйнятою. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 254 сторінки, з яких основний зміст викладений на 164 сторінках друкованого тексту, містить 13 рисунків, 46 таблиць. Список використаних джерел складається з 80 найменувань. Додатки викладені на 57 сторінках друкованого тексту та містять додаткові матеріали, що доповнюють основну частину дисертаційної роботи та відомості про апробацію результатів дисертації.

Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

У «Вступі» обґрунтовано актуальність теми дисертації, мету, завдання досліджень, визначено наукову новизну, наукову та практичну цінність роботи, практичне значення отриманих результатів, описано методи, які були використані у дослідженнях, та особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено детальний аналіз і сформульовані підходи щодо вирішення проблеми роботи. Виконано системний аналіз процесу магнітної сепарації як об'єкта автоматичного керування, проведено порівняльний аналіз шести класів математичних моделей. Узагальнення результатів цього аналізу дало підстави виявити наявність системного протиріччя між вимогами до системи керування. На цій основі сформульовано мету дослідження та основні задачі, спрямовані на її досягнення.

У другому розділі побудовано ядерну прогнозну модель на основі KRR з RBF-ядром, отримано замкнений аналітичний градієнт, синтезовано алгоритм предиктивного керування K-MPC з технологічно обґрунтованими вагами, доведено умову самозабезпечення прийнятності лінеаризації та розроблено

трирівневу адаптивну архітектуру $SVR \rightarrow KRR \rightarrow GP$ зі стратегією консервативного керування.

Третій розділ присвячений аналізу та верифікації системи предиктивного керування К-MPC, теоретичних основ ядерного предиктивного керування в просторі RKHS, розробці архітектури системи К-MPC та структурно-функціональної схеми, алгоритмів оптимізації керуючих впливів, аналізу стійкості та робастності системи К-MPC, порівняльному аналізу ефективності методів керування (BNK).

У четвертому розділі автором реалізовано програмне забезпечення системи К-MPC у вигляді модульної архітектури, параметризованої під обладнання п'яти ГЗК Кривбасу, побудовано верифікаційну MiL-платформу, підтверджено відповідність встановленим критеріям якості та розроблено чотирифазний план промислового впровадження відповідно до ІЕС 62381.

Висновки за результатами дисертаційного дослідження підкреслюють наукову новизну, наукову значущість та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаних джерел свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано сучасні результати вітчизняних та закордонних наукових досліджень.

4. Практичне значення наукових результатів.

Практичне значення наукових результатів дисертаційного дослідження полягає у тому, що створений комплекс алгоритмічних та програмних засобів предиктивного керування процесом магнітної сепарації, придатний для промислового впровадження на гірничо-збагачувальних комбінатах Криворізького басейну.

За результатами роботи розроблено три методики – побудови нелінійної прогнозової моделі процесу магнітної сепарації на основі ядерної регресії з аналітично обчислюваним градієнтом, налаштування матриці штрафних ваг предиктивного регулятора за умовою самозабезпечення коректності лінеаризації

та адаптивної ідентифікації процесу на основі трирівневої архітектури з ядерними функціями.

Фактичні результати роботи передано до ПРАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» (м. Кривий Ріг), де їх прийнято до використання та заплановано до застосування при розробці алгоритмічного і програмного забезпечення системи предиктивного керування барабанными магнітними сепараторами.

Результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі Криворізького національного університету при підготовці здобувачів другого (освітньо-наукового) рівня вищої освіти за освітньо-науковою програмою «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка».

5. Повнота викладення результатів дисертації 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 міжнародної наукометричної бази Scopus, та 3 – у наукових фахових виданнях України; а також 13 тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях. Кількість, рівень і тематична спрямованість публікацій відповідають установленим вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії. В опублікованих працях повною мірою відображено основні наукові положення, висновки та рекомендації дисертації.

6. Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності.

У дисертації Воловецького Олександра Остаповича відсутні порушення академічної доброчесності. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів містять посилання на відповідне джерело.

7. Зауваження та побажання щодо сутності викладеного матеріалу, оформлення та обсягу дисертації

Дисертаційна робота загалом справляє позитивне враження. Водночас вона має низку дискусійних питань і зауважень переважно прикладного та редакційно-структурного характеру.

1. У роботі окремі результати (адаптивна архітектура $SVR \rightarrow KRR \rightarrow GP$, механізм обмеженого авторитету керування) подано водночас і як елементи наукової новизни, і як складові практичного значення. Доцільно чіткіше розмежувати, що саме віднесено до наукової новизни, а що – до практичних результатів, аби уникнути дублювання у формулюваннях.

2. Програмну реалізацію описано як чотирирівневу модульну архітектуру (підрозділ 4.3). Для оцінювання придатності до промислового застосування доцільно уточнити вимоги до обчислювальної платформи та інтерфейси інтеграції системи у наявну АСУТП (рівні ПЛК і SCADA).

3. У тексті вживаються спеціальні поняття «обмежений авторитет керування» (Limited Authority Control) та «наглядач невизначеності» без короткого означення при першому згадуванні. Для однозначності сприйняття доцільно навести стислі робочі означення цих понять.

4. Як основний критерій якості при верифікації використано RMSE по вмісту заліза βFe . Доцільно пояснити вибір саме цього показника та доповнити його, за можливості, інтегральними критеріями якості керування (наприклад, ISE або IAE) для повнішого порівняння методів.

5. Чотирифазний план промислового впровадження ($Offline \rightarrow Shadow \rightarrow Advisory \rightarrow Closed Loop$) описано з кількісними критеріями переходу. Доцільно уточнити організаційний аспект: хто та за якою процедурою ухвалює рішення про перехід між фазами в умовах діючого підприємства.

6. У тексті трапляється змішування україномовних та англomовних термінів і позначень (warm start, active-set, lifting-оператор тощо). Для уніфікації стилю

подання матеріалу доцільно навести стислий глосарій або послідовно вживати україномовні відповідники.

Дискусійні питання та побажання не є принциповими і жодним чином не зменшують позитивної оцінки роботи, її наукової цінності, актуальності та практичного значення.

8. Висновок щодо відповідності дисертації встановленим нормам.

Вважаю, що дисертація Воловецького Олександра Остаповича «Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій» є завершеною науковою працею, яка містить низку нових, актуальних та достовірних результатів, що свідчать про її складність, систематичність та важливе значення для сфери автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. Дисертація повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (з наступними змінами) та «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022, а її автор Воловецький О.О. заслуговує присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Рецензент,
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри моделювання
і програмного забезпечення
Криворізького національного університету
м. Кривий Ріг



Ігор КОТОВ

