

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Воловецького Олександра Остаповича

«Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Актуальність теми дослідження та її зв'язок із науковими програмами і планами

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена поєднанням технологічної складності об'єкта дослідження, необхідності підвищення ефективності процесів збагачення залізорудної сировини та сучасних тенденцій розвитку інтелектуальних методів автоматичного керування.

Автор достатньо послідовно обґрунтовує актуальність дослідження через властивості процесу магнітної сепарації на барабанному сепараторі ПБМ-90/250. Зокрема, наголошено на нелінійному характері статичних характеристик об'єкта, наявності перехресних зв'язків між каналами керування, транспортному запізненні, параметричній нестаціонарності, пов'язаній зі зміною мінералогічного складу руди, а також на необхідності дотримання технологічних обмежень. При цьому автор розглядає об'єкт не як сукупність незалежних локальних контурів, а як багатовимірний нелінійний об'єкт керування, що є принципово важливим з позицій сучасної теорії автоматичного керування.

Особливої уваги заслуговує сформульоване автором системне протиріччя між трьома вимогами до прогнозної моделі – нелінійною адекватністю, обчислювальною ефективністю та інтерпретованістю параметрів (R1-R3). Такий підхід видається обґрунтованим, оскільки у разі промислового застосування моделі для MPC недостатньо лише забезпечити високу точність апроксимації: модель повинна одночасно забезпечувати прийнятну швидкість розрахунку прогнозу та можливість її використання всередині оптимізаційного контуру. Саме ця постановка проблеми логічно підводить до подальшого вибору ядерної гребеневої регресії з RBF-ядром, аналітичного обчислення градієнта та побудови K-MPC.

Актуальність дослідження підтверджується і сучасним станом наукових робіт у галузі збагачення мінеральної сировини. Сучасні дослідження демонструють активне застосування методів машинного навчання для прогнозування показників магнітної сепарації та інших процесів збагачення. Водночас сучасні дослідження промислових низькоінтенсивних магнітних сепараторів також спрямовані на врахування одночасно властивостей руди, технологічних режимів та характеристик обладнання при прогнозуванні показників сепарації.

Водночас актуальність дисертаційної роботи визначається не лише загальною тенденцією до використання машинного навчання в автоматизації. Її

суттєвою особливістю є орієнтація на проблему обчислювальної реалізованості нелінійної прогнозовної моделі безпосередньо всередині контуру MPC. У цьому аспекті вибір ядерних методів має певну наукову мотивацію. Сучасні дослідження розглядають ядерні представлення як засіб роботи з нелінійністю при збереженні можливості ефективної оптимізації. Таким чином, тематика дисертації знаходиться не на периферії сучасних досліджень, а на перетині кількох актуальних напрямів: нелінійного керування, MPC, kernel methods, data-driven identification та адаптивного керування.

Окремо слід відзначити, що актуальність роботи має не лише галузевий, а і безпосередньо прикладний характер. Автор орієнтує розроблений підхід на умови гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького басейну, а в подальших розділах конкретизує параметри об'єкта, зокрема робочі діапазони змінних, часові характеристики та структуру керованих каналів. Зокрема, автор враховує реальне обмеження, пов'язане з конструкцією сепаратора: магнітна індукція у практичній системі не розглядається як безперервно керований сигнал, а виступає квазістатичним параметром режиму, тоді як автоматичне керування здійснюється за каналами густини пульпи та витрати.

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

Отже, актуальність теми дисертаційного дослідження є достатньо обґрунтованою. Вона визначається реальною потребою підвищення ефективності автоматичного керування нелінійними та нестационарними процесами збагачення залізорудної сировини, необхідністю врахування технологічних обмежень та перехресних зв'язків у багатовимірному об'єкті, а також сучасною тенденцією переходу від локального регулювання до інтелектуальних прогнозуючих систем керування.

Оцінка змісту та завершеності дисертації, її відповідності встановленим вимогам щодо оформлення

Дисертаційна робота Воловецького Олександра має цілісну, логічно побудовану структуру, яка відповідає поставленій меті та послідовності розв'язання визначених наукових завдань. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та дев'яти додатків. Основний текст дисертації викладено на 164 сторінках, загальний обсяг роботи становить 254 сторінки; дисертація містить 46 таблиць та 13 рисунків, список використаних джерел включає 80 найменувань, а додатки займають 57 сторінок.

Позитивною рисою дисертації є чітка відповідність між поставленими у вступі завданнями та змістом основних розділів. Така відповідність «завдання-розділ-отриманий результат» є важливою ознакою завершеності дисертаційного дослідження.

Зміст **першого розділу** має переважно аналітичний характер і виконує необхідну для дисертації функцію формування проблемного поля дослідження. Автор послідовно переходить від фізико-технологічних характеристик магнітної

сепарації до формалізації об'єкта як нелінійної МІМО-системи, аналізу вітчизняного та світового досвіду автоматизації, розгляду Advanced Process Control та систематизації математичних моделей. Порівняння класів математичних моделей за критеріями R1-R3 наведено у табл.1.4, після чого сформульовано вимоги до прогнозної моделі.

Другий розділ є центральним з погляду формування математичного апарату дисертації. У ньому послідовно здійснено вибір KRR з RBF-ядром, сформульовано критерії R1-R4, отримано аналітичний градієнт, побудовано прогнозну модель, синтезовано K-MPC та запропоновано адаптивну архітектуру SVR→KRR→GP. Змістовна завершеність цього розділу підтверджується не лише наявністю математичних залежностей, а й числовою перевіркою отриманих результатів. Особливо позитивно слід оцінити те, що автор не приховує методологічних обмежень запропонованого підходу. У дисертації вони винесені в окремий Додаток А «Припущення та обмеження дослідження». Тут систематизовано припущення щодо синтетичного джерела даних, квазістатичної моделі, структури шумів, декомпозиції виходів, фіксованого вектора входів, спрощеної моделі-генератора, дискретної параметризації типів руди, обсягу вибірки, вибору RBF-ядра, рівня MiL-верифікації, самореферентності BNK, термінального коефіцієнта та часових параметрів. Для більшості обмежень автор також визначає шлях їх подальшого зняття. Така практика є позитивною ознакою наукової доброчесності та методологічної зрілості дослідження.

Третій розділ забезпечує необхідний перехід від розроблення алгоритмічних рішень до їх теоретичної та числової перевірки. У ньому побудовано формалізм ядерного предиктора, сформовано матрицю предикції, розглянуто алгоритм QR-оптимізації, досліджено стійкість і робастність системи, проведено статистичну валідацію та порівняльний аналіз із шістьма альтернативними методами керування. Важливим показником завершеності є наявність колінеарного порівняльного аналізу методів керування. На с. 147-154 автор порівнює PID, Adaptive PID, LMPC, NMPC, Neural MPC та запропонований K-MPC за однакових початкових умов, збурень і на одній моделі PlantDynamics. При цьому автор прямо зазначає, що самореферентність модельного BNK обмежує інтерпретацію результатів і потребує подальшої перевірки на реальному об'єкті. Така застережливість є методологічно правильною і не дозволяє автоматично переносити отримані модельні результати на промисловий об'єкт.

Четвертий розділ логічно завершує дослідження переходом від математичної моделі та алгоритмів до питань практичної реалізації. Автор описує технічні характеристики ПБМ-90/250, методологію MiL-верифікації, ієрархію керування за ISA-95 та інформаційні потоки OPC UA, модульну програмну архітектуру, верифікаційні сценарії та чотирифазну стратегію промислового впровадження. На с.182-184 наведено функціональну схему підключення сепаратора ПБМ-90/250 до системи K-MPC (рис. 4.2), причому автор коректно враховує фізичне обмеження, за якого магнітна індукція не є безперервно керованим автоматичним сигналом, а має квазістатичний характер

і налаштовується оператором. Автоматичними каналами замкненого керування залишаються густина пульпи та витрата.

Суттєвою перевагою оформлення є наявність значного за обсягом довідкового та методичного матеріалу у додатках. Вони не мають формального характеру, а забезпечують відтворюваність значної частини наведених у дисертації результатів.

Список використаних джерел містить фундаментальні праці з теорії МРС, нелінійного керування, ядерних методів, статистичного навчання, адаптивного керування, QR-оптимізації, верифікації та промислової автоматизації.

Загалом дисертація оформлена як завершена кваліфікаційна наукова праця та за своєю структурою відповідає загальним вимогам до дисертаційних досліджень. Побудова роботи, нумерація розділів і підрозділів, оформлення таблиць, рисунків, формул, посилань, списку джерел та додатків у цілому забезпечують можливість послідовного ознайомлення з методологією, результатами та висновками дослідження.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість отриманих результатів забезпечується системним характером проведеного дослідження, послідовним переходом від аналізу технологічного об'єкта та формулювання вимог до математичної моделі до синтезу системи предиктивного керування, теоретичного аналізу її властивостей, числової та статистичної верифікації, а також опрацювання питань практичної реалізації.

Важливою передумовою обґрунтованості є чітко сформульована у роботі логіка дослідження. На основі аналізу нелінійності характеристик процесу, наявності транспортного запізнення, параметричної нестационарності та технологічних обмежень автор сформував системне протиріччя між вимогами до нелінійної адекватності прогнозної моделі, її обчислювальної ефективності та можливості аналітичної лінеаризації. На цій основі визначено чотири взаємопов'язані задачі дослідження та для них заздалегідь встановлено кількісні критерії перевірки: рівень похибки прогнозної моделі, якість керування, обчислювальні витрати, часові характеристики та умови стійкості замкненої системи.

Обґрунтованість вибору KRR з RBF-ядром як основної прогнозної моделі базується не на суб'єктивному виборі автора, а на формалізованій системі критеріїв R1-R4 та порівняльному аналізі п'яти моделей-кандидатів – MLP, GP, SVR, LS-SVM та KRR, з яких чотири останні належать до класу ядерної регресії, а багатошаровий перцептрон залучено як нейромережеву модель порівнянної апроксимаційної здатності – референсу для оцінювання ефективності ядерних методів. Важливим аргументом на користь обґрунтованості цього положення є числова перевірка отриманого аналітичного градієнта. У роботі показано, що аналітичний градієнт KRR відтворює числовий еталон з похибкою меншою за 10^{-6} та обчислюється приблизно у шість разів швидше за числове диференціювання. Таким чином, теоретичне

положення щодо доцільності використання аналітичного градієнта має як математичне, так і експериментальне підтвердження.

Обґрунтованим є також положення щодо запропонованого механізму самозабезпечення прийнятності лінеаризації. Результати числової перевірки показують, що похибка лінеаризації становить приблизно 0,11-0,28%, що суттєво менше встановленого допустимого рівня 5%.

Достатньо переконливо обґрунтовано положення щодо адаптивної архітектури SVR→KRR→GP. Її структурні компоненти мають чітко визначені функціональні ролі: SVR використовується для фільтрації аномальних вимірювань, KRR – як прогнозна модель у контурі MPC, а GP – як засіб оцінювання невизначеності. При цьому всі три методи інтегровані через спільний ядерний простір та RBF-ядро. Така архітектура не лише описана концептуально, а й перевірена у сценаріях, що імітують зміну типу руди та повільний дрейф параметрів процесу.

Окремо слід відзначити обґрунтованість положення, винесеного автором як наукова новизна, щодо адаптивного консервативного керування. Запропонований механізм передбачає автоматичне збільшення матриці штрафних ваг $R(k)$ пропорційно апостеріорній дисперсії GP-наглядача при виході робочої точки за межі навчального домену. Для запобігання частим перемиканням режимів використано гістерезис. Отже, запропонований механізм має не лише концептуальне обґрунтування, а й конкретну алгоритмічну реалізацію з визначеними параметрами та критеріями переходу між режимами.

Висновки щодо стійкості K-MPC також мають достатню теоретичну основу.

Важливо, що теоретичні положення щодо стійкості не залишилися лише формальними твердженнями. Автором проведено числову перевірку стійкості при варіації ширини RBF-ядра до $\pm 30\%$, а також незалежну перевірку аналітичного градієнта, статистичну перевірку GP-предиктора та профілювання часу виконання.

Обґрунтованість висновків щодо ефективності запропонованого K-MPC додатково підтверджена колінеарним порівняльним аналізом. Принциповою перевагою такого підходу є забезпечення однакових умов для всіх досліджуваних методів: шість алгоритмів керування працюють з однією моделлю PlantDynamics, однаковими початковими умовами та однаковими збуреннями. Це дозволяє зменшити вплив сторонніх факторів під час порівняння саме алгоритмічних властивостей методів.

Обґрунтованими є також висновки щодо обчислювальної реалізованості запропонованого підходу. Отриманий $t_{p95} \approx 3,02$ мс при такті дискретизації 60 с формує значний запас за часом виконання алгоритму. Це є вагомим аргументом на користь можливості реалізації запропонованої методології на обчислювальних ресурсах промислового рівня.

Практичні рекомендації щодо впровадження K-MPC також мають достатнє обґрунтування. Автором запропоновано чотирифазний план промислового впровадження відповідно до ІЕС 62381, який передбачає

послідовний перехід від Offline-ідентифікації та Shadow Mode до Advisory Mode і повноцінного автоматичного керування. Для переходу між етапами визначені кількісні критерії, а для керуючих впливів – обмеження швидкості зміни. Передбачено також подвійний механізм захисту: на рівні QR-обмежень контролера та апаратному рівні ПЛК.

Наукові положення мають логічний зв'язок із поставленими задачами, а сформульовані висновки безпосередньо впливають із отриманих результатів. Кількісні показники, наведені у загальних висновках, мають відповідне обґрунтування у розділах 2-4 та підтверджуються результатами верифікаційних експериментів. Практичні рекомендації щодо інтеграції К-МРС у структуру АСУТП також базуються на визначених технологічних обмеженнях, характеристиках об'єкта та результатах MiL-верифікації.

Таким чином, ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень дисертації не викликає сумнівів. Робота виконана на високому науково-методичному рівні, а її результати є репрезентативними та достатньо апробованими.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання

Отримані в дисертаційній роботі результати мають істотне значення як для розвитку теорії та методології автоматизованого керування нелінійними технологічними процесами, так і для практичного вдосконалення систем керування процесами магнітної сепарації залізних руд. Значимість роботи визначається тим, що запропонована методологія К-МРС спрямована на вирішення характерної для промислових об'єктів проблеми поєднання нелінійності технологічного процесу, параметричної нестационарності, транспортного запізнення, технологічних обмежень та необхідності забезпечення прийнятної обчислювальної складності алгоритмів керування.

Наукова значимість роботи насамперед полягає у розвитку методологічних засад побудови предиктивних систем керування нелінійними об'єктами на основі ядерних моделей. Автором запропоновано підхід, у якому KRR з RBF-ядром використовується як прогнозна модель у контурі МРС, що дозволяє поєднати нелінійну апроксимацію технологічного процесу з аналітичним отриманням градієнта та подальшим перетворенням задачі нелінійного програмування на опуклу задачу квадратичного програмування. Такий підхід має методологічну цінність, оскільки дозволяє зберегти переваги нелінійного моделювання без істотного зростання обчислювальної складності, характерного для повноцінних NMPC-підходів.

Суттєвим науковим результатом є запропонований принцип функціонально-рольового розподілу методів SVR, KRR та GP у межах єдиного відтворюваного ядерного простору. Наукова цінність такого рішення полягає не лише у поєднанні трьох методів машинного навчання, а у формуванні цілісної адаптивної структури, в якій кожен компонент виконує чітко визначену функцію у контурі керування. Це дозволяє враховувати як повільний дрейф параметрів технологічного процесу, так і вихід робочої точки за межі навчального домену.

Подальший розвиток у роботі отримав підхід до адаптивного керування в умовах невизначеності. Запропонована стратегія адаптивного консервативного керування пов'язує рівень невизначеності GP-наглядача з величиною штрафних ваг у задачі оптимізації. Таким чином, система не лише прогнозує поведінку об'єкта, але й оцінює ступінь довіри до отриманого прогнозу та відповідно змінює агресивність керуючих впливів. Такий механізм є важливим з наукової точки зору для розвитку методів інтелектуального та адаптивного предиктивного керування об'єктами зі змінними характеристиками.

Важливе значення для науки має також розвиток математичного апарату аналізу стійкості К-МРС. Отримані теоретичні результати доповнено числовою перевіркою, зокрема стрес-тестуванням при зміні ширини RBF-ядра.

Наукову значимість отриманих результатів посилює проведений порівняльний аналіз запропонованого К-МРС з іншими методами керування. Отримані результати показали якість керування К-МРС на рівні NMPC при істотно менших обчислювальних витратах, а також суттєве покращення показників порівняно з традиційним PID-керуванням.

Практична значимість результатів полягає у можливості використання розробленої методології для автоматизованого керування барабанными магнітними сепараторами, зокрема сепаратором ПБМ-90/250, що використовується у технологічному процесі збагачення залізних руд. У роботі визначено структуру інформаційної інфраструктури, запропоновано програмну реалізацію К-МРС, розроблено верифікаційні сценарії та сформовано функціональну схему інтеграції системи з діючою АСУТП. При цьому передбачена можливість інтеграції К-МРС без конструктивної зміни самого сепаратора.

Практична цінність роботи також полягає у врахуванні специфіки реального технологічного процесу. У К-МРС закладено обмеження на зміну основних керуючих впливів, передбачено подвійний захист – на рівні оптимізаційної задачі та на рівні ПЛК, а також розроблено механізм переходу між різними режимами роботи системи. Такий підхід є важливим саме для промислових АСУТП, де безпека та контрольованість процесу впровадження мають не менше значення, ніж показники якості алгоритму.

Окремо слід відзначити підтверджену практичну значимість результатів з боку представників промислового підприємства. Основні результати дисертації були розглянуті фахівцями ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат», які підтвердили практичну значущість запропонованих підходів для подальшого розвитку науково-технічних рішень щодо моделювання та керування процесами збагачення мінеральної сировини та можливість їх використання у подальших роботах підприємства.

За результатами проведених досліджень очікуваний технологічний ефект від упровадження К-МРС пов'язується передусім зі стабілізацією процесу в зоні технологічного оптимуму та підвищенням коефіцієнта вилучення заліза орієнтовно на 1-2%. При цьому автор коректно не декларує необґрунтованої економії електроенергії для сепаратора ПБМ-90/250, оскільки його магнітна система виконана на основі постійних магнітів. Це свідчить про врахування

конструктивних особливостей об'єкта та коректне визначення очікуваних напрямів практичного ефекту.

Високу оцінку заслуговує той факт, що результати дисертації не залишилися суто теоретичними, а були інтегровані в освітній процес Криворізького національного університету. Розроблені моделі, алгоритми та програмні засоби використовуються у навчальному процесі під час підготовки фахівців за спеціальністю, пов'язаною з автоматизацією, комп'ютерно-інтегрованими технологіями та робототехнікою. Їх можна застосовувати у лабораторному практикумі, дипломному проєктуванні, магістерських і докторських дослідженнях.

Таким чином, результати дисертаційної роботи мають подвійну значимість. Для науки вони розширюють методологічні можливості застосування ядерної регресії, RKHS та предиктивного керування для нелінійних нестационарних об'єктів, формуючи цілісний підхід до побудови адаптивної К-МРС-архітектури. Для практики вони створюють алгоритмічну, програмну та організаційну основу для підвищення якості керування процесом магнітної сепарації та його подальшої інтеграції у промислові АСУТП.

Апробація матеріалів дисертації

Апробацію результатів дисертаційної роботи слід визнати достатньою та системною. Основні положення і результати дослідження протягом 2023-2026 років доповідалися та обговорювалися на міжнародних і всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях. Тематика представлених доповідей безпосередньо відповідає змісту дисертації та послідовно охоплює питання ядерного моделювання, фільтрації даних, предиктивного керування, К-МРС, його стійкості, робастності та обчислювальної ефективності.

Результати дослідження опубліковано у 18 наукових працях, з яких 5 є статтями, у тому числі 2 – у виданнях, що індексуються міжнародною наукометричною базою Scopus, та 13 – тезами доповідей на наукових конференціях.

Важливим підтвердженням практичної апробації є розгляд основних результатів фахівцями ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат». Розроблені методики передано підприємству та прийнято до використання при подальшій розробці алгоритмічного і програмного забезпечення систем предиктивного керування барабанными магнітними сепараторами.

Таким чином, результати дисертації отримали належну наукову та практичну апробацію, а їх представлення у фаховому науковому середовищі та обговорення з представниками промисловості підтверджують достатній рівень публічності й практичної спрямованості виконаного дослідження.

Якість викладу та відповідність принципам академічної доброчесності

Текст дисертаційної роботи викладено послідовно, у науковому стилі, з дотриманням загальноприйнятої термінології у сфері автоматизації,

математичного моделювання, машинного навчання та предиктивного керування. Матеріал структуровано відповідно до логіки проведеного дослідження: від аналізу технологічного об'єкта та постановки задачі, до розроблення математичної моделі, синтезу алгоритму К-МРС, його теоретичного дослідження, верифікації та визначення можливостей практичного впровадження. Математичні залежності, таблиці та графічний матеріал у цілому органічно доповнюють текст і забезпечують достатню повноту викладу.

Посилання на наукові джерела систематично використовуються в тексті дисертації, а список використаних джерел сформовано як окрему структурну частину роботи.

Окремо позитивно оцінюється прозоре визначення особистого внеску здобувача у спільних публікаціях. Це відповідає принципу прозорого розмежування внеску співавторів.

Публікаційна активність також дає підстави позитивно оцінити дотримання принципів наукової доброчесності.

Позитивною рисою є також наявність у роботі окремого Додатка А, присвяченого припущенням та обмеженням дослідження. Така відкритість щодо вихідних умов, прийнятих припущень та обмежень відповідає принципам академічної доброчесності та відтворюваності наукового дослідження.

За результатами ознайомлення з дисертацією ознак академічного плагіату, неправомірного запозичення результатів інших авторів або приховування співавторства не встановлено. Власні результати здобувача, результати спільних досліджень та використані наукові джерела в цілому розмежовано належним чином.

Отже, якість викладу дисертаційної роботи можна оцінити позитивно, а її підготовка та представлення результатів загалом відповідають принципам академічної доброчесності, наукової етики та вимогам до академічних досліджень.

Недоліки та зауваження по роботі

Поряд із позитивною оцінкою дисертаційної роботи та відзначенням її наукової і практичної значимості, детальне ознайомлення з її змістом дає підстави висловити низку зауважень і положень дискусійного характеру.

1. Основна кількісна верифікація результатів виконана на рівні Model-in-the-Loop із використанням математичної моделі PlantDynamics. Сам автор на с.162-163 та у Додатку А (с.200-207) прямо зазначає, що промислова валідація, HiL, FAT/SAT та випробування на реальному об'єкті у межах роботи не проводилися. Тому твердження щодо придатності К-МРС до промислової експлуатації, на думку опонента, доцільно трактувати саме як обґрунтовану готовність методології до наступного етапу промислової валідації, а не як завершене доведення її промислової ефективності.

2. У Додатку А (с.200-201) зазначено, що навчальна вибірка обсягом $n=500$ формується за допомогою симулятора PlantDynamics, а не отримана безпосередньо з промислового об'єкта. Такий підхід є цілком прийнятним для

методологічного етапу дослідження, однак створює ризик перенесення властивостей самої моделі-генератора на KRR-модель.

3. У запропонованому плані впровадження критерієм переходу до Shadow Mode визначено $RMSE < 0,8\%$. Чому саме цей поріг є достатнім для переходу між фазами? Варто було б пов'язати його не лише з точністю прогнозування, а й безпосередньо з технологічними та економічними показниками процесу: допустимим відхиленням вмісту заліза, втратами металу, продуктивністю, енергоспоживанням та економічним ефектом.

4. Значна частина кількісних покращень у роботі стосується саме точності ідентифікації та прогнозування KRR-моделі. Наприклад, для адаптивної архітектури наведено покращення $RMSE$ у 15-20 разів, а при зміні типу руди – у 36,3 рази. Разом із тим покращення точності моделі не завжди прямо пропорційне покращенню якості керування. Було б корисно чіткіше розмежувати ефект удосконалення моделі та додатковий ефект власне MPC-регулятора.

5. Архітектура $SVR \rightarrow KRR \rightarrow GP$ є однією з найбільш цікавих частин дисертації. Проте це ускладнює оцінювання внеску кожного компонента. У роботі окремо наведено ефект SVR -фільтра, адаптивної KRR та GP -наглядача, однак було б корисно послідовно вилучити кожен компонент і показати зміну однакових критеріїв якості. Це дозволило б переконливіше відповісти на питання, чи є всі три рівні необхідними, чи аналогічний результат може бути отриманий спрощеною дво- або однорівневою архітектурою.

6. Відтворюваність експериментів забезпечується фіксацією $seed=42$ та проведенням 30 запусків. З методологічної точки зору це забезпечує відтворюваність, але не повністю характеризує статистичну невизначеність результатів. Для посилення доказовості доцільно було б повторити експеримент для декількох незалежних $seed$ та подати довірчі інтервали для основних метрик.

7. Параметри PlantDynamics сформовані на основі паспортних даних, технологічних регламентів, авторських досліджень та експертних оцінок. Такий комплексний підхід є виправданим на етапі побудови верифікаційного симулятора, однак різне походження параметрів може призводити до різної точності їх визначення. Тому доцільно було б для ключових параметрів провести аналіз чутливості моделі та визначити, які саме параметри найбільшою мірою впливають на висновки щодо переваги K-MPC.

8. У роботі зазначено, що діапазони навчальної вибірки встановлено за паспортними діапазонами сепаратора, тому очікується, що промислові режими будуть інтерполяцією, а не екстраполяцією. В реальному виробництві вихід технологічного процесу за межі навчальної області цілком можливий. GP -наглядач частково вирішує цю проблему. Бажано було б окремо дослідити контрольовану екстраполяцію, оцінити область достовірності KRR та встановити формальний критерій переходу від K-MPC до резервного регулятора.

9. Розділи 1-3 синтезують і верифікують систему з трьома керуючими впливами (B, ρ, Q), тоді як §4.6 визнає магнітну індукцію фізично некерованою

реальному часі. Повторна верифікація для конфігурації з двома входами не виконана.

10. Умова (iii) достатніх умов стійкості (§3.4.1) є припущенням про поведінку замкненої системи, а не доведеною властивістю. Формулювання «формально гарантовано» (пункт 4 новизни) є завищеним.

Однак, відмічені недоліки та зауваження мають переважно рекомендаційний або уточнювальний характер і жодним чином не впливають на загальне позитивне враження від роботи і не знижують її наукового і практичного значення.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Воловецького Олександра Остаповича на тему «Прогнозуюче керування нелінійним процесом магнітної сепарації на основі ядерних функцій» є завершеним самостійним науковим дослідженням, присвяченим розв'язанню актуального науково-прикладного завдання розроблення методології побудови систем предиктивного керування нелінійними технологічними процесами магнітної сепарації залізорудної сировини в умовах нестаціонарності технологічних параметрів та варіабельності мінералогічного складу. Об'єкт, предмет, мета та завдання дослідження узгоджені між собою, а отримані результати послідовно розкривають поставлену мету.

У цілому вважаю, що дисертація за змістом, рівнем наукової новизни, обґрунтованістю основних положень, апробацією та практичною спрямованістю робота відповідає вимогам «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 від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами № 507 від 03.05.2024 р.) та вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

На підставі вищевикладеного вважаю, що Воловецький Олександр Остапович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Офіційний опонент –
доктор технічних наук, професор,
доцент кафедри автоматизації
виробничих процесів,
Центральноукраїнського
національного технічного університету

Анатолій МАЦУЙ

Підпис А. Мациуя засвідчено
ст. : директор кафедри

