

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, завідувача кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету Купіна Андрія Івановича на дисертацію Сіданченка Владислава Вадимовича на тему «Автоматизований метод оцінки та прогнозу хімічного складу чавуну на випуску доменної печі», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Актуальність роботи.

Україна традиційно входить до першої десятки світових лідерів з виробництва чорної металургії. Так у довоєнний період це було 7 місце за обсягом виробництва сталі і 3 місце — за обсягом експорту металопродукції (за даними Світової асоціації сталі, 2022 р.). Вітчизняна металургійна промисловість є провідною галуззю економіки, яка здійснює найбільший внесок до щорічного внутрішнього валового продукту (ВВП) держави на рівні 15%, а також дає понад 30% від загальних валютних надходжень (дані Укрдержстату щодо соціально економічного розвитку за 2021 р.). Разом з тим для сталого розвитку цієї важливої галузі необхідно постійно поліпшувати її конкурентоспроможність, у т.ч. за рахунок впровадження новітніх технологій, інтенсифікації виробництва, збільшення продуктивності праці та її ефективності за рахунок комплексної автоматизації, зокрема, на основі вимог стандартів Industry 4.0.

Доменне виробництво чавуну є важливою ланкою металургії та стає основою для подальшого випуску багатьох видів кінцевої продукції. У той же час процес виготовлення чавуну є достатньо складним об'єктом автоматизації. Це обумовлено багатофакторністю, складністю структурних зв'язків, інерційністю, властивостями нелінійності та/або нестационарності характеристик, збурень тощо. При цьому фізичне вимірювання режимних параметрів суттєво обмежено надвисокими температурами в агрегатах.

Тому оцінка оптимальності режимних параметрів технологічного процесу (ТП) у домні, хімічного складу чавуну є важливою умовою забезпечення якості кінцевої продукції. Традиційно це забезпечується прямими (вимірювання) або непрямими (розрахунки, прогнозування) методами. Виводячи із вищезазначених умов (надвисокі температури, нелінійність, нестаціонарність тощо) можливості прямих вимірювань є суттєво обмеженими. Тому достатньо доцільною є основна ідея автора – застосувати саме прогностичні підходи для визначення хімічного складу чавуну (в т.ч. небажаних аномалій) на випуску доменної печі.

У результаті досліджень у роботі була висунута гіпотеза про те, що часові ряди даних про хімічний склад чавуну на випуску не мають традиційно «гаусівських властивостей». Отже, засоби, що ґрунтуються на припущенні про «гаусівський характер процесу», не можуть забезпечити необхідну точність і достовірність результатів. З метою перевірки та обґрунтування гіпотези у роботі було проведено дослідження, засноване на методах нелінійної динаміки, детермінованого хаосу, фрактальних властивостях процесів. Автором було виявлено та доведено, що досліджувані часові ряди мають риси самоподібності, властиві для фрактальних процесів. Тому подальші дослідження проводилися методами нелінійної динаміки.

Отже, науково-прикладна задача, яка була сформульована і вирішена в дисертації Сіданченко В.В., є досить актуальною. Вона полягає в розробці та дослідженні автоматизованого методу непрямой оцінки (прогнозу) хімічного складу чавуну на випуску доменної печі, що дозволяє підвищити точність та достовірність даних автоматизованого контролю в режимі реального часу. При цьому важливою особливістю підходу є інваріантність до властивостей оброблюваного процесу.

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

Основою цієї роботи є матеріали, що узагальнюють дослідження автора, виконані в рамках реалізації науково-дослідних робіт НТУ

«Дніпровська політехніка» відповідно до Закону України № 2623-14 (від 11.07.2001 р.) «Про пріоритетні напрями розвитку науки та техніки» (зі змінами, внесеними відповідно до Закону № 2859-IX від 05.02.2023 р.), ухвалою Кабінету Міністрів України № 179 (від 03.03.2021 р.) «Національна економічна стратегія на період до 2030 року», постановою Кабінету Міністрів України № 695 (від 05.08.2020 р.) «Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021-2027 роки». Зокрема ця робота виконана в рамках НДР «Дослідження методів підвищення ефективності автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності промислового та побутового призначення» (№ держреєстрації 0122U002601 від 19.05.2022 р.).

Наукова новизна одержаних результатів.

На підставі всебічного аналізу змісту дисертаційної роботи Сіданченко В.В. та дотичних наукових публікацій автора встановлено, що здобувачем досягнуто основну мету, а саме: вирішено поставлену науково-прикладну задачу щодо розробки та дослідженню автоматизованого методу оцінки та прогнозу хімічного складу чавуну на випуску доменної печі. Наукова новизна дисертації полягає в такому:

1. *Вперше* обґрунтовано гіпотезу про фрактальні властивості часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі, що дозволило розробити принципово новий підхід у дослідженні часових рядів даних про хімічний аналіз чавуну, заснований на методах нелінійної динаміки, і зумовило можливість створення моделей процесів, що протікають у системі, адекватних їх стохастичним властивостям, і таким чином підвищити точність і достовірність автоматизованого контролю та прогнозу хімічного складу чавуну.

2. *Вперше* встановлено, що еволюція часового ряду даних про хімічний склад чавуну може бути описана з позиції детермінованого хаосу. На підтвердження цього було реконструйовано дивний атрактор, побудовано

його фазовий портрет, визначено кількісні характеристики (кореляційний інтеграл, кореляційна розмірність, розмірність простору вкладення та власне розмірність атрактора) та виділено квазіцикли. Результат аналізу квазіциклів показав, що їхні ланки мають напрямок обертання за годинниковою стрілкою, що, як відомо, свідчить про малий ризик помилкового автоматизованого контролю та прогнозу.

3. *Вперше* на основі статистичного методу RS-аналізу було виявлено ефект самоорганізації та довготривалої пам'яті часових рядів даних про хімічний склад чавуну на випуску доменної печі. Отримані в роботі значення фрактальної і кореляційної розмірностей дозволяють стверджувати, що часові ряди, що вивчаються, характеризуються наявністю внутрішнього порядку, який в даний час визначається як фрактальний, а часова еволюція системи, що вивчається, являє собою стійкий динамічний стан, іменованій дивним атрактором.

4. *Вперше* розроблено модифікований субоптимальний метод адаптивної фільтрації-прогнозу калманівського типу, інваріантний до властивостей оброблюваного процесу, що дозволяє підвищити достовірність і точність автоматизованого контролю та прогнозу нестационарних часових рядів даних про хімічний склад чавуну, при неможливості отримання їх аналітичної моделі та виявлення аномалії процесу доменної плавки.

Констатуємо, що всі положення наукової новизни відповідають змісту роботи, є повністю обґрунтованими і доведеними в результаті проведеного дисертаційного дослідження.

Практична цінність та впровадження отриманих результатів.

Основу практичної цінності результатів дисертаційного дослідження Сіданченко В.В. становлять методики, алгоритми та програми, що реалізують запропонований автоматизований метод оцінки та прогнозу хімічного складу чавуну на випуску доменної печі. Вони вже застосовуються під час

проєктування нових або модернізації існуючих засобів автоматизації доменних печей. Також отримані результати дисертаційного дослідження використано та впроваджено в навчальному процесі Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» при підготовці магістрів спеціальності 174 - “Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка” (акт впровадження від 16.04.2024 р.). Результати дисертації використовуються при наукових дослідженнях ТОВ "Новел Проджектс Енд Солюшинс" (довідка про впровадження результатів дисертації № 11-Д від 11.04.2024 р.). Матеріали дисертаційної роботи використані у дослідженнях, проведених у держбюджетній НДР «Дослідження методів підвищення ефективності автоматизованого керування тепловою роботою агрегатів великої потужності промислового та побутового призначення» (№ держреєстрації 0122U002601 від 19.05.2022 р.).

Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, які сформульовано та висвітлено в дисертації.

Всі отримані та сформульовані положення наукової новизни та практичної цінності, а також висновки й рекомендації дисертації відповідають чинним вимогам до наукових робіт. Зокрема про це свідчить:

- всебічний інформаційний аналіз і логічне узагальнення відомих науково-прикладних результатів у досліджуваній предметній галузі як на світовому, так і на вітчизняному рівні;
- обґрунтованість науково-прикладної задачі, основної мети, а також об'єкту й предмету досліджень;
- застосування загальноновизнаних і сучасних методів досліджень, а саме: математичне, інформаційне та комп'ютерне моделювання;
- коректність аналітичних і теоретичних припущень;
- збіжність результатів розрахунків та комп'ютерного експерименту;

– лаконічність і змістовність висновків як за окремими розділами, так і загальних по роботі;

– значна кількість апробаційних матеріалів.

Все це дозволяє стверджувати про достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації Сіданченко В.В.

Аналіз змісту, структури та обсягу роботи.

Загальний обсяг роботи становить 153 сторінки, з яких основний текст викладено на 132 сторінках машинописного тексту.

У вступі обґрунтовано актуальність теми досліджень, сформульовано мету, об'єкт, предмет і основні завдання досліджень, обґрунтовано методи досліджень, викладено наукову новизну й практичну значимість одержаних результатів, зазначено особистий внесок здобувача, представлено загальну характеристику та структуру дисертації, а також наведено відомості щодо публікацій і результатів апробації (впровадження) дисертаційної роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи виконано інформаційний аналіз актуального стану проблеми автоматизованого контролю та прогнозу хімічного складу чавуну. Розглянуто «класичні» методи та моделі обробки стохастичних процесів із «гаусівським» (тобто нормальним) розподілом. Розглянуто методи та моделі нелінійної динаміки та детермінованого хаосу. Висунуто гіпотезу про те, що існуючі методи оцінки та прогнозу хімічного складу чавуну, які базуються на «гаусівському» характері стохастичних часових рядів і визначають дані про хімічний склад, неадекватні реальному закону розподілу. Сформульована постановка задач дослідження.

У другому розділі виконано дослідження стохастичних властивостей даних (часових рядів) про хімічний склад чавуну. Доведено «негаусовість» даних часових рядів та обґрунтовано гіпотезу про їх фрактальний характер.

Подальші дослідження фрактальних властивостей часових рядів однозначно підтвердили висунуту гіпотезу. Було встановлено, що автокореляційна функція має так званий «важкий хвіст», тобто не прагне до нуля при наближенні часу спостереження до нескінченності.

Обчислений за допомогою RS-аналізу показник Херста становив величину порядку 0,6189, що свідчить про самоподібну властивість фрактального процесу.

Аналіз часових рядів методами нелінійної динаміки та детермінованого хаосу дозволив отримати принципово нову інформацію (ретроспективний аналіз джерел не показав відсутність прототипів та/або аналогів) про властивості та характеристики досліджуваних часових рядів.

У результаті досліджень було реконструйовано дивний атрактор, отримано фазовий портрет динамічної системи.

Фазовий біфуркаційний аналіз дозволив визначити фазові переходи системи та класифікувати їх як зміни у технології ведення процесу та/або зміни якості сировинних матеріалів доменної плавки.

У третьому розділі розроблено метод оцінки та прогнозу даних про хімічний склад чавуну, виявлення аномалій процесу доменної плавки, запропоновано узагальнену структуру системи управління доменною плавкою на основі автоматизації прийняття рішень майстром/технологом.

Як базовий метод оцінки та прогнозу був використаний алгоритм «калманівської» фільтрації. Цей алгоритм був модифікований для випадку невідомої аналітичної моделі процесу. Модифікація полягає в апроксимації часового ряду в кожній точці відліку рядом Тейлора. Розбіжність оцінки через кінцевий порядок апроксимуючого полінома усувалася за допомогою оригінальної процедури підрахунку статистики, що дозволяє виявити процес розбіжності та ліквідувати його наслідки.

Також у цьому розділі наведено результати прогнозу реальних даних про відсотковий вміст хімічного складу чавуну для таких хімічних елементів, як Si, S, P, Mn. Порівняльний аналіз із результатами інших авторів показав, що точність прогнозу запропонованим методом суттєво перевищує відомі результати. Оскільки запропонований метод обробки є інваріантним до характеру процесів, що протікають, інші компоненти хімічного аналізу можуть бути визначені аналогічно.

У загальних висновках наведено основні кількісні та якісні результати дисертаційного дослідження.

У додатках наведено список публікацій здобувача за темою дисертації, акти впровадження та використання результатів дисертаційного дослідження, а також програмне забезпечення розробленого алгоритму оцінки та прогнозу відсоткового вмісту хімічного складу чавуну.

У результаті аналізу змісту дисертаційної роботи Сіданченко В.В. встановлено, що вона повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 - «Автоматизація та приладобудування» для третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти та ОНП спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

На підставі перевірки дисертації на вимоги доброчесності встановлено, що ця робота Сіданченко В.В. є результатом оригінальних і самостійних досліджень. Вона не містить елементів фальсифікації, фабрикації та текстових запозичень без посилань на відповідні джерела.

Отже, можна констатувати, що дисертація Сіданченко В.В. є завершеним, оригінальним, змістовним, логічним і структурованим науково-прикладним дослідженням, що дозволило йому в повному обсязі розкрити тему дослідження та досягти поставленої мети.

Мова та стиль викладання результатів.

Дисертація Сіданченко В.В. написана українською мовою. Стиль викладення матеріалів досліджень у цілому є лаконічним, структурованим, чітким і логічним.

Повнота викладу основних положень дисертації в опублікованих наукових працях.

За темою дисертаційного дослідження здобувач Сіданченко В.В. опублікував 11 наукових праць, серед яких 3 статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б»; 3 статті опубліковано на тему дисертації (1 стаття в періодичному виданні, що включене до наукометричної бази Scopus, 2 одноосібних статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б»); 5 тез доповідей на Всеукраїнських і Міжнародних конференціях (у тому числі, 2 у наукометричній базі Scopus).

Загалом кількість і тип друкованих праць відповідає актуальним вимогам Міністерства освіти і науки України (МОНУ) щодо публікацій основного змісту дисертації на здобуття ступеня доктора філософії. Змістовна наповненість та тематика опублікованих наукових праць дозволяє стверджувати, що наукові результати, які виносяться на захист, було повністю охоплено і висвітлено в публікаціях.

Зауваження та дискусійні положення.

1. В описі актуальності роботи (с.23-25), науковій новизні, висновках до основних розділів (1-3) та загальних висновках (с.125-126) не наводяться найбільш важливі чисельні показники, які досягнуті автором дослідження (наприклад, за точністю, ефективністю, стійкістю тощо).

2. Автором сформульовано 6 задач дослідження у вступі (с.26) та наприкінці розділу 1 (с.63-64), але при цьому дисертація містить лише 3 основних розділи. Тому доцільно було б об'єднати задачі за відповідними розділами для більш кращого сприйняття дисертації.

3. Підрозділи пп.1.4-1.6 дещо перевантажені зайвими теоретичними відомостями загальнонаукового та навчально-методичного характеру. Те саме можна зазначити стосовно початку основних розділів 2 та 3.

4. У дисертації недостатню увагу приділено питанням розробки рекомендацій щодо питань контролю, автоматизації прийняття рішень та управління процесом доменної плавки.

5. При аналізі ефективності авторського методу прогнозування додатково було б доцільним дослідити також потенційні результати його роботи за відомої еталонної моделі сигналу (бажано декількох типів) та різного рівня шумів.

6. Дисертантом проведено (пп.3.3) порівняльний аналіз результатів прогнозування лише з двома відомими підходами (КІХ-фільтри та прості нейронні мережі на основі персептрону). З метою глибшого аналізу ефективності отриманих методів слід було б розглянути більш потужні підходи (наприклад, згорткові нейромережі з глибоким навчанням).

7. Твердження та подальші докази автора (починаючи з с.119) щодо можливості адекватного прогнозування власними підходами більше ніж на 1-2 кроки наперед в умовах нестаціонарності та навіть хаосу виглядають дещо сумнівними. Мабуть це вимагає більш ретельної перевірки на альтернативних технологічних вибірках типу BigData.

8. На думку опонента, для покращення загальної структури роботи було б доцільно наявні матеріали, починаючи з пп.3.5 і далі, винести до окремого основного 4-го розділу (наприклад, як елементи системи інтелектуального прийняття рішень майстром-технологом або диспетчером на основі виявлення чи прогнозу аномалій, промислові випробування або апробація, впровадження тощо).

9. Окремі висновки до розділу №3 (2-4, с.124) та четвертий висновок у підвисковій частині (с.126) мають характер простих анотацій. Крім того,

зважаючи на досить велику кількість вагомих наукових та прикладних результатів, отриманих автором у роботі, загальних висновків можна було б сформулювати більше (зараз їх лише 4).

10. У роботі також присутні: деякі неточності застосування спеціальної термінології (наприклад, «математичне очікування» замість «математичне сподівання», с.96, с.99, с.138), «русизми» («таким чином», с.27, с.58, с.82 тощо), небажані застосування прийменника «по» (с.31, с.33, с.39 тощо), друкарські помилки (с.91, рис.2.10 замість 2.14; с.124, два висновки з №3), а також на графіках автором не завжди наводяться відповідні одиниці вимірювання (наприклад, рис. 2.12 на с.86, рис. 2.14? чи 2.10 на с.91).

Разом з цим зазначені зауваження істотно не впливають на загальний високий науковий рівень дисертаційної роботи та не знижують її науково-практичну цінність. Ці зауваження переважно носять уточнюючий характер та/або показують перспективу подальшого розвитку результатів досліджень автора у майбутньому.

Висновок.

На підставі детального аналізу дисертації та наукових публікацій здобувача Сіданченко Владислава Вадимовича, а також приймаючи до уваги актуальність теми роботи, положення наукової новизни, практичну значущість, показники обґрунтованості та достовірності одержаних результатів і сформульованих висновків по роботі, вважаю, що його дисертація «Автоматизований метод оцінки та прогнозу хімічного складу чавуну на випуску доменної печі» є завершеним, самостійним і вагомим дослідженням, що присвячене вирішенню важливої науково-прикладної задачі підвищення достовірності і точності автоматизованої оцінки шляхом прогнозу нестационарних часових рядів даних про хімічний склад чавуну за умов неможливості отримання аналітичної моделі.

Зазначаю, що дисертація Сіданченко Владислава Вадимовича відповідає вимогам пунктів 5–8 Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», а також Наказу Міністерства освіти та науки від 12.07.2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Отже, вважаю, що Сіданченко Владислав Вадимович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії (Ph.D.) за спеціальністю 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Офіційний опонент,
завідувач кафедри комп'ютерних
систем та мереж Криворізького
національного університету,
доктор технічних наук, професор



Андрій КУПШ