

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора **ЖУЧЕНКА** **Анатолія Івановича**

на дисертацію **ПАВЛОВА** **Сергія Григоровича**

на тему: **«Інтелектуальна комп'ютерно-інтегрована система**

моніторингу параметрів виробництва біогазу»,

подану на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування»

Актуальність теми дослідження. Дисертаційне дослідження Павлова Сергія Григоровича присвячене актуальній науково-прикладній проблемі підвищення ефективності моніторингу параметрів виробництва біогазу шляхом розроблення інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи, що поєднує засоби Інтернету речей, комп'ютерного зору, хмарних технологій та машинного навчання.

Актуальність обраної теми зумовлена необхідністю розвитку відновлюваної енергетики, підвищення енергетичної незалежності та пошуку ефективних технологічних рішень для стабілізації процесів анаеробного зброджування. Виробництво біогазу є складним біотехнологічним процесом, параметри якого мають нелінійний характер, залежать від якості біосировини, температурних режимів, кислотності середовища, складу субстрату та інших чинників. Нестабільність цих параметрів призводить до зниження виходу біогазу та погіршення економічної ефективності функціонування біогазових установок.

Традиційні підходи до контролю технологічного процесу, що ґрунтуються переважно на періодичних лабораторних вимірюваннях, не забезпечують достатньої оперативності прийняття управлінських рішень та не дають змоги повною мірою враховувати складні взаємозв'язки між технологічними показниками. У цьому контексті розроблення комп'ютерно-інтегрованої системи, здатної забезпечувати автоматизований збір, обробку, аналіз, прогнозування та візуальне оцінювання стану біосировини, є своєчасним і важливим науково-технічним завданням.

Запропонований здобувачем підхід відповідає сучасним тенденціям цифровізації агропромислового виробництва, розвитку інтелектуальних систем моніторингу та впровадження технологій підтримки прийняття рішень у сфері відновлюваної енергетики. З огляду на зазначене, тема дисертації є актуальною, має важливе наукове та практичне значення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій дисертації. Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертації Павлова Сергія Григоровича, є достатньо обґрунтованими, логічно взаємопов'язаними та підтверджуються результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень.

Структура роботи є послідовною та відповідає поставленій меті, яка полягає у підвищенні ефективності моніторингу параметрів виробництва біогазу шляхом розроблення інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи з використанням технологій IoT, комп'ютерного зору та машинного навчання.

Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням методів системного аналізу, математичного моделювання, машинного навчання, комп'ютерного зору, статистичної обробки даних, а також експериментальною апробацією окремих підсистем розробленої системи. У роботі здійснено аналіз виробництва біогазу як об'єкта автоматизації, розроблено архітектуру апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролерів ESP32 та хмарної інфраструктури AWS, запропоновано підсистему аналізу якості біосировини за зображеннями, синтезовано підсистему прогнозування виходу біогазу та виконано інтеграцію компонентів системи.

Позитивним є те, що дисертант не обмежився лише теоретичним описом запропонованих рішень, а довів їх до рівня програмно-апаратної реалізації, що охоплює збір даних, їх передавання, зберігання, обробку, прогнозування та представлення результатів користувачу. Така послідовність дослідження свідчить про завершеність роботи та достатній рівень обґрунтованості одержаних результатів.

Новизна основних наукових положень, висновків і рекомендацій. Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у розробленні та обґрунтуванні комплексу науково-технічних рішень, спрямованих на створення інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу параметрів виробництва біогазу.

До найбільш вагомих результатів, що характеризують наукову новизну роботи, слід віднести розроблення тривірневої архітектури комп'ютерно-інтегрованої системи типу Edge-Cloud-Intelligence на базі мікроконтролерів ESP32 та хмарної інфраструктури AWS. Така архітектура забезпечує автоматизований збір технологічних даних, їх передавання, централізоване зберігання та подальшу інтелектуальну обробку.

Важливим науковим результатом є удосконалення методу автоматизованої оцінки якості біосировини на основі аналізу зображень із застосуванням алгоритму сегментації Оцу, попереднього покращення контрасту за допомогою CLAHE та гібридної метрики якості на базі функції бажаності Харрінгтона. Запропонований підхід дає змогу формалізувати візуальні ознаки стану біосировини та використовувати їх як складову інформаційного забезпечення прогнозування.

Подальшого розвитку набув метод прогнозування виходу біогазу на основі ансамблю моделей, що поєднує LSTM для аналізу часових рядів, XGBoost для опрацювання табличних технологічних даних та ResNet-50 для отримання візуальних ознак. Схема інтеграції

результатів прогнозування забезпечує комплексне врахування різномірних даних біогазової установки.

Окремої уваги заслуговує запропонований механізм адаптивного донавчання системи за принципом Human-in-the-Loop, який створює передумови для подальшого покращення точності прогнозів в умовах зміни властивостей сировини, режимів експлуатації та технологічних параметрів процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідної роботи Національного університету біоресурсів і природокористування України та спрямоване на розвиток сучасних методів автоматизації технологічних процесів у сфері відновлюваної енергетики. Тематика роботи узгоджується з актуальними напрямками розвитку комп'ютерно-інтегрованих технологій, інтелектуальних систем керування та цифрових засобів моніторингу складних технологічних об'єктів.

Спрямованість дисертації на автоматизацію контролю параметрів виробництва біогазу, використання хмарних сервісів, сенсорних мереж, алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання підтверджує її відповідність сучасним науковим і прикладним завданням спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Практичне значення та впровадження результатів дослідження. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи для моніторингу та прогнозування параметрів виробництва біогазу на установках різної потужності та конфігурації. Запропоноване рішення може сприяти підвищенню стабільності технологічного процесу, зниженню витрат на лабораторний контроль, оперативнішому виявленню відхилень та підвищенню ефективності виробництва біогазу.

Практично цінним є використання доступної апаратної платформи на базі ESP32, що потенційно зменшує вартість впровадження системи порівняно з окремими комерційними аналогами. Інтеграція з хмарною інфраструктурою забезпечує масштабованість, централізоване зберігання даних, можливість подальшого розширення функціональності та використання результатів моніторингу для підтримки прийняття управлінських рішень.

Результати дисертаційного дослідження можуть бути використані у практиці експлуатації біогазових установок, під час проєктування автоматизованих систем моніторингу агробіотехнологічних процесів, а також у навчальному процесі при підготовці фахівців з автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій, інтелектуальних систем керування та відновлюваної енергетики.

Повнота викладення основних наукових результатів в опублікованих працях. Основні наукові положення, висновки та практичні результати дисертаційного дослідження

достатньо повно відображено у наукових публікаціях здобувача. Згідно з поданими матеріалами, результати дослідження висвітлено у 13 наукових працях, з яких 2 статті у наукових виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, 4 статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України, 7 тез наукових доповідей.

Зміст опублікованих праць відповідає темі дисертації та охоплює ключові положення дослідження, зокрема питання побудови комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу, використання методів комп'ютерного зору для оцінювання стану біосировини, застосування моделей машинного навчання для прогнозування виходу біогазу та інтеграції програмно-апаратних компонентів системи. Це свідчить про належний рівень апробації результатів та відповідність публікаційної активності здобувача чинним вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. Дисертація Павлова Сергія Григоровича є самостійно виконаною кваліфікаційною науковою працею. У роботі належним чином використано результати інших авторів із посиланнями на відповідні джерела, дотримано вимог наукової етики та академічної доброчесності. За результатами аналізу поданих матеріалів підстав для встановлення фактів академічного плагіату, некоректних запозичень чи інших порушень академічної доброчесності не виявлено.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації. Дисертація виконана на належному науково-технічному рівні та має завершений характер. Водночас окремі положення роботи можуть бути предметом наукової дискусії або розглядатися як напрями подальшого розвитку дослідження:

1. У роботі доцільно було б розширити експериментальну базу шляхом валідації запропонованих моделей на незалежних наборах даних, отриманих з інших біогазових установок або за інших режимів експлуатації. Це дозволило б додатково підтвердити узагальнювальну здатність розробленої системи.

2. Значну увагу в дисертації приділено хмарній інфраструктурі AWS. Водночас було б корисно детальніше розкрити можливість функціонування системи в автономному або локальному режимі на базі власного серверного обладнання у випадках нестабільного інтернет-з'єднання чи підвищених вимог до збереження даних.

3. Доцільним є подальше порівняння запропонованого ансамблю моделей із сучасними архітектурами прогнозування часових рядів, зокрема трансформерними підходами, що дало б змогу повніше оцінити переваги та обмеження обраної структури прогнозної підсистеми.

4. У подальших дослідженнях варто деталізувати особливості передавання даних при використанні альтернативних до Wi-Fi протоколів зв'язку для територіально розподілених біогазових установок.

Зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційного дослідження, мають переважно дискусійний характер і можуть бути враховані здобувачем у подальших наукових дослідженнях та практичному розвитку запропонованої системи.

Загальний висновок. Дисертація Павлова Сергія Григоровича на тему: «Інтелектуальна комп'ютерно-інтегрована система моніторингу параметрів виробництва біогазу» є завершеною, самостійно підготовленою кваліфікаційною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані та практично цінні результати, що вирішують важливе наукове завдання у галузі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Актуальність обраної теми, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, наукова новизна, практичне значення та повнота викладення результатів в опублікованих працях відповідають вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», а також 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 року, а здобувач Павлов Сергій Григорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Офіційний опонент професор кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», доктор технічних наук, професор
Анатолій ЖУЧЕНКО