

РЕЦЕНЗІЯ

професора кафедри конструювання машин і обладнання
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
доктора технічних наук, професора **РОМАСЕВИЧА Юрія Олександровича**
на дисертацію **ПАВЛОВА Сергія Григоровича**
«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»

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасний стан розвитку енергетичної галузі характеризується стійкою тенденцією до диверсифікації джерел енергії та збільшення частки відновлюваних енергоресурсів. Проблемна ситуація полягає у тому, що анаеробне зброджування є складним нелінійним біологічним процесом, чутливим до змін параметрів середовища, що часто призводить до нестабільності виробництва та зниження виходу біогазу. Традиційні методи контролю, що базуються на лабораторних аналізах, не дозволяють здійснювати моніторинг у реальному часі та суттєво підвищують операційні витрати.

У дисертації Павлова Сергія Григоровича запропоновано комплексне вирішення зазначеної науково-прикладної задачі шляхом розроблення інтелектуальної комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу, що поєднує технології інтернету речей, комп'ютерного зору та машинного навчання. Такий підхід дозволяє забезпечити повний цикл роботи з даними біогазової установки – від їх автоматизованого збору та зберігання до аналітичної обробки, прогнозування та підтримки прийняття управлінських рішень. З огляду на зазначене, тема дисертаційного дослідження є беззаперечно актуальною.

Дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідницької роботи Національного університету біоресурсів і природокористування України та спрямоване на розвиток методів автоматизації технологічних процесів у сфері відновлюваної енергетики. Тематика дослідження відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки в Україні «Енергетика та енергоефективність» та «Інформаційні та комунікаційні технології».

Ступінь обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Дисертація характеризується системним підходом до дослідження поставленої науково-прикладної задачі, логічною структурою та послідовністю викладу матеріалу. Усі наукові положення, висновки та рекомендації базуються на коректному використанні методів математичного моделювання, машинного навчання, аналізі сучасних наукових джерел та результатах експериментальних досліджень.

Наукова новизна дисертаційного дослідження полягає у наступному:

Вперше:

- розроблено трирівневу архітектуру комп'ютерно-інтегрованої системи моніторингу біогазового виробництва, що забезпечує інтеграцію апаратного рівня збору даних, хмарного рівня обробки та рівня інтелектуального аналізу в єдиному рішенні з підтримкою масштабування та резервування;

- запропоновано гібридний підхід до інтегральної оцінки якості біосировини, що поєднує евклідову метрику відстані до еталонних значень текстурних ознак та функцію бажаності Харрінгтона, що забезпечує кореляцію з фактичним виходом біогазу $r=0,81$;

- обґрунтовано архітектуру ансамблю нейронних мереж для прогнозування виходу біогазу, що поєднує LSTM для часових рядів, XGBoost для табличних даних та ResNet-50 для візуальних ознак із механізмом зваженого ансамблювання, що забезпечує точність $R^2=0,91$ та $RMSE=0,35 \text{ м}^3/\text{добу}$;

- розроблено механізм адаптивного донавчання Human-in-the-Loop, що забезпечує автоматичну адаптацію прогнозних моделей до змінних умов експлуатації на основі зворотного зв'язку від оператора з покращенням точності на 42,6 % після першого циклу донавчання.

Удосконалено комбінований алгоритм збору та первинної обробки даних для біогазових установок, що поєднує медіанну фільтрацію, метод IQR для виявлення аномалій, локальну буферизацію та експоненційний бекоф для повторних спроб передачі, що забезпечує надійність збору даних 98,6 %.

Набули подальшого розвитку:

- методологія застосування комп'ютерного зору для аналізу якості біосировини шляхом інтеграції статистичного аналізу текстур з функцією бажаності Харрінгтона;

- методологія ансамблевого машинного навчання для прогнозування нелінійних біотехнологічних процесів шляхом інтеграції рекурентних мереж, градієнтного бустингу та згорткових мереж з механізмом адаптивного донавчання.

Достовірність отриманих результатів підтверджується експериментальною апробацією розробленої системи, результатами тестування її окремих підсистем, а також публікаціями у фахових наукових виданнях і матеріалах міжнародних конференцій.

Значення одержаних результатів для науки й практики та рекомендації щодо їх можливого використання. Результати дисертаційного дослідження мають важливе теоретичне та практичне значення. Розроблена комп'ютерно-інтегрована система може бути використана для моніторингу та прогнозування параметрів виробництва біогазу на установках різної потужності та конфігурації.

Практичне впровадження розробленої системи сприятиме підвищенню ефективності функціонування біогазових установок, зниженню витрат на лабораторний контроль та підвищенню стабільності виходу продукту. Розроблене рішення характеризується низькою собівартістю апаратної частини порівняно з існуючими комерційними аналогами. Отримані наукові результати також можуть бути використані у навчальному процесі під час підготовки фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності в цілому і оформлення. Дисертація є цілісним, логічно побудованим і завершеним науковим дослідженням. Робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків і загалом налічує 274 сторінки, 215 посилань на використані джерела, 40 ілюстрацію та 29 таблиць.

У **першому розділі** проведено комплексний аналіз виробництва біогазу як об'єкта автоматизації та розглянуто суміжні питання, пов'язані з технічною реалізацією систем моніторингу. Розділ включає детальний огляд існуючих методів контролю якості біосировини, аналіз обмежень традиційних лабораторних методів аналізу, що вимагають часу на реалізацію результатів і суттєво збільшують операційні витрати установок. Розглянуто технічні характеристики сучасних систем моніторингу біогазових установок, виявлено їх недоліки та визначено напрями розвитку інтелектуальних рішень на основі Інтернету речей та машинного навчання.

У **другому розділі** розроблено архітектуру апаратно-програмного комплексу на базі мікроконтролерної платформи ESP32 та інтегровано з хмарною інфраструктурою AWS для забезпечення надійного збору, зберігання та обробки великих обсягів даних. Описано апаратну частину системи з використанням спеціалізованих давачів (датчики температури, вологості, рівня рідини), модулю комп'ютерного зору для автоматичної оцінки якості біосировини, та відповідних вузлів комунікацій. Розроблено програмне забезпечення нижнього рівня (firmware) для мікроконтролера, що забезпечує автоматичну ідентифікацію давачів, обробку аналогових та цифрових сигналів в реальному часі. Визначено архітектуру хмарної інфраструктури з використанням сервісів AWS (S3 для зберігання даних, Lambda для обробки, DynamoDB для каталогізації).

Третій розділ присвячено розробленню підсистеми аналізу якості сировини на основі комп'ютерного зору, яка забезпечує автоматизовану оцінку візуальних характеристик біоматеріалу та їх кореляцію з основними показниками якості. У розділі розглянуто алгоритми попередньої обробки зображень, застосовано методи бінаризації за Оцу для виділення релевантних областей, розроблено гібридну метрику якості на основі функції бажаності Харрінгтона. Описано експериментальний процес створення навчальної вибірки з 26 зображень

біоматеріалу у різних умовах культивування, проведено статистичний аналіз та визначено кореляцію між візуальними ознаками та фактичним виходом біогазу. Розраховано параметри регресійних моделей, які дозволяють прогнозувати базові показники якості сировини.

У **четвертому розділі** виконано синтез підсистеми прогнозування виходу біогазу та інтеграцію усіх компонентів системи у єдиний кінцевий продукт. Розроблено ансамбль нейронних мереж, що включає рекурентну мережу LSTM для аналізу часових рядів технологічних параметрів, згорткову нейронну мережу ResNet-50 для обробки візуальних ознак біосировини, та алгоритм XGBoost для синтезу табличних даних (температура, pH, склад субстрату тощо). Реалізовано механізм адаптивного донавчання (Human-in-the-Loop), який забезпечує безперервне покращення точності прогнозів при зміні умов експлуатації установки. Описано процес навчання ансамблю на історичних даних тривалістю 18 місяців.

У **п'ятому розділі** наведено комплексне техніко-економічне обґрунтування розробленої системи. Розраховано вартість апаратної частини (4500 грн), яка менша порівняно з комерційними аналогами. Визначено залежність загальної вартості системи та показано, що навіть при врахуванні хмарних сервісів AWS річна вартість експлуатації системи на 30–40 % менша за операційні витрати на традиційний лабораторний контроль. Проведено розрахунок економічного ефекту: річний економічний ефект оцінюється в 339000–498000 грн при терміні окупності 1,6–2,3 місяця, що демонструє високу комерційну привабливість розробленого рішення.

Повнота викладення матеріалів досліджень в опублікованих наукових працях. Результати наукового пошуку здобувача обговорювалися та отримали позитивні відгуки на науково-практичних конференціях різного рівня. Основні положення дисертації висвітлено у 13 наукових публікаціях, 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. Кількість публікацій, їх обсяг, якість та повнота висвітлення результатів відповідають чинним вимогам.

Відсутність (наявність) порушення академічної доброчесності. Дисертація є самостійно написаною кваліфікаційною науковою працею із науково обґрунтованими висновками та рекомендаціями. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів супроводжується посиланнями на відповідні джерела. Таким чином, у дисертаційному дослідженні Павлова Сергія Григоровича відсутні порушення академічної доброчесності.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертації. Дисертація Павлова Сергія Григоровича виконана на високому науково-технічному рівні та має завершений характер.

Водночас окремі положення можуть бути предметом наукової дискусії або розглядатися як напрями подальшого розвитку дослідження, що не знижує загальної наукової та практичної цінності роботи.

1. У розділі 1 дисертації доцільно було б провести більш глибокий аналіз науково-прикладних результатів за темою роботи, вказавши які проблеми відносяться до інженерної, а які до наукової сфер. Це дало б змогу більш ґрунтовно пов'язати мету роботи з невирішеними науковими питаннями даного напрямку.

2. У підрозділі 2.2 «Розробка програмного забезпечення нижнього рівня» всі коди, які зображені на рисунках, варто було б перенести у Додатки, натомість навівши структурно-функціональну схему взаємодії програмних блоків, як це зроблено на рис. 2.10. Це дало б змогу краще зрозуміти принципи побудови програмної частини. Крім того, цей пункт перевантажений зайвими описами сервісів та інфраструктури зберігання і обробки даних.

3. У розділі 3 варто було б на початку вказати, які показники якості біосировини планується оцінювати і яким чином вони можуть бути пов'язані із візуальними ознаками, що отримуються за допомогою технологій комп'ютерного зору. Також варто навести обґрунтування об'єму експериментальної вибірки (26 зображень біоматеріалу).

4. У розділі 4 варто було б обґрунтувати ознаки, які подаються на вхід штучної нейронної мережі, розмірність вікна уваги, її архітектуру та параметри навчання мереж. Те ж саме відноситься до алгоритму XGBoost.

5. У підрозділі 4.3 «Організація та результати експериментального дослідження» варто було б чітко вказати на об'єкти експериментального дослідження (локація, технічні характеристики, субстрат), сети експериментальних даних та більш детально розкрити як отримано узагальнені оцінки RMSE, R^2 , MAE якості прогнозів моделей А, Б, В.

6. У розділі 5 проведено техніко-економічне обґрунтування системи, за яким вартість апаратної частини становить 4500 грн, що в 50–200 разів менше комерційних аналогів (MRU OPTIMAX, AWIFLEX, SSM 6000 Classic). Однак, більш коректною було б порівняння загальної вартості розробленої системи (апаратне та програмне забезпечення) із вартістю аналогів.

7. Підрозділ 2.1 «Архітектура апаратного рівня для збору даних», пункт 4.1.2 «Вибір та обґрунтування архітектури ансамблю нейронних мереж» містить описи технічних засобів, технологій та алгоритмів, які недоцільно наводити оскільки вони загальновідомі. Це саме стосується формул коефіцієнта варіації (3.2), середнього значення (3.6), (3.8) та стандартного відхилення (3.7), (3.9), коефіцієнта детермінації (4.30), середньоквадратичної помилки (4.31), середньої абсолютної помилки (4.32), формул, які описують алгоритми LSTM, XGBoost, Adam (4.2)-(4.21), (4.27)–(4.29) тощо.

Водночас, вищенаведені зауваження істотно не впливають на результати роботи, яка в цілому є новим, актуальним та змістовним дослідженням. Зауваження мають переважно дискусійний характер.

Загальний висновок. Дисертація на тему: «Інтелектуальна комп'ютерно-інтегрована система моніторингу параметрів виробництва біогазу» є завершеним, цілісним, самостійним науковим дослідженням, яке має наукову новизну, теоретичне та практичне значення. Робота повністю відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), 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 (зі змінами), а її автор Павлов Сергій Григорович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування».

Рецензент професор кафедри конструювання машин і обладнання Національного університету біоресурсів і природокористування України, доктор технічних наук, професор Юрій РОМАСЕВИЧ