

## ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Гураль Ірини Володимирівни на тему:  
«Інтервальне моделювання процесів у біогазових установках в умовах  
структурної та параметричної невизначеності», подану на здобуття  
наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю  
01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

### **Актуальність теми дисертації**

При вивченні та дослідженні процесів у біогазових установках на основі спостережень за входними змінними та характеристиками процесів, одним із альтернативних підходів до моделювання цих процесів є використання дискретних динамічних моделей (ДДМ). Дисертаційна робота присвячена актуальним питанням моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на основі експериментальних даних, отриманих з відомими похибками вимірювань. Побудова математичних моделей таких процесів містить два основних етапи: структурна і параметрична ідентифікація.

Задача параметричної ідентифікації ДДМ зазвичай розв'язується на основі випадкового пошуку з використанням інтервального аналізу даних, яка зводиться до розв'язування інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь. Відомо, що розв'язок цієї задачі має вигляд неопуклої та незв'язної області оцінок параметрів такої моделі, що призводить до множини розв'язків подання кожного з шуканих значень параметрів інтервальної ДДМ.

Наявні методи розв'язування задачі структурної ідентифікації ДДМ на основі алгоритму бджолиної колонії у разі інтервальних даних мають надзвичайно високу обчислювальну складність. У роботі забезпечено зниження обчислювальної складності методу структурної ідентифікації ІДДМ за допомогою введення нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару», а також розроблення нового методу параметричної ідентифікації, який базується на інтервальному поданні параметрів моделі, що забезпечує отримання множини адекватних моделей з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень.

З огляду на це, тема цієї роботи є актуальною, оскільки вона спрямована на вирішення завдання створення комплексу ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях на основі розроблення і застосування методів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолиної колонії.

### **Структура та зміст дисертаційної роботи**

Робота складається з анотації, вступу, логічно скомпонованих чотирьох розділів, списку використаних джерел та двох додатків.

В анотації подано основний зміст роботи з короткою характеристикою кожного розділу.

У *вступі* відзначено актуальність проблеми, обґрунтовано мету і основні завдання досліджень. Описано зв'язок роботи з науковими програмами. Сформульовано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів у роботі та їх застосування. Зазначено дані про публікації, особистий внесок автора в них, апробацію результатів роботи.

У *першому розділі* проаналізовано моделі процесів у біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння. Встановлено, що для ефективного управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння потрібно будувати та застосовувати дискретні математичні моделі динаміки для різних стадій процесу. Проведено аналіз відомих методів структурної і параметричної ідентифікації цих моделей і встановлено, що для розв'язання задачі ідентифікації параметрів на основі аналізу інтервальних даних слід розробити метод випадкового пошуку для випадку з інтервальним представленням параметрів. Обґрунтовано використання методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолиної колонії у поєднанні з методом параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів.

У *другому розділі* запропоновано та описано новий метод та обчислювальний алгоритм параметричної ідентифікації ДДМ з інтервальним представленням параметрів, який забезпечує отримання множини адекватних моделей із заданою точністю з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та обмежених за амплітудою похибок у результатах спостережень.

У *третьому розділі* удосконалено метод структурної ідентифікації ДДМ на основі аналізу інтервальних даних з використанням поведінкових моделей бджолиної колонії. У цьому методі обґрунтовано використання нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у вигляді квадратичної залежності між кількістю нових варіантів структур моделей, згенерованих з незначними відхиленнями від поточної попередньої структури, та значенням функції мети для цієї структури. Це підвищує ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації, що, як показано на тестових прикладах для різницевого рівнянь з різною кількістю елементів, знижує обчислювальну складність його реалізації. Розроблено блок-схему алгоритму реалізації удосконаленого методу структурно-параметричної ідентифікації ІДДМ, функціональну модель відповідного програмного комплексу та побудовано програмний комплекс для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на всіх його стадіях.

У *четвертому розділі* уперше отримано комплекс адекватних математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Отримані ДДМ ураховують розкид технологічних параметрів, кислотності середовища та температури, а також похибки в результатах спостережень, що забезпечує можливість коригування протікання процесу після кожної стадії процесу в біогазових установках. Такі ІДДМ забезпечують гарантовані прогностичні властивості для різних умов анаеробного мікробіологічного бродіння та адекватно описують динаміку відповідних процесів навіть у випадку незначної зміни початкових умов за межами інтервалів, які використано як початкові умови для ідентифікації цих моделей.

Дисертація і автореферат роботи оформлені в основному згідно з чинними вимогами до кандидатських дисертацій. Автореферат загалом коректно відображає суть основних наукових положень і результатів, практичну значущість та висновки.

### **Ступінь обґрунтованості та вірогідності наукових положень, висновків і рекомендацій**

Основні наукові результати дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими логічно, теоретично, а також за допомогою комп'ютерного моделювання на тестових і реальних задачах. Їх вірогідність забезпечується використанням методів теорії ідентифікації дискретних динамічних моделей, аналізу інтервальних даних, математичного програмування для розв'язуванням інтервальних систем нелінійних алгебричних рівнянь, стохастичного програмування та теорії самоорганізації систем, а саме поведінкових моделей бджолої колонії, а також сучасних підходів до проектування програмного комплексу реалізації алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації.

### **Наукова новизна результатів**

Основними науковими результатами роботи можна вважати такі:

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від наявних, забезпечує отримання множини адекватних моделей з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень;

2. Вперше отримано адекватні математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на різних стадіях, які, на відміну від відомих, ураховують інтервальну невизначеність параметрів, що забезпечує можливість коригування перебігу процесу після кожної стадії в біогазових установках та належність результатів спостереження заданим інтервалам;

3. Удосконалено метод структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі аналізу інтервальних даних з використанням поведінкових моделей бджолої колонії, у якому, на відміну від аналога, запропоновано нелінійний оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару», що дозволило підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації та знизити обчислювальну складність його реалізації.

### **Повнота викладу наукових результатів в опублікованих працях**

За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, з них 1 у науковому періодичному закордонному виданні та 7 у фахових виданнях України, 2 з яких входять до наукометричної бази Index Copernicus, а також 8 публікацій у матеріалах конференцій, 2 з яких входять до наукометричної бази Scopus. У цих публікаціях достатньо повно викладено всі основні результати дисертаційних досліджень, що виносяться на захист.

### **Практичне значення отриманих результатів та їх використання**

Розроблені математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу з гарантованими

прогностичними властивостями, які враховують розкид технологічних параметрів та похибки у результатах спостережень, використано на діючій біогазовій установці лабораторії «Технології виробництва біогазу» Бережанського агротехнічного інституту та на базі комунального підприємства «Тернопільміськтеплокомуненерго» для оцінювання потенційних можливостей ресурсів при плануванні створення біогазової установки в м. Тернополі. Розроблені моделі дають можливість коригувати процес анаеробного мікробіологічного бродіння після кожної стадії в біогазових установках.

### **Недоліки роботи і зауваження до форми та змісту викладених матеріалів**

1. Автор вважає можливим «коригування протікання процесу після кожної стадії» (с. 22), але не пояснює, чи є для цього технічні можливості у реальних біогазових установках.

2. Пояснюючи обчислювальну схему для отримання наближень до інтервальних оцінок розв'язків ІСНАР (2.5) на с. 71-72, автор зазначає: «Умовою завершення ітерацій є вичерпання кількості ітерацій «розширення» інтервалів». Очевидне запитання: як задавати цю кількість ітерацій і що робити, якщо вона недостатня для отримання розв'язку?

3. При описі методу випадкового пошуку екстремуму функції на основі напрямного конуса на с. 42 немає пояснення, як визначати кут розкриття  $\psi$  гіперконуса і вектор напрямної осі  $\vec{w}$ .

4. На с. 74 цей вектор напрямної осі  $\vec{w}$  вже названо «вектор пам'яті, який визначає правильний напрям пошуку»; але застосування тут терміну «пам'ять» виглядає недоречним, адже вираз (2.30) – це звичайна формула коригування напрямку пошуку.

5. У 4-му розділі у трьох прикладах застосування методу структурної ідентифікації зовсім незрозуміло, з яких міркувань призначались кількість  $L$  множини структурних елементів  $F$ , число ітерацій  $MCN$ , число локальних ітерацій  $LIMIT$ , початкова кількість структур  $S$ , межі складності моделей тощо (с. 111, 116, 120), а тут безумовно потрібні чіткі рекомендації для користувача розроблених програмних засобів.

6. Помилки в математичних виразах на с. 94:

- вираз  $\Lambda_{mcp}^2 = \{\lambda_1^1 \cup \lambda_2^1 \dots \cup \dots \lambda_s^1 \dots \cup \lambda_s^1\}$ ,  $s=1 \dots S$ . некоректний – адже немає операції об'єднання елементів;

- у виразі  $\lambda_s^2 \in \lambda_{mcp}^2$  справа має бути  $\Lambda_{mcp}^2$ .

7. Некоректні твердження автора:

- «Математична модель – це найважливіший інструмент об'єкта чи процесу методу математичного моделювання» (с. 33): модель – це не «інструмент», а результат моделювання; тим більше це не «інструмент об'єкта»; і що таке «процесу методу»?

- «У МГУА не існує єдиного загального правила завершення процедури структурної ідентифікації» (с. 44); але ж далі пояснюється чітке правило зупинки за умовою зростання критерію, і саме воно є «єдиним» і цілком

«загальним»; при цьому дається некоректне посилання на джерела [131, 132, 134] – які ніяк не пов'язані з МГУА.

- на с. 83 є посилання на незрозумілу «теорію множинності моделей [136]» – але такої «теорії» насправді немає, це просто властивість, органічно притаманна цьому класу задач структурно-параметричної ідентифікації в умовах інтервальної невизначеності.

8. У тексті роботи зустрічаються некоректні терміни: «пошук із адаптацією розподілення випадкового кроку» (с. 41) – має бути «розподіл»; «не опукла (в загальному випадку розірвана) область» (с. 61) – краще «незв'язна».

9. Зауваження щодо оформлення тексту дисертації:

- незручні посилання на літературу внаслідок її оформлення в алфавітному порядку, а не в порядку посилань;
- помилки посилань на таблиці: таблиці 1 замість 2.1 на с. 59; табл. 3.2 замість 4.2 на с. 111; табл. 4.5 замість 4.4 на с. 116;
- розділ 4 некоректно названо «Застосування методів ідентифікації параметрів дискретних динамічних моделей ...» - адже там вагоме місце займають і задачі структурної ідентифікації
- повністю однакові назви параграфів 4.1 та 4.2
- викладене на стор. 123-127 «дослідження впливу вибору початкових умов на зміну характеру модельованих процесів на стадії метагенезу» слід було б виділити в окремий параграф.
- зовсім зайвим є «ДОДАТОК Б. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію» – адже він повністю повторює те саме, що є на початку роботи в Анотації.

10. Зауваження щодо мовних недоліків:

- чимало явних русизмів: «протікання процесу», «витікає із аналізу», «неспівпадіння», «ряд недоліків», «задовольняти умовам», «приймає значення», «опираючись на теорію», «по аналогії» тощо;
- фрази з пропущеними словами: «методи на основі, до яких належать мурашиний алгоритм» (с. 4); «Отримані інтервальних дискретних динамічних моделей» та «Зазначені інтервальних дискретних динамічних моделей» (с. 7); «1.3 Аналіз методів в задачі параметричної ідентифікації» (с. 14);
- невдала фраза: «Біореактор містив ТПОВ, які були зібрані з різних фракцій паперу і харчові відходи також в біореактор додавали попередньо подрібненні макулатуру і паперові упаковки подрібнювали.», с. 107;
- помилкові розділові знаки: «а бо її взагалі не можливо встановити»; «по-кроково» «по-групова селекція» «не достатньо» тощо

Вказані недоліки дещо знижують загалом позитивне враження від рецензованої роботи, проте вони стосуються переважно оформлення результатів роботи, а не їх наукової суті, і тому не заважають в цілому високо оцінити результати, отримані автором І.В. Гураль при виконанні дисертаційних досліджень і підтвердженні їх реальним застосуванням у кількох організаціях та в навчальному процесі.

## Висновок

Дисертаційна робота Гураль І.В. є завершеною науково-дослідною працею, в якій розв'язано актуальне наукове завдання створення комплексу дискретних динамічних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях за рахунок розробки та застосування методів параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолоїної колонії із зменшенням часової складності його реалізації.

Дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 11, 12-14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.03.2013 №567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор Гураль Ірина Володимирівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент

завідувач відділу Інформаційних технологій  
індуктивного моделювання Міжнародного  
науково-навчального центру  
інформаційних технологій та систем  
НАН та МОН України  
д.т.н., професор

 В.С. Степашко



Підпис *Степашко В.С.*  
З А С В І Д Ч У Ю  
Заб. №... *Милва І.А.*

*Милва І.А.*