

ВІДГУК

офіційного опонента

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

Актуальність теми дисертації

Однією з актуальних соціо-екологічних та технологічних проблем є утилізація твердих побутових органічних відходів. Для її вирішення ефективним підходом є використання біогазових установок (БГУ), оскільки такий підхід окрім розв'язування екологічної проблеми, дає змогу отримати високоефективні органічні добрива та біогаз із високим вмістом метану. У дисертаційній роботі Гураль І.В. проведено аналіз математичних моделей біохімічних процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках та встановлено, що існуючі математичні моделі мають ряд суттєвих недоліків, зокрема, вони не відображають стадійного (змінного, неоднорідного) характеру протікання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, а також факту наявності невизначеності відхилень технологічних параметрів процесу.

У дисертаційній роботі обґрунтовано інтервальний підхід до врахування невизначеності відхилень технологічних параметрів процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках, а саме, запропоновано подавати характеристики досліджуваного процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу на базі індуктивної методології моделювання, що забезпечує зниження часових затрат на синтез математичних моделей та їх спрощення через автоматизацію процесу синтезу моделей.

Автором дисертаційного дослідження обґрунтовано необхідність розробки нового методу параметричної ідентифікації та удосконалення відомого методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей (ІДДМ) процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках.

Таким чином тема, мета та поставлені задачі дисертації Гураль І.В., є без сумніву **актуальними**.

Актуальність задачі, важливість та перспективність отриманих результатів підтверджується також тим, що робота виконувалася відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету. Зокрема, в межах науково-дослідних робіт: «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (державний реєстраційний номер 0114U000569); «Макромоделювання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (державний реєстраційний номер 0111U010356); держбюджетної науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507).

Оцінка змісту дисертації, її завершеності

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків і за структурою та обсягом відповідає вимогам щодо кандидатських дисертацій із технічних наук.

У *вступі* обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, визначені мета і задачі дослідження, сформульовано об'єкт і предмет, а також методи дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надано інформацію про особистий внесок автора в роботи, виконані у співавторстві, наданий перелік публікацій та відомості про апробацію за темою роботи.

У *першому розділі* проведено аналіз математичних моделей біохімічних процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у БГУ та встановлено, що процеси анаеробного мікробіологічного бродіння носять недетерміністичний характер, тому одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у біогазових установках є використання математичних моделей у вигляді ДДМ, побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок вимірювань у результатах спостережень необхідно застосовувати методи інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу. Проаналізовано існуючі методи ідентифікації як структури, так і оцінок параметрів ДДМ, визначено їх переваги та недоліки. Встановлено, що для розв'язання задач ідентифікації параметрів на основі аналізу інтервальних даних слід використовувати методи випадкового пошуку, оскільки інші методи не враховують тих невизначеностей, що зустрічаються при ідентифікації. Однак, усі ці методи не дають можливості отримати інтервальні оцінки параметрів, вони орієнтовані лише на точкові значення параметрів, а це також, не дають можливості знаходження єдиної моделі із інтервальним представленням параметрів, що дасть змогу врахувати розкид технологічних параметрів процесу та похибки у результатах спостережень. Проведений аналіз особливостей методів структурної ідентифікації показав, що основним недоліком усіх методів є висока обчислювальна складність. Проте, на відміну від інших, у методі на основі ройового інтелекту основною перевагою є менша кількість параметрів алгоритму. Також з'ясовано, що алгоритм бджолиної колонії, на відміну від інших ройових алгоритмів, містить ефективний механізм для уникнення локальних екстремумів функції мети, а також дозволяє просто встановити основні аналогії між особливостями харчової поведінки бджолиної колонії та основними поняттями задачі структурної

ідентифікації. На основі проведеного огляду та аналізу методів структурної та параметричної ідентифікації встановлено, що доцільним є створення комплексу ІДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях, а для розв'язування цієї задачі необхідно розробити нові методи параметричної ідентифікації ІДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та удосконалити метод структурної ідентифікації ДДМ на основі алгоритмів бджолиної колонії із зменшенням часової складності його реалізації.

У *другому розділі* розглянуто множину розв'язків задачі параметричної ідентифікації ІДДМ. Для розв'язування цієї задачі проаналізовано два способи отримання інтервальних оцінок параметрів моделей: гарантованих та допускових. Встановлено, що гарантовані інтервальні оцінки є достатньо неточними, оскільки отриманій області параметрів у такому випадку належать оцінки параметрів із застосуванням яких, не можливо побудувати ДДМ, які адекватно відображають процеси в БГУ. Також проблемою обчислення гарантованих інтервальних оцінок є отримання інтервальних, а не звичайних алгебричних, рівнянь у процесі обчислення часткових похідних функції Лагранжа, що призводить до наявності багатьох розв'язків при пошуку меж інтервалів параметрів інтервальної дискретної динамічної моделі. Запропоновано метод та обчислювальну процедуру параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від існуючих, забезпечує отримання множини адекватних моделей із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень. Також розглянуто метод параметричної ідентифікації моделей динамічних систем із заданою точністю, за результатами спостережень за вихідною змінною з обмеженими за амплітудою похибками спостережень і при цьому отримано вирази та побудовано алгоритми для знаходження інтервальних оцінок змінних стану ДДМ на основі спостережень за вихідними змінними з обмеженими за амплітудою

похибками, що уможливило побудову методу параметричної ідентифікації ДДМ.

У *третьому розділі* розглянуто задачу оцінювання якості структури дискретної динамічної моделі та проведено обґрунтування методу її розв'язування. Удосконалено метод структурної ідентифікації ДДМ на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолоїної колонії. У запропонованому методі обґрунтовано використання нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у вигляді квадратичної залежності між кількістю «структур-нащадків» згенерованих «навколо» поточної «структури-предка» та значенням функції мети для цієї «структури-предка». Такий підхід дав змогу підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і таким чином знизити обчислювальну складність його реалізації. Проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності існуючого та запропонованого методу структурної ідентифікації на тестових прикладах та показано зниження обчислювальної складності для запропонованого методу. Розроблено блок-схему алгоритму реалізації удосконаленого методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Запропоновано та обґрунтовано функціональну модель програмного комплексу для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на всіх його стадіях. На основі цієї моделі побудовано програмний комплекс із розширеними функціональними можливостями.

У *четвертому розділі* отримано комплекс адекватних математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях процесу анаеробного бродіння, а саме: ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Отримані ІДДМ ураховують розкид технологічних параметрів, кислотності середовища та температури, а також похибки в результатах спостережень, що забезпечують можливість коригування протікання процесу після кожної стадії процесу в біогазових установках. Також вони забезпечують гарантовані прогностичні властивості для різних умов анаеробного мікробіологічного

бродіння та якісно адекватно описують динаміку відповідних процесів, навіть у випадку незначної зміни початкових умов за межами інтервалів, які використано як початкові умови для ідентифікації цих моделей. Проведено дослідження впливу вибору початкових умов на зміну характеру модельованих процесів на стадії метагенезу. Унаслідок цього встановлено, що розширення інтервалів для вибору початкових умов збільшує часову складність реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації. Крім того, при достатньо широких інтервалах для початкових умов втрачається стійкість поточної структури моделі, а бо її взагалі не можливо встановити. Заразом суттєве звуження інтервалів для початкових умов не дасть можливості при використанні моделі урахувати реальні можливі розкиди технологічних параметрів процесу, а при відхиленні від цих інтервалів суттєвим чином змінюється характер прогнозованого процесу. Підтверджено, що застосування удосконаленого методу структурної ідентифікації ІДДМ дозволяє знизити обчислювальну складність методу. Водночас ефективність застосування такого підходу буде збільшуватися пропорційно розмірності задачі.

У додатках наведено довідки про впровадження результатів дисертації.

Наукова новизна дисертаційної роботи

1. Вперше запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів, який, на відміну від існуючих, забезпечує отримання множини адекватних моделей біохімічних процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із 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 існуючих, ураховують інтервальну невизначеність, що забезпечує можливість коригування протікання 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 та з використанням поведінкових моделей бджолиної колонії, у якому, на відміну від існуючого, запропоновано нелінійний оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару», що дозволило підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і знизити обчислювальну складність його реалізації.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Обґрунтованість одержаних наукових результатів базується на використанні методів аналізу інтервальних даних та методів стохастичного програмування при розробці методу параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей з інтервальним представленням їх параметрів; методів аналізу інтервальних даних, методів стохастичного програмування та теорії самоорганізації систем, зокрема, поведінкові моделі бджолиної колонії для удосконалення методу структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі інтервальних даних; методів аналізу інтервальних даних,

методів теорії ідентифікації дискретних динамічних моделей, зокрема відомих методів структурної та параметричної ідентифікації при побудові макромоделей анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках; використанням комп'ютерного моделювання для проектування програмного комплексу реалізації алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації; розв'язуванням інтервальних систем нелінійних алгебричних рівнянь методами математичного програмування.

Наукове і практичне значення результатів

Наукова цінність дисертаційної роботи полягає у розв'язанні задачі побудови макромоделей анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках з врахуванням технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях, на основі розробки та застосування методу параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та методу структурної ідентифікації цих моделей із застосуванням алгоритмів бджолиної колонії та за рахунок зменшенням часової складності його реалізації.

Практичне значення результатів роботи полягає у створенні алгоритмів та розширенні функціональних можливостей програмного комплексу для ідентифікації ІДДМ процесів та проведенні його апробації для побудови макромоделей процесів в біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння.

Наукові та практичні результати впроваджено на діючій біогазовій установці на базі лабораторії «Технології виробництва біогазу» Бережанського агротехнічного інституту та в м. Тернополі на базі комунального підприємства «Тернопільміськтеплокомуненерго», що підтверджено актами про впровадження.

Результати дисертаційної роботи використані у навчальному процесі Тернопільського національного економічного університету при викладанні дисциплін «Інтелектуальний аналіз даних» та «Інтервальні обчислення».

Публікації та апробація результатів дисертаційної роботи

Основні результати відображених у дисертації досліджень опубліковано у 16 наукових працях, з них 1 публікація у науковому періодичному виданні іншої держави та 7 – у фахових виданнях України, 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus та 8 публікацій у матеріалах конференцій, 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus.

В опублікованих працях викладено в повному обсязі основні положення дисертаційної роботи, які винесено на захист. Особистий внесок здобувача в сумісних публікаціях є підтвердженим. Рівень та кількість публікацій, рівень апробації відповідають вимогам, що ставляться до кандидатських дисертацій в Україні.

Оформлення дисертації та автореферату

Автореферат дисертації достатньо інформативний, його зміст повністю відповідає змісту дисертаційної роботи. Дисертація та автореферат викладені логічно, послідовно та коректно. Оформлення автореферату та дисертації повністю відповідає вимогам, рекомендованим Міністерством освіти і науки України.

Зауваження до дисертаційної роботи

1. У першому розділі дисертаційної роботи наведено огляд відомих дискретних динамічних моделей автономних систем, однак розроблені дисертанткою моделі та методи ідентифікації стосуються неавтономних систем, що певним чином ускладнює можливість оцінювання отриманих у дисертації нових результатів.

2. Подання інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь у формулах (1.12), (2.3), (2.5), (2.7) на мій погляд є надлишковим і може бути

спрощеним (більш компактним), оскільки останній рядок формального запису цієї системи логічно слідує із перших його двох рядків, якщо у першому рядку розширити діапазон зміни індекса k , а саме, збільшити верхню межу цього діапазону з $p-1$ на K .

3. У третьому розділі дисертаційної роботи не наведено жодних відомостей про оператори, які входять в удосконалений метод структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі алгоритму бджолоїної колонії, а саме, не зрозуміло, що є їх областями визначення та значень, які їх властивості як певних математичних об'єктів?

4. Не цілком коректно множину (1.16) структурних елементів дискретної динамічної моделі названо структурою цієї моделі, оскільки структура передбачає зв'язки між елементами, а у формулі (1.16) такі зв'язки не представлені.

5. Використання терміну «базисні функції» у дисертаційній роботі не зовсім доречно, оскільки поняття «базисна функція» та «базис» мають строгий математичний сенс лише для лінійних просторів, а саме, для лінійних функціональних просторів, які у дисертаційній роботі не розглядаються.

6. У ряді формул дисертації допущено технічні помилки та неточності, зокрема, це стосується формул (1.10), (1.11), (1.14), (1.15), (1.18), (1.19), (1.20), (3.2), (3.3).

7. Присутні деякі граматичні та стилістичні помилки, русизми.

Зазначені зауваження та недоліки не є принциповими і суттєво не знижують загального позитивного враження від поданої роботи.

Загальна оцінка роботи і висновок

Оцінюючи роботу в цілому, вважаю, що дисертація Гураль І.В. на тему «Інтервальне моделювання процесів у біогазових установках в умовах структурної та параметричної невизначеності» є завершеною науковою працею, у якій отримані нові наукові і практичні результати, що вирішують

важливе наукове завдання, а саме, 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 бджолиної колонії із зменшенням часової складності його реалізації.

Дисертаційна робота здобувача за своїм рівнем, обсягом і якістю досліджень 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:

професор кафедри комп'ютерних систем та мереж
Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професор



С. А. Лупенко

Підпис професора Лупенка С.А. засвідчую,

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного
технічного університету ім. Івана Пулюя,
доктор технічних наук, професор



Р.М. Рогатинський