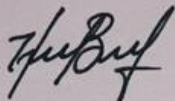


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Гураль Ірина Володимирівна 

УДК 66.011, 519.855

**ІНТЕРВАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ В УМОВАХ СТРУКТУРНОЇ
ТА ПАРАМЕТРИЧНОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Дивак Микола Петрович,
Тернопільський національний економічний
університет, декан факультету комп'ютерних
інформаційних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лупенко Сергій Анатолійович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя МОН України, м. Тернопіль,
професор кафедри комп'ютерних систем та мереж

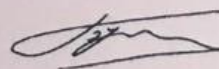
доктор технічних наук, професор
Степашко Володимир Семенович,
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій і систем НАН та МОН
України, м. Київ, завідувач відділу інформаційних
технологій індуктивного моделювання

Захист відбудеться 07 грудня 2018 р. о 16.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, 226 ауд. головного корпусу).

Із дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано « 5 » 11. 2018 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор



Р. А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з актуальних проблем людства є утилізація твердих побутових органічних відходів (ТПОВ). Для її вирішення часто використовують біогазові установки (БГУ). Такий спосіб утилізації, крім розв'язування екологічної проблеми, дає змогу отримати високоефективні органічні добрива та біогаз із високим вмістом метану.

У БГУ проходять складні тепло- та масообмінні процеси на різних стадіях метанового бродіння. Для ефективного управління зазначеними процесами необхідно створити математичні моделі, які б описували стадії ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу. Існуючі моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які описано в працях J. Monod, H. Moser, E.O. Powell, Y. Chen, A.G. Hashimoto, F. Bergter, R. Mitsdörffer, ґрунтуються на біохімічних перетвореннях та є детермінованими. Процеси анаеробного мікробіологічного бродіння є недетермінованими. Одним із альтернативних підходів до моделювання процесів в БГУ є використання математичних моделей у вигляді дискретних динамічних моделей (ДДМ), побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. У працях Matt E. Griffin, Katherine D. McMahon, Roderick I. Mackie, Lutgarde Raskin, Н.Б. Голуб, О.А. Козловця описано такі математичні моделі, що враховують стохастичність процесів бродіння. Однак не враховують можливості зміни протікання процесу на будь-якій його стадії, а також технологічних відхилень змінних процесу, через неоднорідність та різну структуру біосировини, температуру та кислотність середовища. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки, наприклад вимірювань, у результатах спостережень призводить до необхідності застосування методів інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

Серед методів структурної ідентифікації ДДМ слід виділити такі: метод редукції структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів; методи на основі генетичних алгоритмів; методи на основі моделей ройового інтелекту та методи випадкового пошуку. Вказані методи описано у працях Akaike H., Ljung L., Haber R., Гропа Д., Дивака М.П., Ейкхоффа П., Івахненко О.Г., Карабутова М.М, Личака М.М., Степашка В.С., Растрігіна Л.А., Ципкіна Я.З. Частина з цих методів не придатна для використання у випадку інтервального представлення результатів експерименту. Решта має високу обчислювальну складність, що робить методи непридатними для задач моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння. Проте, для розв'язування задач структурної ідентифікації ДДМ на основі інтервальних даних набули широкого застосування методи з використанням поведінкових моделей бджолоїної колонії. Однак і вони мають високу обчислювальну складність і зорієнтовані на знаходження однієї моделі, тобто без урахування множинності оцінок

параметрів завдяки невизначеності. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки у результатах спостережень також призводять до множини таких моделей унаслідок множини оцінок параметрів.

У теорії інтервального аналізу найчастіше використовують інтервальні оцінки значень параметрів для моделей. Такий підхід відзначається простотою обчислень і особливо є актуальним при побудові ДДМ.

Зважаючи на викладене вище, актуальним є наукове завдання створення комплексу ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях шляхом розробки та застосування методів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолиної колонії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася згідно з тематичним планом науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету протягом 2013 – 2018 років. Основні результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання таких науково-дослідних робіт: «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (державний реєстраційний номер 0114U000569), у якій автором побудовано інтервальні дискретні динамічні моделі, які описують процеси анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацетогенезу, ацидогенезу та метаногенезу; «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (державний реєстраційний номер 0111U010356), зокрема у розділі «Макромодельовання стаціонарних та нестаціонарних різницевих операторів в умовах структурної невизначеності» автором розроблено математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення процесів імітаційного моделювання з метою вибору оптимальних параметрів технологічного процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на усіх його стадіях; держбюджетної науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507), зокрема у розділі «Метод структурної ідентифікації динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту у вигляді інтервальних різницевих операторів» автором удосконалено метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі алгоритму бджолиної колонії.

Усі вищезгадані роботи виконувалися за безпосередньої участі автора, котрий був виконавцем.

Мета та завдання дослідження. Метою дослідження є побудова та дослідження математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із урахуванням 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 бджолоїної колонії для зменшення його часової реалізації. Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено наступні **завдання**:

- провести аналіз моделей процесів у біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння та відомих методів структурної і параметричної ідентифікації цих моделей;
- розробити метод параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх характеристик;
- удосконалити метод структурної ідентифікації ДДМ із застосуванням інтервальних даних та алгоритмів бджолоїної колонії;
- розробити математичні моделі кожної стадії анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках з урахуванням технологічних відхилень змінних такого процесу;
- розширити можливості програмного продукту для ідентифікації інтервальних дискретних моделей процесів та провести його апробацію в практичних застосуваннях.

Об'єкт дослідження – процеси анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках.

Предмет дослідження - математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння та методи їх структурної і параметричної ідентифікації на основі аналізу інтервальних даних.

Методи дослідження. При розробці методу параметричної ідентифікації ДДМ з інтервальним представленням їх параметрів було використано методи аналізу інтервальних даних та методи стохастичного програмування. Для удосконалення методу структурної ідентифікації ДДМ на основі інтервальних даних було застосовано методи аналізу інтервальних даних, методи стохастичного програмування та теорії самоорганізації систем, зокрема поведінкові моделі бджолоїної колонії. При побудові математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках було використано індуктивний підхід, методи аналізу інтервальних даних, методи теорії ідентифікації ДДМ, зокрема розроблено методи структурної та параметричної ідентифікації. Для дослідження збіжності та обчислювальної складності удосконалених методів структурної та параметричної ідентифікації використано комп'ютерне моделювання. Для проектування програмного комплексу реалізації алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації використано об'єктно-орієнтований підхід, а для його створення застосовано технологію .NET, мову програмування C# та використано інтегроване середовище розробки програмних продуктів Microsoft Visual Studio.

Наукова новизна одержаних результатів. У межах дисертаційної роботи здійснено постановку та вирішення актуального наукового завдання моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння та методів їх структурної і параметричної ідентифікації, зокрема:

уперше:

- 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 із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень;

- 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;

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.

Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні нових алгоритмів та розширенні функціональних можливостей програмного продукту для ідентифікації інтервальних дискретних моделей процесів та проведенні його апробації для побудови математичних моделей процесів у біогазових установках на всіх стадіях анаеробного мікробіологічного бродіння.

Розроблені математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу із гарантованими прогностичними властивостями, які ураховують 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 «Тернопільськтеплокомуненерго» для оцінювання потенційних можливостей ресурсів при плануванні створення біогазової установки в м. Тернополі. Розроблені моделі дають можливість коригувати протікання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння після кожної стадії в біогазових установках.

Результати проведених у дисертаційній роботі досліджень упроваджено в навчальному процесі Тернопільського національного економічного університету за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» (при викладанні дисциплін «Інтелектуальний аналіз даних» та «Інтервальні обчислення»).

Особистий внесок здобувача. Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автором: [1] – запропоновано метод побудови

ідентифікації параметрів математичної моделі, який забезпечує знаходження її інтервальних оцінок; [2] – удосконалено спосіб реалізації деяких операторів методу структурної ідентифікації, який ґрунтується на аналогіях із поведінковими моделями бджолоїної колонії, [3] – уперше отримано математичну модель процесу анаеробного мікробіологічного бродіння на стадії ацидогенезу та метаногенезу на основі інтервальної динамічної дискретної моделі; [4] – отримано математичну модель процесу бродіння на стадії ацидогенезу на основі інтервальної динамічної дискретної моделі; [6] – розроблено програмний комплекс для моделювання на кожній стадії процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках; [7,14] – проведено біохімічний аналіз процесів анаеробного мікробіологічного бродіння; [8] – запропоновано спосіб отримання вихідних даних на основі біохімічного аналізу процесів у біогазових установках із використанням модифікованої до інтервального вигляду формули Чена та Хашимото; [9] – уперше отримано математичну модель процесу бродіння на стадії ацетогенезу; [11, 12] – побудовано неавтономну модель динаміки об'єму залишкової маси зброджуваного субстрату; [15] – проаналізовано методи моделювання процесу бродіння.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах: XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці» CADSM (Львів – Поляна, 2013, 2015); XII Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії» TCSET (Львів – Славсько, 2014); 17-й Міжнародній конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки» CPEE (Польща – Сандомеж, 2016); III, IV, V та VI Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» АСІТ (Тернопіль, 2013, 2014, 2015, 2016); Міжнародних школах-семінарах для молодих науковців «Індуктивне моделювання: теорія і застосування» (с. Жукін Київської обл., 2014, 2016); наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2013-2018).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 16 наукових праць із загальним обсягом 102 сторінки, з них 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави та 7 статей у наукових 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.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 160 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 168 сторінок друкарського тексту, з них 120 сторінок основного тексту. Робота містить 29 рисунків і 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, визначено методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність дисертаційного дослідження, зазначено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз математичних моделей біохімічних процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках та встановлено, що такі моделі є детермінованими. З'ясовано, що процеси анаеробного мікробіологічного бродіння носять недетерміністичний характер, тому одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у БГУ, є використання математичних моделей у вигляді ДДМ, побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Такі математичні моделі описано у працях Matt E. Griffin, Katherine D. McMahon, Roderick I. Mackie, Lutgarde Raskin, Н.Б. Голуб, О.А. Козловець. Ці моделі враховують стохастичність процесів бродіння. Однак існуючі математичні моделі не враховують можливості зміни протікання процесу на будь-якій його стадії, а також технологічних відхилень змінних процесу, через неоднорідність та різну структуру біосировини, температуру та кислотність середовища. Розкид технологічних параметрів процесу та похибки, наприклад вимірювань, у результатах спостережень призводять до потреби застосування методів інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною і параметричною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

Застосування індуктивних методів забезпечує зниження часових затрат на синтез математичних моделей та їх спрощення через автоматизацію процесу синтезу. Загалом дискретну динамічну модель представляють у вигляді:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-p}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \vec{g}, \quad k = p, \dots, K, \quad (1)$$

де $\vec{f}(\bullet)$ – вектор невідомих базисних функцій, що задає структуру дискретної динамічної моделі; v_k – модельована характеристика для k -ї дискрети, $k = p, \dots, K$; p – порядок ДДМ; $\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$ – вектори вхідних змінних для k -ї дискрети, які у нашому випадку називаємо технологічними параметрами процесу; $\vec{g} = (g_1, \dots, g_i)^T$ – вектор невідомих параметрів дискретної динамічної моделі.

Вектор оцінок параметрів \hat{g} та вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$ у виразі (1) отримуємо у такий спосіб, щоб дотримати виконання умов забезпечення точності математичної моделі в межах похибок вимірювань значень модельованої характеристики, отриманих на основі експериментальних даних:

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [v_k^-; v_k^+], \quad \forall k = 0, \dots, K, \quad (2)$$

де $[v_k^-; v_k^+]$ – інтервал значень модельованої характеристики для k -ї дискрети, $k = 0, \dots, K$, межі якого визначаємо на основі похибок вимірювання модельованої характеристики за виразами $v_k^- = v_k - v_k \cdot \varepsilon$ та $v_k^+ = v_k + v_k \cdot \varepsilon$, де v_k – виміряне значення модельованої характеристики; ε – відносна похибка вимірювання; $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – інтервальні оцінки прогнозованої характеристики для k -ї дискрети, $k = 0, \dots, K$. Замінюючи у виразі (1) дискретні значення характеристики на інтервальні, також з урахуванням умов (2) обчислюємо вектор оцінок \hat{g} невідомих параметрів дискретної динамічної моделі. Тоді вираз для інтервальної дискретної динамічної моделі (ІДДМ) набуває вигляду:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}, \quad k = p, \dots, K. \quad (3)$$

Варто зауважити, що виконання умов (2) забезпечує можливість знаходження ІДДМ (3) із гарантованими прогностичними властивостями.

Далі у цьому розділі проведено аналіз існуючих методів ідентифікації як структури, так і оцінок параметрів ІДДМ.

Серед методів структурної ідентифікації проаналізовано метод редукції структури математичної моделі, метод групового урахування аргументів, методи на основі генетичних алгоритмів, методи на основі моделей ройового інтелекту та методи випадкового пошуку. Вказані методи описано в працях Akaike H., Ljung L., Haber R., Івахненко О.Г., Степашка В.С., Растрігіна Л.А. Проте ці методи не придатні у випадку інтервального представлення результатів експерименту. У роботах Бакана Г.М., Вошиніна О.П., Дивака М.П., Карагоди Ю.Г. розглянуто методи структурної ідентифікації ІДДМ на основі аналізу інтервальних даних та із використанням механізмів самоадаптації і самоорганізації поведінкових моделей бджолоїної колонії. Зазначені методи структурної ідентифікації вимагають зниження обчислювальної складності для задач моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння та зорієнтовані на знаходження однієї моделі, тобто без урахування множинності оцінок параметрів завдяки невизначеності. Одночасно розкид технологічних параметрів процесу та похибки в результатах спостережень призводять до множини таких моделей. Для їх отримання необхідно розробити нові методи параметричної ідентифікації ІДДМ процесів із множинним представленням оцінок їх параметрів. У теорії інтервального аналізу найчастіше використовують інтервальні оцінки значень параметрів для моделей. Такий підхід відзначається простотою обчислень і особливо є актуальним при побудові ІДДМ.

Зважаючи на проведений аналіз, сформульовано актуальність досліджень, суть якої полягає у створенні комплексу ІДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях. 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 бджолоїної колонії із зменшенням часової складності його реалізації.

У завершальній частині розділу здійснено постановку завдань дисертаційного дослідження.

Другий розділ дисертації розкриває причини складності задач отримання інтервальних оцінок параметрів ДДМ на основі аналізу інтервальних даних та суть нового методу їх розв'язування.

Враховуючи певні фактори, що впливають на процеси анаеробного мікробіологічного бродіння, перейдемо від автономної до неавтономної математичної моделі динаміки цих процесів. Для цього, замість параметрів ДДМ у виразі (1), використаємо функції цих параметрів.

Отже, ДДМ для неавтономної системи записуємо у такому вигляді:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-p}, \dots, v_{k-1}) \cdot \vec{g}(\vec{u}), \quad k = 1, \dots, K. \quad (4)$$

У рівнянні (4) коефіцієнти g_i , замінено на деякі функції $g_i(\vec{u})$, що залежать від вхідних змінних – технологічних параметрів процесу.

Перепишемо вираз (4) за аналогією з виразом (3) із урахуванням «інтервальності» модельованої характеристики:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([v_{k-p}^-; v_{k-p}^+], \dots, [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}(\vec{u}), \quad k = p, \dots, K. \quad (5)$$

У випадку відомої структури ІДДМ (5), для знаходження оцінок параметрів, потрібно розв'язати інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР), що представлена в такому вигляді:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], [\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\hat{v}_{p-1}^-; \hat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+], \\ [\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([v_{k-p}^-; v_{k-p}^+], \dots, [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}(\vec{u}), \\ v_k^- \leq \vec{f}^T([v_{k-p}^-; v_{k-p}^+], \dots, [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+]) \cdot \hat{g}(\vec{u}) \leq v_k^+, \quad k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (6)$$

Отримана ІСНАР є достатньо складною, оскільки містить функції параметрів $g_i(\vec{u})$, які залежать від вхідних змінних. Тому розв'язки цієї системи можливо отримати тільки в дуже простих випадках, які не мають практичного застосування. Однак урахувати вплив розкиду технологічних параметрів процесу на характеристику процесу можна, визначивши гарантовані межі зміни параметрів моделі залежно від розкиду значень вхідних змінних, тобто:

$$\hat{g}(\vec{u}) \in [\hat{g}^-; \hat{g}^+], \quad (7)$$

де $[\hat{g}^-; \hat{g}^+]$ – вектор інтервалів можливих значень параметрів ІДДМ.

У такому випадку ІСНАР (6) набуває такого вигляду:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], [\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] \subseteq [v_1^-; v_1^+], \dots, [\hat{v}_{p-1}^-; \hat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+], \\ [\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([v_{k-p}^-; v_{k-p}^+], \dots, [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+]) \cdot [\hat{g}], \\ v_k^- \leq \vec{f}^T([v_{k-p}^-; v_{k-p}^+], \dots, [v_{k-1}^-; v_{k-1}^+]) \cdot [\hat{g}] \leq v_k^+, \quad k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (8)$$

Позначимо розв'язки цієї ІСНАР у вигляді множини Ω .

Область розв'язків ІСНАР (8) є дуже складною для її представлення. У загальному випадку не існує методів її точного оцінювання. У дисертації

це показано на прикладі побудови спрощеної моделі анаеробного мікробіологічного бродіння у такому вигляді:

$$v_k = v_{k-1} + (g_1 \cdot v_{k-1} - g_2 \cdot v_{k-1}^2) \cdot T, \quad (9)$$

де v_k – об'єм виходу біогазу, g_1, g_2 – невідомі параметри моделі, T – крок дискретизації. Для цього прикладу, розглянуто випадок тільки трьох дискрет ($k=0,1,2$) представлення інтервальних даних у вигляді умов (2): $[v_0^-; v_0^+] = [0,028; 0,032]$; $[v_1^-; v_1^+] = [0,199; 0,221]$; $[v_2^-; v_2^+] = [0,456; 0,504]$. Побудована ІСНАР для цього випадку має такий вигляд:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], \\ v_1^- \leq [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + ([\hat{g}_1^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+]) - [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot T \leq v_1^+, \\ v_2^- \leq [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + 2 \cdot T \cdot [\hat{g}_1^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - T \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - T^2 \cdot [\hat{g}_1^-] \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \times \\ \times [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - T \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - 2 \cdot T^2 \cdot [\hat{g}_1^-] \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + 2 \cdot T^2 \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] + \\ + 2 \cdot T^3 \cdot [\hat{g}_1^-] \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] - T^2 \cdot [\hat{g}_2^-] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \cdot [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \leq v_2^+. \end{cases} \quad (10)$$

Результати побудови «точної» області розв'язків цієї системи із двох інтервальних рівнянь ІСНАР (10), представлено на рис. 1.

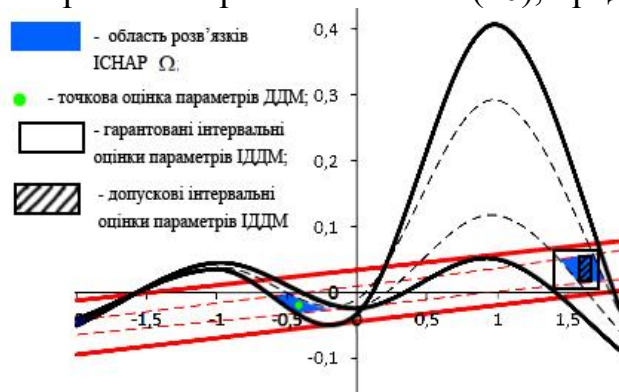


Рис. 1 - Розв'язок ІСНАР(10)

Як бачимо, область розв'язків цієї системи є не зв'язаною та не опуклою. На цьому ж рисунку також показано допускові та гарантовані інтервальні оцінки параметрів ІДДМ, які в загальному випадку можуть бути обчислені як не єдино можливими.

Зважаючи на розглянутий приклад, для знаходження гарантованих інтервальних оцінок

параметрів ІДДМ задачу ідентифікації формулюємо в такому вигляді:

$$\delta([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \xrightarrow{[\hat{g}^-; \hat{g}^+]} \min, \quad (11)$$

з обмеженнями на значення параметрів, заданих ІСНАР (8), тобто:

$$[\hat{g}^-; \hat{g}^+] \supseteq \Omega. \quad (12)$$

У виразі (11) $\delta([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$ – функція мети, яка описує якість наближення отриманих інтервальних оцінок до оптимальних. Задачі (11) та (12) є оптимізаційними задачами опуклого програмування. Перепишемо їх у вигляді $2m$ задач математичного програмування:

$$\hat{g}_i^- \longrightarrow \min, i = 1, \dots, m; \quad \hat{g}_i^+ \longrightarrow \min, i = 1, \dots, m, \quad \text{за умов (12)}.$$

У дисертаційній роботі показано, що ці задачі можуть бути розв'язані за допомогою методу невизначених множників Лагранжа, наприклад із застосуванням Optimization Toolbox ППП MATLAB.

Однак, «гарантовані» інтервальні оцінки параметрів ІДДМ, отримані у такий спосіб, є достатньо «грубими». Такий випадок проілюстровано на

рис. 1. Тому необхідним є знаходження допусккових інтервальних оцінок параметрів ІДДМ, які забезпечують гарантовані прогностичні властивості цих моделей.

У випадку знаходження допустимих інтервальних оцінок, тобто «вписаних» в область розв'язків, як це показано на рис. 1 заштрихованою областю, задача ідентифікації суттєво ускладнюється, оскільки не має однозначного розв'язку та стає двохкритеріальною:

$$\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \xrightarrow{[\hat{g}^-; \hat{g}^+]} \min, \quad (13)$$

$$\delta_2([\hat{g}^-; \hat{g}^+]) \xrightarrow{[\hat{g}^-; \hat{g}^+]} \max, \quad (14)$$

за умови:

$$[\hat{g}^-; \hat{g}^+] \subseteq \Omega. \quad (15)$$

У виразі (14) $\delta_2([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$ – функція мети, яка описує ступінь покриття області розв'язків ІСНАР (8) допускковими інтервальними оцінками параметрів ІДДМ. Наприклад, ця функція може задавати об'єм допусккової області інтервальних оцінок.

Значення функції мети $\delta_1([\hat{g}^-; \hat{g}^+])$ обчислюють на основі аналізу інтервальних даних. Вона не має представлення в аналітичному вигляді, а її значення можна обчислити виключно чисельними методами. На рис. 2. проілюстровано схему обчислення значень цієї функції.

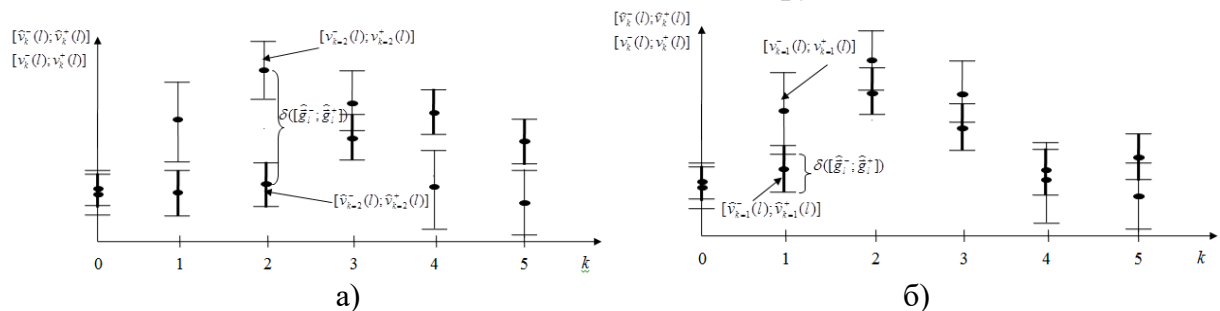


Рис. 2 - Ілюстрація до обчислення функції мети: а) для випадку неточного наближення оцінок параметрів ІДДМ; б) для випадку уточнення оцінок параметрів ІДДМ

Як бачимо із рис. 2,а, інтервальні оцінки прогнозованих значень $[\hat{v}_k^-(l); \hat{v}_k^+(l)]$ характеристики процесу, які обчислено для поточної інтервальної оцінки параметрів $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$ та отримано із експерименту $[v_k^-(l); v_k^+(l)]$ для дискретних значень k , відрізняються та не перетинаються. При цьому найбільше відхилення спостерігаємо між центрами інтервалів $[\hat{v}_{k=2}^-(l); \hat{v}_{k=2}^+(l)]$ та $[v_{k=2}^-(l); v_{k=2}^+(l)]$ для дискрети $k=2$. Модуль цього відхилення і є значенням функції мети. У процесі реалізації ітераційної обчислювальної процедури, інтервальні оцінки параметрів ІДДМ (4) уточнюються. Зокрема, на рис. 2,б проілюстровано випадок, коли для усіх дискрет інтервальні оцінки прогнозованого коридору характеристики та інтервали цієї характеристики, які отримані з експерименту, перетинаються. У цьому випадку найбільше неспівпадання між інтервалами $[\hat{v}_{k=1}^-(l); \hat{v}_{k=1}^+(l)]$ та $[v_{k=1}^-(l); v_{k=1}^+(l)]$ проілюстровано для дискрети $k=1$. Мінімальне (нульове) значення функції

мети, досягається, коли для усіх дискрет інтервали оцінок прогнозованої характеристики належать до інтервалів оцінок цієї характеристики, які отримано з експерименту. У цьому випадку виконуються умови (2) і відповідно умова (15).

Провівши аналіз формування функції мети (13) в задачі параметричної ідентифікації, отримуємо вирази для її обчислення в ітераційній процедурі ідентифікації, що мають такий вигляд:

$$\delta_1([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \text{mid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-(l); \hat{v}_{k-p}^+(l)], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-(l); \hat{v}_{k-1}^+(l)], \dots, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) - \text{mid}([v_k^-]) \right\}, \text{ якщо } [\hat{v}_k^-(l); \hat{v}_k^+(l)] \cap [v_k^-(l); v_k^+(l)] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K; \quad (16)$$

$$\delta_1([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \text{mid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-(l); \hat{v}_{k-p}^+(l)], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-(l); \hat{v}_{k-1}^+(l)], \dots, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) - \text{wid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-(l); \hat{v}_{k-p}^+(l)], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-(l); \hat{v}_{k-1}^+(l)], \dots, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot [\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) \right\}, \text{ якщо } [\hat{v}_k^-(l); \hat{v}_k^+(l)] \cap [v_k^-(l); v_k^+(l)] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K, \quad (17)$$

де $\text{mid}(\bullet)$, $\text{wid}(\bullet)$ – операції визначення центру та ширини інтервалу, відповідно. Паралельно, на кожному кроці ітераційної процедури розв'язуємо задачу (14) максимізації об'єму допускової області інтервальних оцінок параметрів ІДДМ. У дисертації запропоновано спрощену обчислювальну схему для отримання наближень цих інтервальних оцінок. Загалом схема містить чотири кроки.

Крок 1. Задання початкового (нульового) вектора параметрів в інтервальному вигляді $[\hat{g}_0^-; \hat{g}_0^+]$.

Крок 2. Генерування поточного інтервального вектора параметрів ІДДМ в околі радіусом r випадковим чином:

$$[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+] = [\hat{g}_{l-1}^-; \hat{g}_{l-1}^+] + r \cdot \vec{\xi}_l, l = 1, \dots, L; \quad \vec{\xi}_l = \left(\frac{\xi_{1l}}{R_l}, \frac{\xi_{2l}}{R_l}, \dots, \frac{\xi_{ml}}{R_l} \right)^T; \quad R_l = \sqrt{\xi_{1l}^2 + \xi_{2l}^2 + \dots + \xi_{ml}^2},$$

де $\xi_{1l}, \dots, \xi_{ml}$ – випадкові числа, згенеровані відповідно до рівномірного закону розподілу на інтервалі $[-1; 1]$.

Крок 3. Перевірку «якості» $\delta([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+])$ поточного наближення оцінки $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$ вектора параметрів визначаємо за формулою (16).

Крок 4. Якщо значення функції мети дорівнює нулю, то розширюємо поточні допускові інтервали і переходимо на крок 3. Якщо для поточного наближення значення функції мети менше, ніж для попереднього, то переходимо на крок 2, в іншому випадку повертаємо попереднє наближення вектора параметрів і переходимо на крок 2.

У дисертаційній роботі для підвищення ефективності методу випадкового пошуку на кроці 2 розглянуто також більш складну схему на основі методу напрямного конуса Растрігіна, але модифіковану для інтервальних випадкових чисел. Загальним правилом завершення процесу обчислень є вичерпання наперед заданої кількості ітерацій розширення поточних допускових інтервалів інтервального вектора $[\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]$.

У **третьому розділі** наведено результати досліджень щодо удосконалення методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, а також результати розробки програмного інструментарію для його реалізації.

Суть розглянутого в дисертаційній роботі методу структурної ідентифікації полягає у виконанні наступних перетворень: формування початкової множини структур Λ_{mcn} , для якої виконується умова $mcn=0$, за допомогою оператора $P_{init}(m_s, F)$ та оцінювання їх «якості» за допомогою функції мети $\delta(\lambda_s)$; синтез множини поточних структур із використанням оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$ та проведення попарної селекції множини структур ІДДМ першого ряду формування Λ_{mcn}^1 із використанням оператора $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$; синтез множини поточних структур із використанням оператора $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ та проведення погрупової селекції множини структур ІДДМ другого ряду формування Λ_{mcn}^2 із використанням оператора $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$; генерування «нових» структур ІДДМ λ_s із використанням оператора $P_N(F, I_{min}, I_{max})$, при умові, що усі структури для яких $Limit_s \geq LIMIT$, вважаються «вичерпними». Схема на рис. 3 ілюструє послідовність цих перетворень та їх результати у вигляді отриманих проміжних структур ІДДМ.

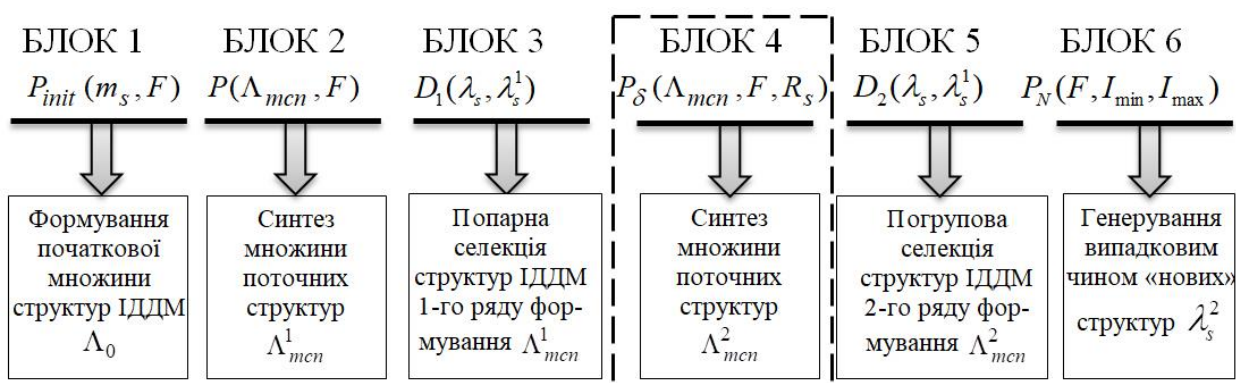


Рис. 3 – Схема послідовності перетворень структурної ідентифікації

Ці перетворення спрямовано на мінімізацію деякої функції мети у такому вигляді:

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \vec{f}^s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{min}; I_{max}], \vec{f}^s(\bullet) \in F, \hat{g}^s \in [\hat{g}^s], \quad (18)$$

де $m_s \in [I_{min}; I_{max}]$ – кількість елементів у поточній структурі λ_s ; F – множина усіх початково-заданих структурних елементів, $F = \{f_1(\vec{v}_{k-1}); \dots; f_l(\vec{v}_{k-1}); \dots; f_L(\vec{v}_{k-1})\}$, де $|F| = L$ (потужність множини F); $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots; g_{m_s}^s\}$ – вектор невідомих значень параметрів, який для поточної структури ІДДМ оцінюють на основі методів параметричної ідентифікації; $[\hat{g}^s]$ – інтервальний вектор параметрів, який отримуємо із розв'язку задачі параметричної ідентифікації на основі методу представленого у другому розділі.

Варто зазначити, що значення функції мети змінюється залежно від «якості» структури обернено пропорційно, тобто чим краща структура, тим менше значення функція мети $\delta(\lambda_s)$. У випадку ж, якщо $\delta(\lambda_s) = 0$, то така структура дозволяє побудувати адекватну ІДДМ.

Результати аналізу операторів цілеспрямованого перетворення структур-предків показали, що «корисні» їх властивості визначаються значенням показника R_s в операторі $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ (блок 4 на рис. 3). Тобто чим «гірша» структура-предок, тим менше для неї генеруємо «структур-нащадків», а в іншому випадку – навпаки. У відомому методі структурної ідентифікації значення показника R_s для кожної структури обчислюють за такою формулою:

$$R_s = \text{ToInt} \left(\frac{S \cdot \left(2 \cdot \max \{ \delta(\lambda_s^1) \mid s=1 \dots S \} - \delta(\lambda_s^1) - \delta(\lambda_{s-1}^1) \right)}{\sum_{s=1}^S \left(\max \{ \delta(\lambda_s^1) \mid s=1 \dots S \} - \delta(\lambda_s^1) \right)} - R_{s-1} \right), s=2 \dots S, \quad (19)$$

де $R_1 = 0$, операція $\text{ToInt}(\bullet)$ означає заокруглення до найближчого цілого значення.

Значення показника R_s визначає кількість структур, які будуть згенеровані на основі s -ї структури із множини Λ_{mcn}^1 . Зазначений показник R_s у контексті поведінкової моделі бджолої колонії означає кількість бджіл-дослідників, які обрали відоме джерело-нектару з координатами Λ_{mcn}^1 .

Авторами зазначеного методу запропоновано обчислювати значення показника R_s на основі такого припущення: кількість бджіл-дослідників, що летить в окіл джерела нектару, про яке повідомила робоча бджола, прямо пропорційно залежить від його якості. Тобто вважається, що кількість «завербованих» бджіл-дослідників з математичної точки зору завжди є лінійною функцією (19) якості джерела нектару. Одночасно запровадження нелінійності цієї функції забезпечить інтенсивніше дослідження ділянок простору пошуку розв'язків, які характеризуються меншими значеннями функції мети в задачі (18). Звісно, з одного боку, застосування такого підходу забезпечує можливість швидшого знаходження глобального мінімуму функції мети, а з іншого – існує ризик «обійти» перспективні ділянки багатоекстремальної функції мети задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

Виходячи з вище зазначеного, у дисертаційній роботі досліджено застосування двох випадків нелінійності функції якості джерела нектару – квадратичної та кубічної залежності кількості згенерованих на основі поточної структури ІДДМ «структур-нащадків» від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$, відповідно:

$$R_s = ToInt \left[\frac{S \cdot \left(2 \cdot \max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 \mid s=1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 - \left(\delta(\lambda_{s-1}^1) \right)^2 \right)}{\sum_{s=1}^S \left(\max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 \mid s=1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 \right)} - R_{s-1} \right], s = 2 \dots S, (20)$$

$$R_s = ToInt \left[\frac{S \cdot \left(2 \cdot \max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 \mid s=1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 - \left(\delta(\lambda_{s-1}^1) \right)^3 \right)}{\sum_{s=1}^S \left(\max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 \mid s=1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 \right)} - R_{s-1} \right], s = 2 \dots S. (21)$$

Далі в розділі наведено результати розробки програмного забезпечення для ідентифікації ІДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках. Зокрема, розширено функціональні можливості існуючого програмного комплексу в спосіб уведення двох додаткових модулів: програмного модуля реалізації алгоритмів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та модуля реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» для реалізації методу структурної ідентифікації.

У **четвертому розділі** із використанням програмного комплексу на основі розроблених програмних засобів реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації ІДДМ побудовано три математичних моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на різних стадіях: ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу, відповідно.

В основі усіх моделей інтервальні дані, які отримано з літератури для умов використання 5-літрового реактора з періодичним завантаженням початкового об'єму субстрату 3 дм³, який містить ТПОВ, посівний матеріал (мікроорганізми) та дистильовану воду. Розглянуто динаміку процесу протягом 50 діб при зміні температури на інтервалі $T_0 = [35; 37]^\circ\text{C}$. Іншим параметром технологічного процесу є кислотність середовища, яку можливо корегувати способом додавання певної кількості лужного розчину, наприклад після стадії ацидогенезу за результатами моделювання цієї стадії.

Для синтезу структури за допомогою методу структурної ідентифікації згенеровано множину структурних елементів F з потужністю L . Множина структурних елементів містить поліноміальні функції, не вищі третього степеня.

У підсумку застосування алгоритму бджолиної колонії до розв'язування задачі (3) отримали ІДДМ, яка визначає динаміку концентрації ацетату в БГУ:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_k^-, \hat{v}_k^+] = & [0.0641; 0.0642] + [0.7601; 0.7604] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] + [0.1788; 0.1789] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \times \\ & \times [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] - [0.0929; 0.0931] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-9}^-, \hat{v}_{k-9}^+] - [0.0017; 0.0018] \cdot [\hat{v}_{k-9}^-, \hat{v}_{k-9}^+] \times \\ & \times [\hat{v}_{k-5}^-, \hat{v}_{k-5}^+] - [0.0068; 0.0069] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-3}^-, \hat{v}_{k-3}^+] \cdot [\hat{v}_{k-5}^-, \hat{v}_{k-5}^+], k = 9 \dots 49. \end{aligned} (22)$$

Також отримали ІДДМ, які визначають відсотки МСО рРНК кислоутворюючих та метаноутворюючих бактерій в БГУ, відповідно:

$$\begin{aligned}
[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = & -[0.0491; 0.0497] + [0.1021; 0.1026] \cdot [\hat{v}_{k-6}^-; \hat{v}_{k-6}^+] [\hat{v}_{k-6}^-; \hat{v}_{k-6}^+] / [\hat{v}_{k-8}^-; \hat{v}_{k-8}^+] - \\
& -[0.1711; 0.1719] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] \cdot [\hat{v}_{k-6}^-; \hat{v}_{k-6}^+] \cdot [\hat{v}_{k-14}^-; \hat{v}_{k-14}^+] \cdot [\hat{v}_{k-14}^-; \hat{v}_{k-14}^+] + [0.58; 0.5804] \times \\
& \times [\hat{v}_{k-4}^-; \hat{v}_{k-4}^+] \cdot [0.0231; 0.0234] \cdot [\hat{v}_{k-10}^-; \hat{v}_{k-10}^+] \cdot [\hat{v}_{k-10}^-; \hat{v}_{k-10}^+] \cdot [\hat{v}_{k-10}^-; \hat{v}_{k-10}^+] + \\
& + [0.4512; 0.4519] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+], k = 15 \dots 49;
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = & [0.8527; 0.8531] + [0.0029; 0.0031] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \cdot [\hat{v}_{k-9}^-; \hat{v}_{k-9}^+] \cdot [\hat{v}_{k-16}^-; \hat{v}_{k-16}^+] - \\
& - [0.1009; 0.1011] \cdot [\hat{v}_{k-8}^-; \hat{v}_{k-8}^+] / [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] + [0.8617; 0.8621] \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] - \\
& - [0.1278; 0.1279] \cdot [\hat{v}_{k-5}^-; \hat{v}_{k-5}^+] - [0.0342; 0.0344] \cdot [\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] / [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], k = 16 \dots 49.
\end{aligned} \tag{24}$$

Отримані ІДДМ адекватно відображають процес бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу (див. рис. 4 – рис. 6) за умов розкиду температури процесу.

Отримані моделі дають можливість спрогнозувати коридор динаміки концентрації ацетату, відсотків МСО рРНК кислотоутворюючих та метаноутворюючих бактерій в БГУ на всіх стадіях процесу бродіння. Для застосування отриманої ІДДМ з метою прогнозування концентрації ацетату та відсотків МСО рРНК кислотоутворюючих та метаноутворюючих бактерій в субстраті, достатньо задати тільки початкові умови.

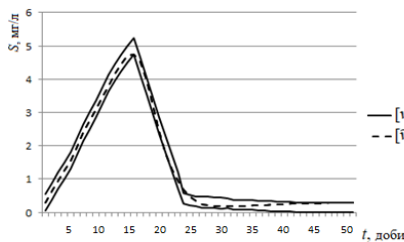


Рис. 4 – Коридор динаміки концентрації ацетату ТПОВ

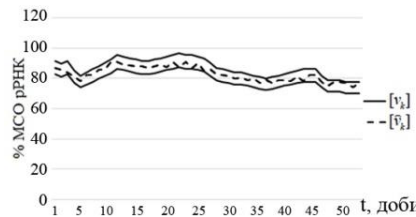


Рис. 5 – Коридор динаміки відсотку МСО рРНК кислотоутворюючих бактерій

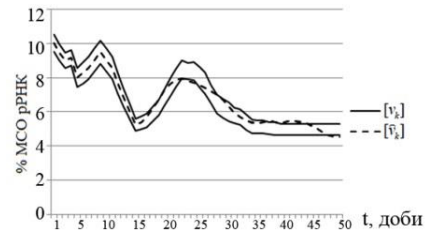


Рис. 6 – Коридор динаміки відсотку МСО рРНК метаноутворюючих бактерій

У дисертаційній роботі також досліджено особливості обрання інтервалів для початкових умов. Установлено, 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 утрачається стійкість поточної структури моделі, або її взагалі неможливо встановити.

У кінці розділу наведено результати перевірки ефективності застосування виразів (19) – (21) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації ІДДМ на стадії ацетогенезу та встановлено, що «найефективнішою» реалізацією фази активності бджіл-дослідників із поведінкової моделі у методі структурної ідентифікації є реалізація із застосуванням квадратичної залежності (20). Застосування цієї залежності дозволяє підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і, таким чином, знизити обчислювальну складність його реалізації мінімум на 5% для простих моделей та до 50% для більш складних.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове завдання розробки комплексу ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які забезпечують урахування технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях шляхом розробки та застосування методів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та структурної ідентифікації цих моделей на основі алгоритмів бджолиної колонії.

При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. За результатами аналізу існуючих моделей процесів у біогазових установках встановлено їх два класи: перші ґрунтуються на біохімічних перетвореннях та є детермінованими; другі є математичними моделями у вигляді ДДМ, які побудовано на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів і ураховують їх стохастичність. Показано, що обидва класи моделей не враховують можливі зміни протікання процесу бродіння на будь-якій стадії та технологічні відхилення його змінних. Запропоновано враховувати розкид технологічних параметрів процесу та похибки у результатах спостережень із застосуванням методів аналізу інтервальних даних.

2. Проаналізовано методи структурної та параметричної ідентифікації ДДМ. Установлено, що більшість із них не придатна для використання у випадку інтервального представлення результатів експерименту. Обґрунтовано використання поведінкових моделей бджолиної колонії для структурної ідентифікації ДДМ процесів анаеробного мікробіологічного бродіння. Показано, що існуючі методи мають високу обчислювальну складність і зорієнтовані на знаходження однієї моделі без урахування множинності оцінок параметрів завдяки невизначеності. Для урахування невизначеності запропоновано та обґрунтовано побудову інтервальних оцінок параметрів ДДМ.

3. Уперше запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів. Метод забезпечує отримання множини адекватних моделей з урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок у результатах спостережень.

4. 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.

5. Удосконалено метод структурної ідентифікації ДДМ на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолиної колонії. У запропонованому методі використано нелінійний оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару», що дозволило підвищити

ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і таким чином знизити обчислювальну складність його реалізації. На тестових прикладах показано зниження обчислювальної складності мінімум на 5% для простих моделей та до 50% для більш складних.

6. Створено програмний комплекс із розширеними функціональними можливостями внаслідок уведення в існуючий комплекс програмного модуля реалізації алгоритмів параметричної ідентифікації ДДМ процесів з інтервальним представленням їх параметрів та процедури для реалізації нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у програмному модулі структурної ідентифікації.

7. Із застосуванням зазначеного програмного комплексу підтверджено достовірність отриманих наукових результатів на тестових прикладах та при побудові комплексу математичних моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу. Розроблений програмний комплекс упроваджено в навчальний процес, а побудовані математичні моделі – безпосередньо на біогазовій установці на базі лабораторії «Технології виробництва біогазу» Бережанського агротехнічного інституту та на базі комунального підприємства «Тернопільміськтеплокомуненерго» в м. Тернополі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Гураль І.В., Дивак М.П., Піговський Ю.Р. Модель неавтономної системи виробництва біогазу та метод її ідентифікації. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: науковий журнал. Кременчук, 2015. Вип. 3/2015 (92). С. 129-136.

2. Порплиця Н.П., Гураль І.В., Дивак М.П. Метод структурної ідентифікації моделей процесу бродіння у біогазових установках із застосуванням алгоритму бджолоїної колонії. Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Т. 27, № 1. С. 215-221.

3. Гураль І.В., Дивак М.П., Порплиця Н.П. Макромоделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння твердих побутових відходів на стадіях ацидогенезу та метаногенезу. Індуктивне моделювання складних систем. 2017. Вип. 9. С. 50-68.

4. Hural I., Dyvak M., Stakhiv P. Macromodelling of fermentation process of municipal solid organic waste at biogas plants on the acidogenesis stage. Journal of Applied Computer Science. 2016. V. 24, Is. 1. P. 17-36.

5. Гураль І.В. Макромоделювання стадії метаногенезу зброджування твердих побутових органічних відходів у біогазових установках. Вісник національного технічного університету «ХП». Серія «Математичне моделювання в техніці і технологіях». 2016. № 16. С. 23-30.

6. Гураль І.В., Порплиця Н.П. Програмний комплекс для моделювання процесів бродіння в біогазових установках. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнар. наук.-техн. журнал. Хмельницький, 2016. № 3 (56). С. 152-158.

7. Гураль І.В., Дивак М.П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромодельовання процесів виробництва біогазу. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: міжнар. наук.-техн. журнал. Хмельницький, 2014. № 2. С. 152-158.

8. Дивак М.П., Гураль І.В. Інтервальне представлення динаміки анаеробного мікро-біологічного бродіння в біогазових установках. Індуктивне моделювання складних систем. 2014. Вип. 6. С. 55-68.

9. Dyvak M., Hural I., Lipinski P. Modeling the processes of dynamics at biogas plants on the acetogenesis stage. Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 17th International Conference (CPEE' 2016). Sandomierz, Poland, 2016. P. 101-104.

10. Гураль І.В. Моделювання динаміки процесів у біогазових установках на стадії метаногенезу. VI Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2016): матеріали. Тернопіль, 2016. С. 35-36.

11. Гураль І.В., Піговський Ю.Р. Неавтономна модель динаміки об'єму залишкової маси бананових відходів та ідентифікація її параметрів. V Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2015): матеріали. Тернопіль, 2015. С. 16-18.

12. Hural I., Dyvak M., Pigovsky Yu., Spilchuk V. Autonomous systems modification of Mono`s differential equations to non-autonomous systems in the tasks of modeling processes problems at biogas plants. 13-th International Conference «The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics», Polyana Svalyava (Zakarpattya). Lviv, 2015. P. 93-96.

13. Гураль І.В. Аналіз інтервальних даних в задачі оцінювання щодобового виходу метану під час анаеробного мікробіологічного бродіння. IV Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2014): матеріали. Тернопіль, 2014. С. 16-18.

14. Hural I., Voytyuk I., Martsenyuk Ye. Analysis of biochemical processes as a basis for building macro models of dynamic processes at biogas plants. 12-th International Conference «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science», Lviv-Slavske. Lviv, 2014. P. 750-751.

15. Dekhtiar (Hural) I., Dyvak T., Martsenyuk Ye. Features of biogas production process and methods of its modeling. 12-th International Conference «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics», Polyana-Svalyava (Zakarpattya). Lviv, 2013. P. 66-68.

16. Дехтяр (Гураль) І.В. Аналіз факторів управління процесами анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках. III Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» (АСІТ'2013): матеріали. Тернопіль, 2013. С. 21-22.

АНОТАЦІЇ

Гураль І.В. Інтервальне моделювання процесів у біогазових установках в умовах структурної та параметричної невизначеності. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукового завдання побудови та дослідження математичних моделей анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках із врахуванням технологічних відхилень змінних процесу на різних його стадіях на основі розробки та застосування методу параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів та методу структурної ідентифікації цих моделей із застосуванням алгоритмів бджолоїної колонії.

Проаналізовано існуючі математичні моделі процесів у біогазових установках, а також методи їх структурної та параметричної ідентифікації. Уперше запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації дискретних динамічних моделей процесів з інтервальним представленням їх параметрів. Удосконалено метод структурної ідентифікації дискретних динамічних моделей на основі аналізу інтервальних даних та з використанням поведінкових моделей бджолоїної колонії. Розроблено програмний комплекс із розширеними функціональними можливостями та на його основі побудовано математичні моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння на стадіях ацидогенезу, ацетогенезу та метаногенезу.

Ключові слова: інтервальне моделювання, параметрична ідентифікація, структурна ідентифікація, алгоритм бджолоїної колонії, інтервальна дискретна динамічна модель, тверді побутові органічні відходи, анаеробне мікробіологічне бродіння, біогазова установка.

Гураль И.В. Интервальное моделирование процессов в биогазовых установках в условиях структурной и параметрической неопределенности. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 - математическое моделирование и вычислительные методы. Национальный университет «Львовська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению актуального научного задания построения и исследования математических моделей анаэробного микробиологического брожения в биогазовых установках с учетом технологических отклонений переменных процесса на различных его стадиях на основе разработки и применения метода параметрической идентификации дискретных динамических моделей процессов с интервальным представлением их параметров и метода структурной идентификации этих моделей с применением алгоритмов пчелиной колонии.

Проанализированы существующие математические модели процессов в биогазовых установках, а также методы их структурной и параметрической идентификации. Впервые предложено и обосновано метод параметрической идентификации дискретных динамических моделей процессов с интервальным

представлением их параметров. Усовершенствован метод структурной идентификации дискретных динамических моделей на основе анализа интервальных данных и с использованием поведенческих моделей пчелиной колонии. Разработан программный комплекс с расширенными функциональными возможностями, и на его основе построены математические модели процессов анаэробного микробиологического брожения на стадиях ацидогенеза, ацетогенеза и метаногенеза.

Ключевые слова: интервальное моделирование, параметрическая идентификация, структурная идентификация, алгоритм пчелиной колонии, интервальная дискретная динамическая модель, твердые бытовые органические отходы, анаэробное микробиологическое брожения, биогазовая установка.

Hural I.V. Interval modeling of processes at biogas plants in terms of structure and parametric uncertainty. – On the right of manuscript.

Thesis for a Ph.D degree in Technical Sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

Dissertation is devoted to the actual scientific task of constructing and researching mathematical models of anaerobic microbiological fermentation at biogas plants, taking into account technological deviations of variable processes at its various stages, on the basis of the development and application of parametric identification method of discrete dynamic process models with an interval representation of their parameters and the structure identification method of these models with application of bee colony algorithms.

The existing mathematical models of processes at biogas plants, as well as methods of their structure and parametric identification are analyzed.

For the first time, the parametric identification method of discrete dynamic process models with an interval representation of their parameters was proposed and substantiated. This ensures obtaining a plurality of adequate models taking into account the spread of technological process parameters and errors in the results of observations.

The structure identification method of discrete dynamic models is improved on the basis of interval data analysis and using the bee colony behavioral models. This allowed to increase the heterogeneity degree of the area solutions coverage of the structure identification task and reduce the computational complexity of its implementation.

The software complex with expanded functionality has been developed and based on it mathematical models of the anaerobic microbiological fermentation processes in the acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis stages are constructed. The obtained discrete dynamic models take into account the technological parameters spread, the acidity of the medium and temperature, as well as errors in the observations results, which provides the opportunity to adjust the process flow after each stage at biogas plants.

Key words: interval modeling, parametric identification, structural identification, bee colony algorithm, interval discrete dynamic model, municipal solid organic waste, anaerobic microbiological fermentation, biogas plant.

Підписано до друку 02.11.2018 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Зам. № 7-577
Умов.-друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 прим.

Віддруковано ФО-П Шпак В. Б.
Свідоцтво про державну реєстрацію В02 № 924434 від 11.12.2006 р.
м. Тернопіль, бульвар Просвіти, 6/4. тел. 8 097 299 38 99.
E-mail: toooms@ukr.net