

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії

ЧЕХУТ Іван Романович

**«Алгоритми структурної ідентифікації
анаеробного мікробіологічного бродіння на
основі інтервальних моделей / Structure
identification algorithms of anaerobic
microbiological fermentation based on interval
models.»**

Студент групи КІм – 21
ЧЕХУТ Іван Романович

Науковий керівник
к.т.н., Н. Я. Савка

Тернопіль – 2020

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії
Освітній ступінь «магістр»
спеціальність: 123 - Комп'ютерна інженерія
освітньо-професійна програма - Комп'ютерна інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ О.М. Березький
“ ____ ” _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Чехуту Івану Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи «Алгоритми структурної ідентифікації анаеробного мікробіологічного бродіння на основі інтервальних моделей / Structure identification algorithms of anaerobic microbiological fermentation based on interval models»

керівник роботи к.т.н., ст. викл. Н.Я. Савка

затверджені наказом по університету від «17» грудня 2019 р. № 827.

2. Строк подання студентом роботи «16» листопада 2020 року

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи

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

Предмет дослідження – інтервальні різницеві рівняння процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

4. Основні питання, які потрібно розробити

– провести аналіз біохімічних процесів анаеробного бродіння у біогазових установках;

– охарактеризувати особливості задач математичного моделювання в умовах структурної невизначеності;

– оцінити якість структури інтервального різницевого рівняння;

– удосконалити метод структурної ідентифікації різницевого рівняння на основі алгоритму бджолиної колонії;

– розробити алгоритм структурної ідентифікації анаеробного мікробіологічного бродіння на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл;

– провести верифікацію розробленого алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння

– розробити програмну систему для ідентифікації інтервальних різницевих рівнянь процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

5. Перелік графічного матеріалу в роботі:

- схема біохімічного процесу утворення біогазу;
- схема послідовності перетворень методу структурної ідентифікації;
- схематичне зображення покриття простору розв’язків задачі структурної ідентифікації;
- узагальнена блок-схема алгоритму реалізації удосконаленого методу структурної ідентифікації;
- об’єктно-орієнтована модель програмної системи реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Антиплагіат	Мельник Г.М., к.т.н., доцент		
Нормо-контроль	Мельник Г.М., к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання « 17 » грудня 2020 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Аналіз методів моделювання біохімічних процесів бродіння у біогазових установках	17.11.2019 – 1.01.2020	
2	Метод структурної ідентифікації різницевого рівняння в інтервальному вигляді	2.01.2020 – 31.05.2020	
3	Алгоритми реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння в задачі анаеробного мікробіологічного бродіння	1.06.2020 – 14.11.2020	
4	Нормоконтроль, попередній захист	27.11.2020 – 4.12.2020	
5	Захист	8-15.12.2020	

Студент _____ І.Р. Чехут
(підпис)

Керівник роботи _____ к.т.н., ст. викл. Н.Я. Савка
(підпис)

РЕЗЮМЕ

Кваліфікаційна робота на тему «Алгоритми структурної ідентифікації анаеробного мікробіологічного бродіння на основі інтервальних моделей» зі спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія» написана обсягом 94 сторінки і містить 14 ілюстрацій, 3 таблиці, 2 додатки та 70 джерел за переліком посилань.

Метою роботи є розробка алгоритмів структурної ідентифікації процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із застосуванням інтервального моделювання.

Методи досліджень. Для розв'язання поставлених задач у кваліфікаційній роботі використано методи: аналізу інтервальних даних, стохастичного програмування та теорії самоорганізації систем (для удосконалення методу структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння); теорії ідентифікації різницевих рівнянь та індуктивного моделювання (при побудові моделей процесу бродіння); об'єктно-орієнтованого програмування (для проектування програмної системи реалізації алгоритмів структурної ідентифікації).

Результати дослідження: алгоритми структурної ідентифікації та розширені функціональні можливості програмної системи для ідентифікації інтервальних різницевих рівнянь процесів бродіння.

Результати роботи можуть бути використані для оцінювання потенційних можливостей ресурсів при плануванні створення біогазової установки.

Орієновані напрямки розвитку досліджень: розвиток альтернативної енергетики, розробка біогазових установок.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: АНАЕРОБНЕ МІКРОБІОЛОГІЧНЕ БРОДІННЯ, ІНТЕРВАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, ІНТЕРВАЛЬНЕ РІЗНИЦЕВЕ РІВНЯННЯ, МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ, АЛГОРИТМ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ.

RESUME

Qualification work «Structure identification algorithms of anaerobic microbiological fermentation based on interval models» from the specialty 123 «Computer Engineering» written 94 pages and contains 14 illustrations, 3 tables, 2 appendices and 70 sources for references.

The aim is to develop algorithms for structure identification of anaerobic microbiological fermentation processes at biogas plants using interval modeling.

Research methods. To solve the tasks in the qualification work used methods: interval data analysis, stochastic programming and the theory of self-organization systems (to improve the method of structural identification of the interval difference equation); theories of difference equations identification and inductive modeling (when building models of the fermentation process); object-oriented programming (for designing a software system for implementing structural identification algorithms).

Research results: structure identification algorithms and extended software system functionality for interval difference equations identification of fermentation processes.

The results can be used to assess the potential of resources when planning the biogas plant creation.

The estimated direction of research: alternative energy development, biogas plants development.

KEY WORDS: ANAEROBIC MICROBIOLOGICAL FERMENTATION, INTERVAL MODELING, INTERVAL DIFFERENCE EQUATION, STRUCTURE IDENTIFICATION METHOD.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз методів моделювання біохімічних процесів бродіння у біогазових установках.....	11
1.1 Аналіз біохімічних процесів бродіння у біогазових установках.....	11
1.2 Особливості задач та методів математичного моделювання в умовах невизначеності.....	19
1.3 Постановка задачі кваліфікаційної роботи.....	25
1.4 Висновки до розділу.....	26
2 Метод структурної ідентифікації різницевого рівняння в інтервальному вигляді.....	28
2.1 Обґрунтування вибору методу структурної ідентифікації різницевого рівняння.....	28
2.2 Математична задача оцінювання якості структури на основі інтервальних моделей.....	37
2.3 Метод структурної ідентифікації різницевого рівняння на основі алгоритму бджолоїної колонії.....	44
2.4 Висновки до розділу.....	50
3 Алгоритми реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння в задачі анаеробного мікробіологічного бродіння.....	51
3.1 Розробка алгоритмів структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл.....	51
3.2 Порівняльний аналіз ефективності алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння.....	57
3.3 Опис об'єктної моделі та алгоритмічної реалізації методу структурної ідентифікації різницевого рівняння в інтервальному вигляді.....	60

3.4 Висновки до розділу.....	68
Висновки.....	69
Список використаних джерел.....	71
Додаток А Лістинг програмного коду.....	79
Додаток Б Світлокопії публікацій.....	88

ВСТУП

Актуальність теми. Одним з найбільш поширених джерел енергії є біогаз, який утворюється внаслідок процесу бродіння за допомогою біогазових установок.

Організація процесу бродіння у біогазових установках є складною при різній структурі сировини. Найпоширенішим методом отримання біогазу є мікробіологічний метод безвідходного виробництва за допомогою анаеробного бродіння. Дуже цінним продуктом виробництва біогазу є отримання високоякісних органічних добрив. Тому, важливим завданням є можливість керувати біопроцесами та необхідність надійно утримувати стабільними основні параметри процесу для забезпечення високої ефективності біогазових установок.

На сьогоднішній день розроблено ряд математичних моделей, які описують взаємозв'язки між факторами, що впливають на обсяг виробництва біогазу та характеристиками біогазової установки. Проте, зазначені моделі не встановлюють узагальнену схему процесів, які відбуваються в біогазових установках різного типу з різним видом сировини. Одним із можливих засобів, які дають можливість усунути зазначені протиріччя є математичне моделювання процесів на основі різницевих рівнянь, які пов'язують вхідні фактори впливу на процес виробництва біогазу із вихідними (кількість виробленого біогазу та якість відбродженого субстрату). У результатах спостережень розкид факторів впливу на процес та похибки вимірювань призводять до необхідності застосування інтервального моделювання

Особливістю такого моделювання є характеристика процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою параметричною і структурною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

Актуальність дослідження полягає у розробці алгоритмів структурної ідентифікації біохімічних процесів анаеробного бродіння, які б враховували можливість зміни процесу на будь-якій з його стадій, а також технологічних відхилень змінних процесу, через різну структуру біосировини та неоднорідність, кислотність середовища та температуру.

Отже, метою роботи є розробка алгоритмів структурної ідентифікації процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із застосуванням інтервального моделювання.

Для досягнення цієї мети поставлено наступні завдання:

- 1) провести аналіз біохімічних процесів анаеробного бродіння у біогазових установках;
- 2) охарактеризувати особливості задач математичного моделювання в умовах структурної невизначеності;
- 3) проаналізувати методи структурної ідентифікації інтервальних математичних моделей;
- 4) оцінити якість структури інтервального різницевого рівняння;
- 5) удосконалити метод структурної ідентифікації різницевого рівняння на основі алгоритму бджолоїної колонії;
- 6) розробити алгоритм структурної ідентифікації анаеробного мікробіологічного бродіння на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл;
- 7) провести верифікацію розробленого алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння;
- 8) розробити програмну систему для ідентифікації інтервальних різницевих рівнянь процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

Об'єктом дослідження є процеси анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках.

Предметом дослідження є інтервальні різниці рівняння процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

Наукова новизна одержаних результатів визначається наступним:

1) удосконалено метод структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолої колонії із мінімізацією обчислювальної складності;

2) розроблено програмну систему для ідентифікації інтервальних різницевого рівнянь процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

Практична цінність полягає у розробці алгоритму реалізації методу структурної ідентифікації анаеробного бродіння на основі інтервальних моделей.

Публікації та апробація КР. Основні результати досліджень опубліковано в тезах доповідей «Обґрунтування вибору неавтономної моделі процесу бродіння у біогазовій установці» обсягом 1 повна сторінка на VII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих науковців «Інформаційні технології» (ІТ-2020) [1] та «Обґрунтування вибору штучної нейронної мережі для навігації роботехнічної платформи» обсягом 1 сторінка на III науково-практичній конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2020) [2].

Зазначена кваліфікаційна робота містить три розділи [3, 4].

У першому розділі проведено аналіз методів моделювання біохімічних процесів у біогазових установках.

У другому розділі удосконалено метод структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл.

У третьому розділі розроблено алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння в задачі анаеробного мікробіологічного бродіння.

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ МОДЕЛЮВАННЯ БІОПРОЦЕСІВ У БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

1.1 Аналіз біохімічних процесів бродіння у біогазових установках

Одним з пріоритетних напрямків розвитку енергетики в ХХІ ст. є широке використання відновлюваних джерел енергії, що мають величезні ресурси, що дозволить знизити негативний вплив енергетики на навколишнє середовище, підвищити енергетичну і екологічну безпеку.

До традиційних джерел енергії відносяться: невідновлювані, що включають вугілля, природний газ, нафта, уран; поновлювані, що включають гідроенергетику та деревину. Проте, одним з найбільш поширених джерел енергії є біомаса, яка використовується в біоенергетиці за допомогою біогазових установок.

Біомаса є одним з найдавніших джерел енергії, однак її використання до недавнього часу зводилося до прямого спалювання при відкритому вогні або в печах і топках з відносно низьким коефіцієнтом корисної дії.

Під біомасою розуміють органічні речовини, які утворюються в рослинах в результаті фотосинтезу і можуть бути використані для отримання енергії, включаючи всі види рослинності, рослинні відходи сільського господарства, деревообробної та інших видів промисловості. У більш широкому розумінні до біомаси відносять також побутові і промислові відходи не завжди рослинного походження, але для яких характерні однакові принципи їх утилізації.

Використання біомаси для отримання енергії на основі сучасних технологій є екологічно значно більш безпечним порівняно з енергетичним використанням традиційних органічних ресурсів, таких як вугілля.

Потенційні ресурси рослинної біомаси, які можуть використовуватися в якості джерела енергії, досягають 100 млрд. т у.п. В даний час в світовому

енергобалансі рослинна біомаса (в основному дрова) не перевищують 1 млрд.т у.п. (близько 12%).

При застосуванні сучасних технологій частка біомаси в світовому енергобалансі може значно зрости.

Біомаса відіграє істотну роль в енергобалансах промислово розвинених країн: в США її частка становить 4%, в Данії – 6%, в Канаді – 7%, в Австрії – 14%, в Швеції – 16% загального споживання первинних енергоресурсів цих країн.

У світі в 2014 р встановлена потужність електростанцій на біомасі склала 39 млн. кВт.

У плані використання біомасу можна розділити на дві основні групи: первинна біомаса і вторинна. Джерелом первинної біомаси є наземний і водний рослинний світ; вторинної – відходи біомаси, що утворюються після збору і переробки первинної біомаси в товарні продукти, і відходи, обумовлені життєдіяльністю тварин і людей.

Відповідно до цього біоенергетика забезпечує отримання енергії за допомогою використання біомаси, включаючи:

- 1) продукти лісу у вигляді відходів лісозаготівель і лісопереробки;
- 2) сільськогосподарські відходи, що підрозділяються на рослинні відходи сільськогосподарських культур (солома злакових культур, стебла кукурудзи, соняшника та ін.) і тваринницькі відходи (гній і гнойові стоки та ін.);
- 3) водну рослинну біомасу (водорості, макрофітів тощо).

Найбільш ефективними технологіями використання біомаси в біоенергетиці є пряме спалювання; піроліз; газифікація; анаеробне бродіння з утворенням метану; виробництво спиртів і масел для отримання моторного палива.

Технології використання біомаси постійно вдосконалюються, забезпечуючи отримання енергії в зручній для споживача формі і з максимально можливою ефективністю.

У загальному випадку енергія з органічних відходів виходить або фізичним, або хімічним або мікробіологічним методами. Фізичним методом енергію отримують шляхом спалювання органічних відходів. Основою хімічного методу є використання процесів піролізу і газифікації.

Найпоширенішим в світі є мікробіологічний метод безвідходного виробництва – отримання біогазу за допомогою анаеробного бродіння. Дуже цінним продуктом виробництва біогазу є отримання високоякісних органічних добрив. Класифікація технологій з поетапним перетворенням біомаси в енергетичні продукти представлена на рисунку 1.1.

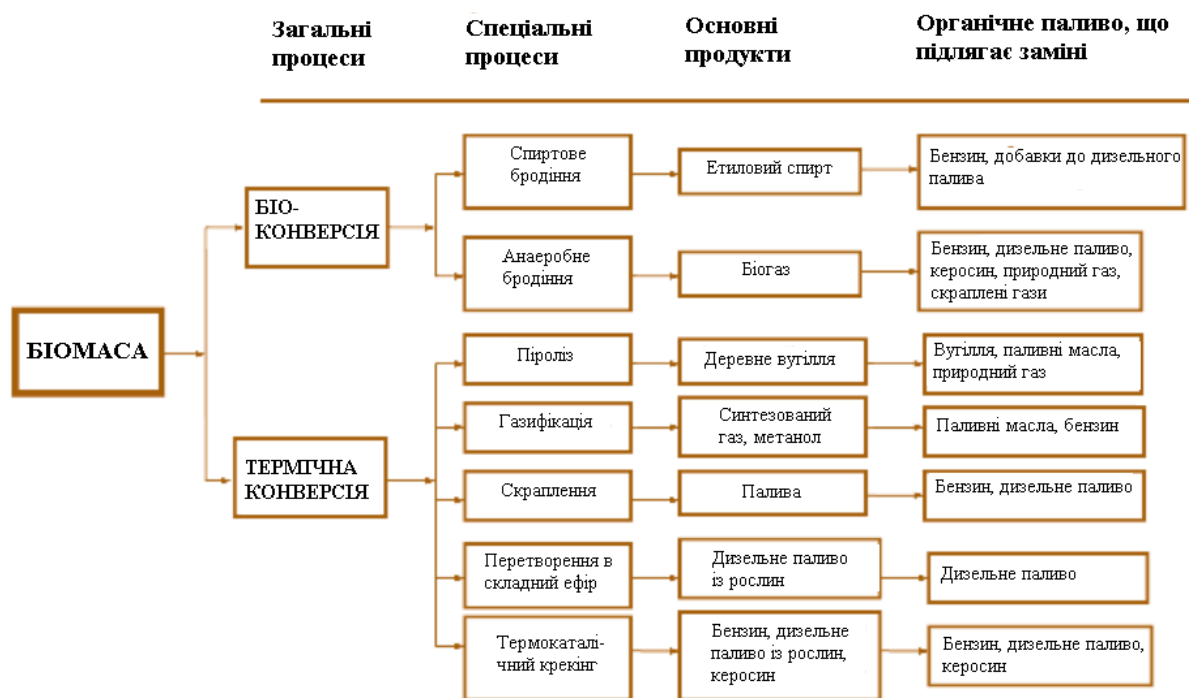


Рисунок 1.1 – Класифікація технологій перетворення енергії біомаси

Пряме спалювання біомаси в атмосфері повітря або кисню – один з найбільш старих методів отримання теплової енергії. Однак є ряд проблем при його практичному використанні, головною з яких є досягнення найбільш повного згоряння палива, в результаті якого утворюються діоксид вуглецю і вода, що не приносять шкоди навколишньому середовищу. До технічних пристроїв, що застосовуються для прямого спалювання біомаси, відносяться печі, топки, камери згоряння. Біомаса може бути використано за допомогою

прямого спалювання в енергетичних установках в факелі, киплячому або ущільненому шарі з подальшим отриманням теплової та електричної енергії. Основна промислова технологія цього напрямку – пряме спалювання в котлі і генерування електроенергії в паротурбінній установці.

Піроліз біомаси – хімічне перетворення одних органічних сполук в інші під впливом теплоти або так звана суха перегонка без доступу окислювачів (кисню, повітря). Розроблено ряд технологічних процесів піролізу біомаси, експлуатаційні умови кожного з них визначаються природою сировини, методами переробки і заданими продуктами виробництва. Характеристика продуктів піролізу залежить від типу сировини і умов проведення процесу. Основними продуктами піролізу можуть бути вуглиста речовина, паливна рідина, паливні гази, причому часто технологічний процес орієнтований на переважне отримання одного з продуктів піролізу.

Газифікація біомаси – це перетворення твердих відходів біомаси в горючі гази за допомогою неповного їх окислення повітрям (киснем, водяною парою) при високій температурі. Газифікувати можна практично будь-яке паливо, в результаті чого отримують генераторні гази, що мають великий діапазон використання – в якості палива для отримання теплової енергії в побуті та різних процесах промисловості, в двигунах внутрішнього згоряння, в якості сировини для отримання водню, аміаку, метилового спирту і синтетичного рідкого палива. Незважаючи на велику різноманітність способів газифікації, всі вони характеризуються одними й тими самими реакціями. Газифікатори мають різну продуктивність з різним виходом енергії в паливному газі. Низькокалорійний газ може бути отриманий газифікацією різних видів біомаси – органічних компонентів твердих побутових відходів, відходів лісу, сільськогосподарських відходів.

В процесі анаеробного бродіння біомаси складні органічні речовини розкладаються на CO_2 і CH_4 з утворенням біогазу в вигляді суміші вугілля для відкачування шламу з метантенка кислого газу й метану, при чому на частку метану може припадати до 70%. Технологічний процес анаеробного бродіння

біомаси проводиться без доступу кисню в спеціальних реакторах-метантенках, конструкція яких забезпечує максимальне виділення метану. Особливо важливим в процесі анаеробного бродіння біомаси є створення оптимальних технологічних умов в реакторі метантенку: температури, доступу кисню, достатній концентрації поживних речовин, допустимого значення pH , відсутність або низької концентрації токсичних речовин.

Найбільш ефективними вважаються біореактори, які працюють в термофільному 43-62°C. На таких установках з триденною ферментацією гною вихід біогазу становить 4,5 л на кожен літр корисного об'єму реактора.

Сучасні біогазові анаеробні установки складаються з таких основних систем:

- 1) системи підготовки та подачі сировини в біореактор;
- 2) біореактора (метантенка) з системою підтримки постійної температури і іншими комплектуючими пристроями;
- 3) системи збереження і використання біогазу;
- 4) системи вивантаження і транспортування шламу.

У більшості країн світу виробництво біогазу поставлено на промислову основу. У західній Європі експлуатуються близько 1000 біогазових установок середнього розміру. Кілька мільйонів установок присадибного типу є в Індії. У Китаї тільки великих і середніх біогазових установок понад 10 млн.

У біоенергетиці України може бути використаний великий енергетичний потенціал біомаси, в тому числі наявний в сільському господарстві надлишок соломи та стебел сільськогосподарських рослин, що становить близько 20 млн. т, для опалювальних котелень, розташованих в сільській місцевості (які споживають близько 2,9 млн. т у .т. в рік), а також для промислових енергетичних установок.

Ефективним шляхом є виробництво і використання біогазу при переробці рослинної і тваринницької біомаси.

Іншим джерелом біогазу служать звалища сміття. Потенційні можливості отримання біогазу із звалищ можуть становити 2,3 млрд. МЗ /

рік, що еквівалентно 1,6 млн. т у.п. Сировиною, з якого можна отримувати біогаз, можуть бути практично всі відходи, що містять органічні компоненти.

Отже, біогаз – загальна назва горючої газової суміші, одержуваної при розкладанні органічних субстанцій в результаті анаеробного мікробіологічного процесу (метанового бродіння).

Для ефективного виробництва біогазу з органічної сировини створюються комфортні умови для життєдіяльності декількох видів бактерій при відсутності доступу кисню.

Принципова схема процесу утворення біогазу представлена на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Схема біохімічного процесу утворення біогазу

Залежно від виду органічної сировини складу біогазу може змінюється, але, в загальному випадку, до його складу входять метан (CH_4 , частка – 63%), вуглекислий газ (CO_2 , частка – 33%), невелика кількість сірководню (H_2S , частка – 2%), аміаку (NH_3 , частка – 1%) і водню (H_2 , частка – 1%).

Так як біогаз на 2/3 складається з метану – горючого газу, що становить основу природного газу, його енергетична цінність (питома теплота

згоряння) становить 60-70% енергетичної цінності природного газу, або близько 7000 ккал на м³. 1 м³ біогазу також еквівалентний 0,7 кг мазуту і 1,5 кг дров.

Біогаз широко застосовується як пальне паливо в Німеччині, Данії, Китаї, США та інших розвинених країнах. Він подається в газорозподільні мережі, використовується в побутових цілях і в громадському транспорті. Сьогодні починається широке впровадження біогазових технологій на ринках СНД і Прибалтики.

Сировиною для отримання біогазу може служити широкий спектр органічних відходів – тверді і рідкі відходи агропромислового комплексу, стічні води, органічні компоненти твердих побутових відходів, відходи лісопромислового комплексу.

Якість відходів характеризується вологістю, виходом біогазу на одиницю сухої речовини і вмістом метану в біогазі.

Сучасні технології дозволяють переробляти в біогаз будь-які види органічної сировини, однак найбільш ефективним є використання біогазових технологій для переробки відходів тваринницьких і птахівничих ферм, підприємств і стічних вод, так як вони характеризуються постійністю потоку відходів в часі і простотою їх збору.

Біогазова установка – пристрій, що здійснює переробку органічних відходів в біогаз і органічні добрива. Біогазова станція – більш широке поняття, воно включає комплекс інженерних споруд, що складається з пристроїв для підготовки сировини, виробництва біогазу і добрив, очищення і зберігання біогазу, виробництва електроенергії та тепла.

У біореакторі підтримується постійна температура, необхідна для активної діяльності бактерій (від 20 до 50 °С). На підставі емпіричних даних установок періодичного завантаження, щодо температурних режимів, виділяють три основні: психофільний (20-25 °С), мезофільний температурний режим (25-40 °С) та термофільний (вище 40 °С). Перевагу здебільшого надають мезофільному режимові при оптимальній температурі 32-35 °С,

оскільки при цьому досягається економія енергії. Метанове бродіння – процес ендотермічний, який потребує постійного підігріву для підтримки температури бродіння. Метантенки і сировина переважно підігріваються за рахунок спалювання утвореного газу.

На сьогоднішній день розроблено ряд математичних моделей, які описують взаємозв'язки між факторами, що впливають на обсяг виробництва біогазу та характеристиками біогазової установки [5]. Водночас, зазначені моделі не встановлюють узагальнену схему процесів, які відбуваються в біогазових установках різного типу з різним видом сировини. Одним із можливих засобів, які дають можливість усунути зазначені протиріччя є математичне моделювання процесів на основі різницевого рівнянь, які пов'язують вхідні фактори впливу на процес виробництва біогазу із вихідними (кількість виробленого біогазу та якість відбродженого субстрату). Одна із таких моделей наведена у праці [6]. При її побудові передбачалось, що дані отримані в інтервальному вигляді, а процес накопичення біогазу описують алгебричним рівнянням.

Іншою проблемою моделювання зазначених процесів є відсутність реальних даних з біогазових установок для побудови неавтономної моделі у різних режимах.

Тому вирішення ряду протиріч пов'язаних з математичним моделюванням процесів у біогазових установках дозволить з одного боку обґрунтувати неавтономну модель, яка б враховувала фактори впливу, а з іншого боку отримати «експериментальні» дані, опираючись на детальний аналіз процесів у біогазовій установці та на результати досліджень наведених у працях [7-9].

1.2 Особливості задач та методів математичного моделювання в умовах невизначеності

Розглянемо відомі математичні моделі росту мікроорганізмів процесу анаеробного бродіння.

У праці [10] наведено математичну модель кінетики росту, яка отримана німецькими біохіміками Міхаелісом та Ментеном, та описує активну фазу бродіння залежно від концентрації субстрату. Ця залежність може бути перенесена на зростання бактерій, тому що мікробний ріст також є автокаталітичною реакцією [11]. Проте, у праці відомого вченого Моно [10, 12] наведено нелінійне співвідношення між питомою швидкістю росту мікроорганізмів та обмеженою концентрацією субстрату, при дослідженні зростання бактеріальних культур до теорії Міхаеліса-Ментена. Тому для визначення швидкості росту бактерій Моно сформулював вираз у такому вигляді:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_s + S}, \quad (1.1)$$

де μ – питома швидкість росту мікроорганізмів, *доба*⁻¹;

μ_{\max} – максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів, *доба*⁻¹;

K_s – кінетичний коефіцієнт;

S – концентрація субстрату.

Згідно з моделлю (1.1), для низької концентрації субстрату специфічні темпи росту сильно зростають, а для високої концентрації субстрату – повільно доти, поки не досягнеться насичення бактерій.

До граничного субстрату спорідненість бактерій виражається кінетичним коефіцієнтом K_s [10]. Питома швидкість росту мікроорганізмів

для $S < K_s$ є лінійною, а K_s завжди більше нуля, тому $S/(K_s + S)$ завжди менше, ніж 1, і відповідно, питома швидкість росту мікроорганізмів менше μ_{\max} .

Для чистих культур і простих субстратів точність моделі Моно дуже висока [12]. Модель підходить для однорідних культур, але не для гетерогенних культур або складних субстратів [13].

У праці відомого вченого Феффера [14], доведено, що для опису органічних компонентів твердих побутових відходів кінетику Моно не можна використовувати як складний субстрат. Оскільки в модель Моно фаза відставання не включена. Таким чином, було розроблено ряд модифікацій.

Модель Мозера у роботі [15] описує ріст, який відрізняється від експоненціальної характеристики. Тому автор для інтеграції ефектів прийняття мікроорганізмів до стаціонарних процесів удосконалив модель Моно з параметром n (зазвичай $n > 1$) шляхом мутації. Тобто для $n=1$ специфічний темп зростання стає рівним моделі Моно і має такий вигляд:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S^n}{K_s + S^n}. \quad (1.2)$$

Для розрахунку питомої швидкості росту мікроорганізмів Контва [16] зазначив не тільки залежність концентрації субстрату, але і концентрацію клітин. І таким чином, виникає ефект затухання процесу анаеробного бродіння [17]. Така модель як для періодичних, так і для неперіодичних процесів дає хороші результати, проте сильно обмежена її здатність моделювати динамічні процеси [18]:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{K_s \cdot X + S}. \quad (1.3)$$

У роботі Пауелла [19] вказано не тільки кінетику реакції, але й дифузію та проникнення субстрату через клітинну стінку двома додатковими параметрами K і L , де K описує кінетику росту мікроорганізмів через активність ферменту, а параметр L – дифузію та проникність. Модель Пауелла представлена в такому вигляді:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S + K + L}{2 \cdot L} \cdot \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot L \cdot S}{(K + L + S)^2}} \right] \quad (1.4)$$

У працях Чена та Хашимото [20] охарактеризована модифікована модель Контва [16], в якій концентрація клітин, яка залежить від рівня розкладання субстрату, включається через зв'язок між концентрацією субстрату та початковою концентрацією субстрату S_i . Як наслідок, неможливо спрогнозувати невдачі процесу через гальмування росту мікроорганізмів. Проте, процес збоїв через ефекти вимивання можна передбачити. Дана модель має такий вигляд [21]:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S / S_i}{K + \frac{(1 - K) \cdot S}{S_i}} \quad (1.5)$$

Модель Мітсдорфера [22] характеризує швидкість росту мікроорганізмів, що при виробництві біогазу G_s (в m^3/kg органічної сухої речовини) залежить від інших параметрів. Параметр n становить 1,5 та вказує на підвищену спорідненість субстрату, тому що, в порівнянні з чистими культурами, змішані бактеріальні культури потребують високого транспортування субстрату. Модель Мітсдорфера представлена наступним чином:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S^n}{S^n \cdot (1 + K_b \cdot G_s \cdot S^n)} \quad (1.6)$$

Варто зазначити, що всі наведені моделі процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, що описано в працях J. Monod, H. Moser, E.O. Powell, Y. Chen, A.G. Hashimoto, F. Bergter, R. Mitsdörffer, є детермінованими та не враховують зміну проходження процесу на будь-якій стадії, а також технологічні відхилення параметрів процесу через різну структуру сировини, неоднорідність середовища, кислотність середовища та температуру. Заразом процеси анаеробного бродіння є не детермінованими.

Одним із альтернативних підходів до моделювання процесів у БГУ, є використання різницевих рівнянь (РР), побудованих на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів. Такі математичні моделі описано у багатьох працях [23-29] та враховують стохастичність процесів анаеробного бродіння.

РР є дискретними аналогами диференціальних рівнянь. На основі даних спостережень, отриманих у процесі експерименту синтезують загальний вигляд РР [30-33]. Зазначений підхід детально описано в працях українського вченого О.Г. Івахненка [34-39]. Для зниження часових затрат на синтез математичних моделей та на їх спрощення через автоматизацію процесу синтезу застосовують індуктивні методи. А РР представляють в загальному випадку у такому вигляді [40]:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-p}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \vec{g}, \quad k = p, \dots, K, \quad (1.7)$$

де $\vec{f}(\bullet)$ – вектор невідомих базисних функцій, що задає структуру РР;

v_k – модельована характеристика для k -ї дискрети, $k = p, \dots, K$;

p – порядок РР;

$\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$ – 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 РР.

Проте існуючі математичні моделі через різну структуру біосировини та неоднорідність, кислотність середовища та температуру не враховують можливості зміни проходження процесу на будь-якій його стадії, а також певних технологічних відхилень змінних процесу. У результатах спостережень розкид технологічних параметрів процесу та похибки вимірювань призводять до необхідності застосування інтервального моделювання [41, 42].

Особливістю методів інтервального аналізу є характеристика процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою параметричною і структурною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

За умов представлення інтервальних результатів експерименту та на основі аналізу експериментальних даних, щоб забезпечити точність математичної моделі у межах похибок вимірювань значень модельованої характеристики, отриманих на основі експериментальних даних вектор оцінок параметрів \hat{g} та вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$ у виразі (1.7) отримуємо у такий спосіб:

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [v_k^-; v_k^+], \forall k = 0, \dots, K, \quad (1.8)$$

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 $v_k^+ = v_k + v_k \cdot \varepsilon$;

v_k – вимірне значення модельованої характеристики;

ε – відносна похибка вимірювання;

$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$ – інтервальні оцінки прогнозованої характеристики для k -ї дискети, $k=0, \dots, K$.

З урахуванням умов (1.8) та замінюючи у виразі (1.7) дискретні значення характеристики на інтервальні обчислюємо вектор оцінок \hat{g} невідомих параметрів різницевого рівняння. Тоді вираз для інтервального різницевого рівняння (IPR) набуває вигляду:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-p}^-; \hat{v}_{k-p}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}, k = p, \dots, K. \quad (1.9)$$

Варто зауважити, що виконання умов (1.8) уможливорює знаходження IPR (1.9) із гарантованими прогностичними властивостями.

Таким чином доцільно використовувати PR (1.7) для побудови математичних моделей на різних стадіях процесу анаеробного бродіння у БГУ. А для визначення його загального вигляду потрібно розв'язати задачі структурної ідентифікації [43].

Розглянемо детальніше особливості цих задач.

Для розв'язування задач структурної ідентифікації математичної моделі використовують методи індуктивного моделювання, що ґрунтуються на алгоритмах бджолиної колонії [44, 45].

Як відомо, отримані результати експериментальних даних за допомогою кількісного та якісного аналізу процесу анаеробного бродіння, відзначаються похибкою вимірювальних приладів. Тому в процесі ідентифікації моделі доцільно використовувати методи інтервального аналізу.

Для побудови PR (1.7) необхідно визначити його загальний вигляд, розв'язавши задачу структурної ідентифікації, тобто знайти структуру моделі. Далі слід провести процедуру налаштування її параметрів, розв'язавши задачу ідентифікації параметрів [46].

Розв'язавши задачу структурної ідентифікації, необхідно визначити загальний вигляд РР: $\vec{f}^T(\bullet)$ вектор базисних функцій; вектор параметрів різницевого оператора \vec{g} ; порядок різницевого рівняння.

Слід зауважити, що етап визначення компонентів вектору параметрів \vec{g} та задавання початкових умов для їх пошуку, тобто значень елементів із набору v_0, \dots, v_k для певних (початкових) дискрет, називають задачею ідентифікації параметрів [46].

Отже, на сьогоднішній день задача структурної ідентифікації різницевого рівняння є актуальною та при представленні даних експерименту в інтервальному вигляді ця задача значно ускладнюється. Таким чином задача структурної ідентифікації різницевого рівняння зводиться до багаторазового розв'язання задачі ідентифікації параметрів, що робить першу надзвичайно складною та вимагає для її розв'язання застосування як методів стохастичного пошуку, так і принципів теорії самоорганізації [47].

1.3 Постановка задачі кваліфікаційної роботи

Актуальність дослідження полягає у розробці алгоритмів структурної ідентифікації біохімічних процесів анаеробного бродіння, які б враховували можливості зміни процесу на будь-якій з його стадій, а також технологічних відхилень змінних процесу, через різну структуру біосировини та неоднорідність, кислотність середовища та температуру. В результатах спостережень розкид технологічних параметрів процесу та похибки вимірювань призводять до застосування інтервального моделювання з подальшим представленням характеристик процесу числовими інтервалами з застосуванням методу структурної ідентифікації математичних моделей цього процесу.

Метою роботи є розробка алгоритмів структурної ідентифікації процесів анаеробного мікробіологічного бродіння у біогазових установках із застосуванням інтервального моделювання.

Для досягнення цієї мети поставлено наступні завдання:

- 1) провести аналіз біохімічних процесів анаеробного бродіння у біогазових установках;
- 2) охарактеризувати особливості задач математичного моделювання в умовах структурної невизначеності;
- 3) проаналізувати методи структурної ідентифікації інтервальних математичних моделей;
- 4) оцінити якість структури інтервального різницевого рівняння;
- 5) удосконалити метод структурної ідентифікації різницевого рівняння на основі алгоритму бджолоїної колонії;
- 6) розробити алгоритм структурної ідентифікації анаеробного мікробіологічного бродіння на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл;
- 7) провести верифікацію розробленого алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння;
- 8) розробити програмну систему для ідентифікації інтервальних різницевих рівнянь процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

1.4 Висновки до розділу

Під час проведення аналізу існуючих моделей процесів анаеробного мікробіологічного бродіння, які ґрунтуються на біохімічних рівняннях, встановлено, що такі рівняння є детермінованими. Проте, такі моделі

використовувати недоцільно, так як у біогазових установках переважно процес бродіння відбувається з різною структурою сировини. В результаті аналізу процесів анаеробного мікробіологічного бродіння з'ясовано, що вони мають недетерміністичний характер. Тому для ефективного управління такими процесами потрібно будувати та застосовувати математичні моделі на різних стадіях процесу анаеробного мікробіологічного бродіння. А для моделювання процесів у біогазових установках доцільно використовувати математичні моделі у вигляді різницевого рівняння, що будуються на основі спостережень за вхідними змінними та характеристиками процесів.

Із урахуванням розкиду технологічних параметрів процесу та похибок вимірювань у результатах спостережень потрібно застосовувати методи інтервального аналізу. Особливістю цих методів є представлення характеристик процесу за результатами експерименту числовими інтервалами з подальшою структурною ідентифікацією математичних моделей цього процесу.

2 МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РІЗНИЦЕВОГО РІВНЯННЯ В ІНТЕРВАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

2.1 Обґрунтування вибору методу структурної ідентифікації різницевого рівняння

Задача структурної ідентифікації РР зводиться до багаторазового розв'язання задачі ідентифікації параметрів. Для пошуку структури РР необхідно проаналізувати методи структурної ідентифікації та визначити способи можливого зменшення обчислювальної складності методу.

У працях [48-50] досліджено та описано методи структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів. Слід відзначити серед найефективніших із них такі:

- 1) метод групового урахування аргументів (МГУА);
- 2) метод редукції структури математичної моделі;
- 3) методу структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів;
- 4) метод поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Метод групового урахування аргументів використовується в різних областях для прогнозування та моделювання систем, аналізу даних, оптимізації і розпізнавання об'єктів. Індуктивні алгоритми МГУА дають унікальну можливість автоматично знаходити взаємозалежності в даних, вибрати оптимальну структуру моделі чи мережі, і збільшити точність існуючих алгоритмів.

Такий підхід самоорганізації моделей відрізняється від звично використовуваних дедуктивних методів. Він заснований на індуктивних принципах – знаходження кращого рішення засноване на переборі різних варіантів.

Підхід індуктивного моделювання за допомогою перебору деяких рішень мінімізує роль передумов автора про результати моделювання.

Структуру моделі і закони, що діють в об'єкті, комп'ютер може сам знаходити. Також він може використовуватись при створенні штучного інтелекту і при прийнятті рішень [51].

Для вирішення різних завдань МГУА складається з декількох алгоритмів. У нього входять як параметричні, так і алгоритми кластеризації, комплексування аналогів, ребінаризації і імовірнісні алгоритми. Цей підхід самоорганізації заснований на переборі поступово ускладнюючих моделей і виборі найкращого рішення відповідно до мінімуму зовнішніх критеріїв. В якості базисних моделей використовуються не тільки поліноми, а й також нелінійні, імовірнісні функції або кластеризації.

Основними результатами теорії МГУА є те, що при неточних даних і коротких вибірках, мінімум критерію вказує нефізичну модель, точність якої вище і структура якої простіше структури повної фізичної моделі. За зовнішніми критеріями перебір множини моделей-претендентів необхідний тільки для нефізичних моделей.

Однак цей метод не забезпечує побудову моделей із гарантованими прогностичними властивостями, тому що він ґрунтується на критеріях мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними, тобто зовнішніх критеріях, що є не придатними у тому випадку, коли експериментальні дані представлені в інтервальному вигляді [52].

Одночасне застосування принципів МГУА та критерію верифікації інтервальної моделі, у випадку ідентифікації моделі з гарантованими прогностичними властивостями, може призвести до необхідності багаторазового розв'язування задачі ідентифікації параметрів. Тому побудований на основі такого підходу метод структурної ідентифікації характеризуватиметься високою обчислювальною складністю [53].

Метод редукції структури математичної моделі, суть якого полягає в заміні реальної цільової функції, що описує динаміку об'єкта, функцією передачі нижчого порядку, як правило другого [54]. При цьому спрощення

повинно проводитися таким чином, щоб сумарне значення енергій, моментів або деяких інших характеристик, які накопичуються протягом перехідного процесу, несуттєво змінювались [55].

У працях [54, 56] розкрито більш детально суть методу редукції структури математичної моделі об'єктів управління. Однак використовувати аналітичні підходи [56] не завжди добре через складність математичних перетворень, а застосування чисельних методів, які реалізуються за допомогою ЕОМ, передбачає наявність відповідного програмного забезпечення, яке реалізує той чи інший чисельний метод [54, 56].

Альтернативними методами вирішення завдання редукції математичної моделі об'єктів управління є ті, які не передбачають складних математичних розрахунків [54]. Найбільш простий спосіб полягає в розкладанні передавальної функції об'єкта на елементарні динамічні ланки і відкиданні тих множників, які не містять найбільшу постійну часу. Якщо функцію об'єкта розкласти на ланки не вдається, то знаходять коріння його характеристичного рівняння. Великим значенням коренів відповідають швидко затухаючі компоненти перехідного процесу, які мало впливають на поведінку системи.

Інший підхід полягає в заміні змінних часу одним сумарним запізненням і скорочення нулів і полюсів вихідної передавальної функції об'єкта [50]. Однак таким підходам притаманна низька точність через те, що редукція здійснюється лише маніпулюванням змінними часу і не передбачають вплив коефіцієнта перетворення.

Таким чином застосування методу редукції, призводить до збільшення обчислювальної складності та неможливості знаходження розв'язку задачі структурної ідентифікації [57]. Також, при вилученні структурних елементів не враховують їх взаємодію з іншими компонентами математичної моделі [57]. А це призведе до втрати значущих структурних елементів оптимальної математичної моделі [58].

Для розв'язання задачі структурної ідентифікації пропонується підхід, що ґрунтується на основі генетичного алгоритму [51]. Він являє собою евристичний алгоритм пошуку, що використовується для вирішення завдань оптимізації та моделювання шляхом випадкового пошуку, комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів, що нагадують біологічну еволюцію. Відмінною особливістю генетичного алгоритму є акцент на використання оператора «схрещування», який виробляє операцію рекомбінації рішень-претендентів, роль якої аналогічна ролі схрещування в живій природі.

Завдання структурної ідентифікації формується таким чином, що її розв'язання закодована у вигляді вектору фіксованої довжини, де кожен елемент відповідає зрушенню по r , r_j . Таким чином, завдання зводиться до вирішення задачі цілочислового програмування (Integer programming) яка відноситься до класу NP-складних задач [48].

Якщо випадковим чином створити множину генотипів початкової популяції, причому, навіть якщо вона виявиться абсолютно неконкурентоспроможною, то генетичний алгоритм все одно достатньо швидко переведе її в життєздатну популяцію.

Кожен генотип оцінюється з впровадженням «функції застосування», в нашому випадку цією функцією є критерій, в результаті чого з кожним генотипом асоціюється певне значення, яке визначає, наскільки добре описується структура та вирішує поставлене завдання.

З отриманої множини рішень («покоління») вибираються таке, до якого застосовуються «схрещування» і «мутація».

Завдання «схрещування» полягає в тому, щоб нащадок чи нащадки мали можливість успадкувати риси обох батьків, «змішавши» їх. Так як кодування генотипів у нас задається вектором, то для здійснення операції схрещування вибирається випадковий ген F в генотипі, даними ділянками обмінюються обоє батьків.

На етапі «мутації» кожен ген генома з ймовірністю p змінюється довільним чином.

Кінцевим результатом «схрещування» і «мутації» є отримання нових рішень. Для них також обчислюється деякі значення, і потім проводиться відбір («селекція») кращих рішень в наступне покоління.

На етапі відбору потрібно з усієї популяції вибрати певну її частину, яка залишиться «в живих» на цьому етапі еволюції. Ймовірність виживання людини залежить від значення функції.

Цей набір дій повторюється ітеративно, так моделюється «Еволюційний процес», який триває кілька поколінь, доки не буде виконаний критерій зупинки алгоритму, а саме протягом декількох поколінь значення функції для кожної особистості в популяції змінюється «незначно».

Таким чином, можна виділити наступні етапи генетичного алгоритму: задати цільову функцію для особин популяції, згенерувати випадковим чином початкову популяцію. потім циклічно проводить такі операції над популяцією: розмноження (схрещування), мутацію, обчислення значення критерію для даної структури, перевірку на стійкість і відповідність розмірності, формування нового покоління (селекція) на основі вибору кращих.. При виконанні умов зупинки закінчити виконання циклу, в іншому випадку повторити операції.

Основні недоліки методу структурної ідентифікації на основі генетичного алгоритму [51]:

1) випадкове формування початкової множини структур ІРР на першій ітерації проводять таким чином, щоб використати весь сформований набір структурних елементів F (генів), що призводить до суттєвого збільшення початкової кількості структур ІРР (особин популяції), адже вона прямопропорційно залежить від кількості структурних елементів (генів) у наборі F ;

2) у ході селекції множини «кращих» структур ІРР, тобто із найменшими значеннями цільової функції $\delta(\lambda_s)$, на кожній ітерації

відкидають 50% від усіх згенерованих структур, що в результаті може бути причиною відсутності прийнятної структури IPR після завершення процедури структурної ідентифікації внаслідок втрати важливих компонентів моделі;

3) нераціональний випадковий вибір структур IPR для схрещування, тобто схрещування відібраних структур IPR відбувається із застосуванням оператора «схрещування», який побудовано на принципі «розіграшу лотереї», де відбувається попарне «схрещування» структур, які відбирають із множини кращих структур IPR випадковим чином;

4) відсутній оператор мутації, який є класичним оператором генетичного алгоритму, що призводить до неефективності механізму уникнення локальних екстремумів складної багатоекстремальної цільової функції задачі структурної ідентифікації.

Також для розв'язування задач структурної ідентифікації, застосовують методи та алгоритми, які ґрунтуються на основі децентралізації та самоорганізації мультиагентних систем [52], у випадку коли цільова функція є дискретною. Вони ґрунтуються на принципах ройового інтелекту, до яких відносять алгоритми бджолиної колонії, мурашині, зозулі тощо.

Методи структурної ідентифікації на основі ройового інтелекту та генетичні алгоритми мають дещо спільне. Наприклад, ініціалізація початкової популяції здійснюється випадковим чином чи використання відомих значень цільової функції для оцінювання знайдених розв'язків [59]. Проте методи на основі ройового інтелекту, на відміну від генетичних алгоритмів, не використовують генетичних операторів, таких як «схрещення» чи «мутації» [60]. Натомість особини популяції мають пам'ять та локально взаємодіють, змінюючи швидкості [53]. Варто зазначити, що механізми взаємодії між особинами популяції у генетичних та ройових алгоритмах є абсолютно різними [61]. Зокрема в генетичних алгоритмах вся популяція рухається синхронно у напрямку екстремуму цільової функції, тому хромосоми обмінюються інформацією попарно, а у ройових алгоритмах – виявлення локальних екстремумів та відповідно швидше

знаходження глобального екстремуму цільової функції відбувається локально, що в свою чергу забезпечує взаємодію між особинами популяції [62]. Основною перевагою методів на основі ройового алгоритму є менша кількість параметрів алгоритму.

Унаслідок проведеного аналізу відомих ройових алгоритмів встановлено, що найбільш придатним у контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації ІРР є алгоритм бджолоїної колонії, оскільки він містить ефективний механізм для уникнення локальних екстремумів цільової функції, а також дозволяє легко встановити основні аналогії між особливостями харчової поведінки бджолоїної колонії та основними поняттями задачі структурної ідентифікації [63].

Також базуючись на аналізі методів ідентифікації параметрів РР процесів перейдемо безпосередньо до постановки задачі структурної ідентифікації ІРР із використанням алгоритму бджолоїної колонії.

Суть цього алгоритму, полягає в оптимізації деякої цільової функції, яка залежить від вибраного набору структурних елементів. Позначимо за λ_s поточну структуру РР:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \subset \Lambda, \quad (2.1)$$

де $\vec{f}^s = \{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$ – набір структурних елементів, що задає поточну s -ту структуру ІРР;

$m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ – кількість елементів у поточній структурі λ_s ;

F – множина усіх 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 ІРР оцінюватиметься на основі методів ідентифікації параметрів, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку;

Λ – множина усіх можливих структур ІРР.

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури λ_0 ІРР у вигляді (2.1), тому сформулюємо нову ІРР:

$$[v_k^-; v_k^+] = [f_1^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_1^0 + [f_2^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_2^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_{m_0}^0. \quad (2.2)$$

Наведена вище ІРР (2.2), повинна задовольняти умови (1.8), тобто забезпечувати належність інтервальних оцінок прогнозованого значення модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

У випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектору базисних функцій (поточної структури λ_s ІРР) і знаходженні інтервальних оцінок параметрів ІРР.

Якість поточної структури ІРР оцінюватимемо за значенням цільової функції $\delta(\lambda_s)$. Значення цільової функції $\delta(\lambda_s)$ обчислюватимемо за допомогою виразів, вигляд яких для фіксованої структури такий:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k))^T \cdot \hat{g}^s) - \text{mid}([v_k]) \right| \right\},$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K;$ (2.3)

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k))^T \cdot \hat{g}^s) - \text{wid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k))^T \cdot \hat{g}^s) \cap [v_k] \right| \right\},$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K;$ (2.4)

Вираз (2.3) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (2.4) у випадку $\delta(\lambda_s) = 0$ забезпечує виконання умови (2.2).

Тепер задачу структурної ідентифікації ІРР запишемо формально у вигляді задачі знаходження мінімуму цільової функції $\delta(\lambda_s)$:

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\bar{g}^s, \bar{f}^s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \bar{f}^s(\bullet) \in F. \quad (2.5)$$

Із виразів (2.3) та (2.4) бачимо, що для обчисленого значення цільової функції $\delta(\lambda_s)$ для фіксованої структури λ_s ІРР за будь-яких умов справедливою буде нерівність $\delta(\lambda_s) \geq 0$. Таким чином, можна стверджувати, що цільова функція $\delta(\lambda_s)$ має глобальний екстремум лише у тих точках, для яких виконується наступна рівність: $\delta(\lambda_s) = 0$. У просторі пошуку розв'язків задачі структурної ідентифікації ІРР функція $\delta(\lambda_s)$ має багато глобальних мінімумів [58].

Чим менше значення $\delta(\lambda_s)$, тим «краща» поточна структура ІРР. Якщо $\delta(\lambda_s) = 0$, то поточна структура ІРР дає можливість побудувати адекватну модель, для якої інтервальні оцінки прогнозованої характеристики належать до інтервалів можливих значень модельованої характеристики.

Реалізація методу структурної ідентифікації забезпечує мінімізацію цільової функції (2.5) у спосіб перетворення послідовності структур $\lambda_1, \dots, \lambda_s, \lambda_{s+1}, \dots, \lambda_0$ через застосування деяких операторів, які є аналогами відповідних процедур із алгоритму бджолоїної колонії [57].

Зазначений метод структурної ідентифікації із використанням алгоритму бджолоїної колонії відзначаються високою обчислювальною складністю через емпіричний вибір операторів перетворення послідовності структур. Зокрема, це стосується оператора синтезу множини поточних структур, який перетворює структуру РР у вигляді (2.2) за допомогою лінійного показника «інтенсивності пошуку джерела нектару» [64].

Іншим недоліком цього методу є множинність структур для моделі, тому для забезпечення єдиного розв'язку необхідно поєднати метод структурної ідентифікації ІРР на основі використання алгоритму бджолоїної колонії у спосіб уведення ідентифікації параметрів РР процесів з інтервальним представленням їх параметрів.

Для задач моделювання біохімічних процесів анаеробного бродіння зазначені методи структурної ідентифікації вимагають зниження обчислювальної складності та зорієнтовані на знаходження лише однієї моделі, тобто без урахування множинності оцінок параметрів за рахунок невизначеності. Похибки у результатах спостережень та розкид технологічних параметрів біохімічного процесу призводять до множини таких моделей. Тому для їх отримання необхідно використовувати інтервальні оцінки значень параметрів для моделей. Такий підхід відзначається простотою обчислень і особливо є актуальним при розробці ІРР.

2.2 Математична задача оцінювання якості структури різницевого рівняння на основі інтервальних моделей

За результатами детального аналізу відомого методу структурної ідентифікації, який розроблено із застосуванням алгоритмів бджолоїної колонії, метод уперше опубліковано у праці [63]. У різних предметних областях багаторазове використання цього методу для побудови ІРР процесів призвело до ряду недоліків. Зокрема, неоднозначність розв'язку, тобто отриманої структури моделі, для різних початково заданих умов. З іншого боку, ряд операторів, які використано для перетворення поточних структур, які претендують на кінцеву оптимальну структуру, обрано евристично, без теоретичного чи експериментального обґрунтування. Це стосується оператора, який визначає кількість «структур-нащадків», які мають бути згенеровані для аналізованої «структури-предка». У контексті алгоритму бджолоїної колонії цей оператор визначає кількість бджіл-дослідників, які обрали досліджуване поточне джерело-нектару. У відомому методі структурної ідентифікації результат виконання цього оператора ґрунтується

на припущені, що кількість бджіл-дослідників, які переміщуються в окіл джерела нектару (на основі повідомлення робочої бджоли) лінійно залежить від його якості. При цьому випадки можливих інших залежностей не досліджувалися. Очевидно, що таке припущення не достатньо обґрунтоване. Також очевидно, що збільшення кількості згенерованих структур «навколо» поточної призведе до зростання часової складності реалізації методу. Але водночас таке збільшення призведе до концентрації досліджень структур кращої якості і сумарний ефект щодо зростання обчислювальної складності може бути зворотнім. Тобто в підсумку обчислювальна складність може зменшитись. Це важливо для випадку ускладнення процедури ідентифікації параметрів у вигляді інтервальних оцінок параметрів IPP, яку багаторазово необхідно використовувати у процесі структурної ідентифікації.

Суть відомого методу структурної ідентифікації полягає в оптимізації деякої цільової функції, яка залежить від обраного набору структурних елементів. Особливості цього методу проаналізовано у попередньому підрозділі. Зокрема, метод зорієнтовано на пошук структури для PP у вигляді (2.1). При цьому на кожному кроці для перевірки якості поточної структури обчислюється значення цільової функції на основі багаторазового використання методу ідентифікації параметрів IPP у вигляді точкових оцінок параметрів.

У випадку використання інтервальних оцінок параметрів – як результату ідентифікації параметрів, задача ускладнюється, оскільки в цьому випадку замість моделі (2.1) з фіксованою структурою, що аналізується необхідно брати до уваги модель з інтервальними оцінками параметрів:

$$[v_k^-; v_k^+] = [f_1^0(\bullet)] \cdot [\hat{g}_1^0] + [f_2^0(\bullet)] \cdot [\hat{g}_2^0] + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot [\hat{g}_{m_0}^0]. \quad (2.6)$$

Наведена вище IPP (2.6), повинна задовольняти умови (1.8), тобто забезпечувати належність інтервальних оцінок прогнозованого значення

модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

Як зазначалося вище, ідентифікація параметрів є етапом структурної ідентифікації. У випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектору базисних функцій (поточної структури λ_s IPP) і знаходженні інтервальних оцінок параметрів IPP.

Таким чином, знаходження таких оцінок дозволить знайти єдину модель, яка буде забезпечувати «якісне» відображення динаміки процесу при певному розкиді початкових умов. Зокрема, для задачі моделювання процесів анаеробного бродіння, це параметри: температура та кислотність середовища. З практичної точки зору, це є найкращий варіант пошуку структури, так як в іншому випадку при точкових значеннях параметрів моделі, будемо отримувати багато розв'язків, тобто набір структур. За результатами такого моделювання для налаштування БГУ виникають певні труднощі.

З урахуванням наведених вище міркувань, якість поточної структури IPP оцінюватимемо за значенням цільової функції $\delta(\lambda_s)$, значення якої для поточної структур обчислюватимемо за допомогою виразів:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]) - \text{mid}([v_k]) \right| \right\},$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \exists k = 1, \dots, K;$ (2.7)

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=1, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]) - \text{wid}((\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]) \cap [v_k] \right| \right\},$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [v_k] = \emptyset, \forall k = 1, \dots, K,$ (2.8)

де $\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}])^T$, \hat{g}^s – вектор базисних функцій різницевого рівняння та вектор параметрів для поточної структури, відповідно.

Вираз (2.7) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (2.8) у випадку $\delta(\lambda_s)=0$ забезпечує отримання адекватної моделі.

Задача структурної ідентифікації ІРР полягає у мінімізації цільової функції $\delta(\lambda_s)$:

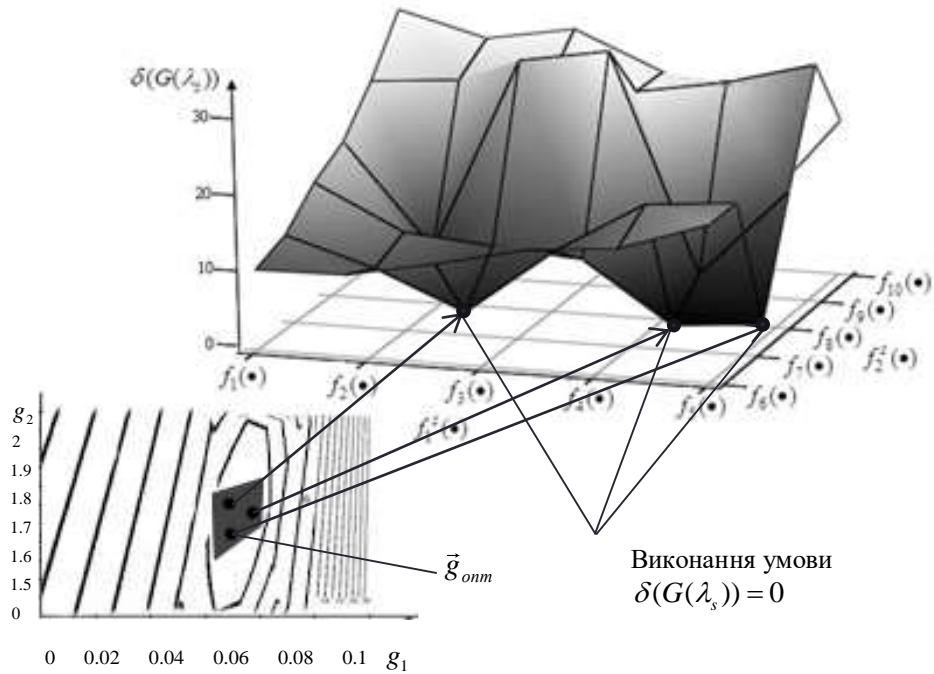
$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \vec{f}^s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \vec{f}^s(\bullet) \in F, \hat{g}^s \in [\hat{g}^s], \quad (2.9)$$

де $[\hat{g}^s]$ – інтервальний вектор параметрів, який отримуємо із розв’язку задачі ідентифікації параметрів на основі методу представленого у другому розділі.

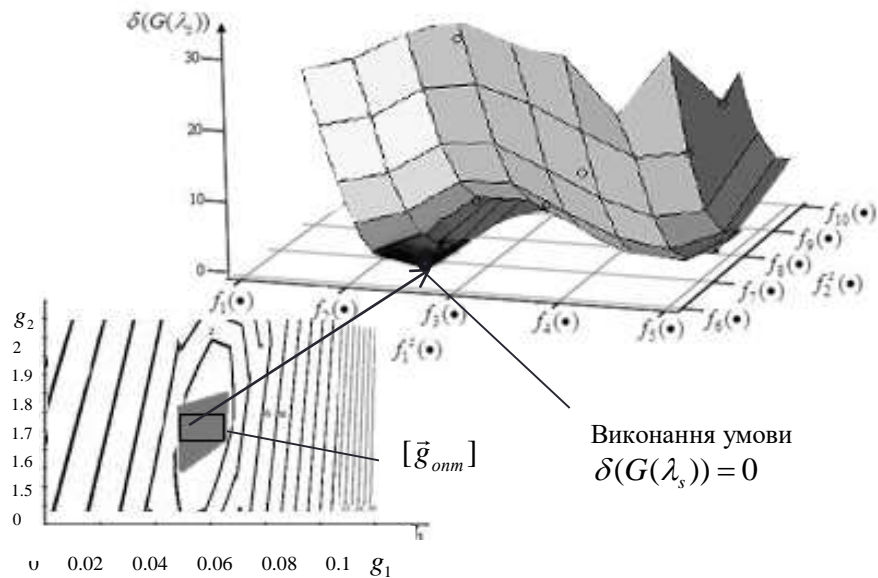
Властивості цільової функції (2.7) та (2.8) такі, що для будь-якого її значення для поточної структури λ_s ІРР вона приймає невід’ємне значення, а отже, її мінімум досягається за умови $\delta(\lambda_s)=0$. Опираючись на теорію множинності моделей, у просторі пошуку розв’язків задачі структурної ідентифікації ІРР, функція $\delta(\lambda_s)$ має багато мінімумів, кожен з яких відповідає одній структурі моделі. Уведення процедури ідентифікації параметрів у вигляді інтервальних оцінок параметрів повинно забезпечити наявність одного глобального мінімуму цієї функції. На рисунку 2.1, а, проілюстрована графічна інтерпретація випадку використання точкових оцінок параметрів, а рисунок 2.1, б, ілюструє випадок отримання інтервальних оцінок для поточної структури.

Кожен із рисунків 2.1, а, та 2.1, б, складається з двох частин. Верхня частина ілюструє цільову функцію в задачі структурної ідентифікації та відображає простір структурних елементів. Нижня частина рисунків ілюструє лінії рівного рівня цільової функції для задачі ідентифікації параметрів в просторі значень параметрів моделі (для випадку $m=2$). На нижній частині обох рисунків сірим кольором зображено область розв’язків задачі ідентифікації параметрів, а також на рисунку 2.1, а, наведено точкові оцінки

параметрів \bar{g}_{omn} , а на рисунку 2.1, б, – інтервальні оцінки параметрів $[\bar{g}_{omn}]$ розв’язку задачі ідентифікації параметрів.



а)



б)

Рисунок 2.1 – Графічна ілюстрація відмінності у випадку використання точкових та інтервальних оцінок параметрів у методі структурної ідентифікації

Як бачимо, з рисунку 2.1, а, кожен точковий розв'язок задачі ідентифікації параметрів \vec{g}_{omn} забезпечує знаходження певної структури ІРР, для якої виконується умова $\delta(G(\lambda_s)) = 0$.

Таким чином, у випадку використання точкових оцінок параметрів ІРР отримуємо множину структур ІРР, для яких виконується умова $\delta(G(\lambda_s)) = 0$. Множинність структур є основним недоліком існуючого методу структурної ідентифікації.

Урахування інтервальних оцінок параметрів $[\vec{g}_{omn}]$ в задачі ідентифікації параметрів на основі нового, запропонованого у другому розділі, методу дає можливість отримати одну структуру ІРР, для якої виконується умова $\delta(G(\lambda_s)) = 0$. Такий випадок проілюстровано на рисунку 2.1, б.

Отже, поєднання компонентів поведінкової моделі, методу аналізу інтервальних даних та методу ідентифікації параметрів ІРР у вигляді інтервальних оцінок параметрів створює можливості сформулювати теоретичні основи побудови процедур пошуку глобального мінімуму цільової функції $\delta(\lambda_s)$ в задачі структурної ідентифікації ІРР.

Як вже зазначалося, задачу структурної ідентифікації ІРР розв'язують за допомогою певної послідовності перетворень структур λ_s із аналізом значень цільової функції. При побудові процедур, які покладено в основу методу структурної ідентифікації, необхідно здійснити таку послідовність перетворень, яка б забезпечувала на кожній ітерації зменшення значень цільової функції $\delta(\lambda_s)$.

Застосування аналізу інтервальних даних передбачає розв'язування ІСНАР для оцінювання якості кожної згенерованої структури ІРР.

Введемо математичний оператор $G(\lambda_s)$, який здійснює генерування математичної моделі на основі перетворення її структури $\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot [g_1^s]; f_2^s(\bullet) \cdot [g_2^s]; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot [g_{m_s}^s]\}$ в адитивну згортку, тобто:

$$G(\lambda_s) = \{f_1^s(\bullet) \cdot [\hat{g}_1^s]; f_2^s(\bullet) \cdot [\hat{g}_2^s]; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot [\hat{g}_{m_s}^s]\}. \quad (2.10)$$

На відміну від відомого оператора, запропонований оператор оперує з інтервальними оцінками параметрів, що дає можливість отримати ІРР у вигляді (2.6).

Із урахуванням виразу (2.10) оптимізаційну задачу структурної ідентифікації перепишемо у такому вигляді:

$$\delta(G(\lambda_s)) \xrightarrow{\lambda_s} \min, \quad (2.11)$$

$$m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \in \Lambda_{m_{сн}} \quad \hat{g}^s \in [\hat{g}^s],$$

де $m_{сн}$ – номер ітерації реалізації методу структурної ідентифікації.

Далі застосувавши схему математичного формулювання для задачі ідентифікації параметрів отримуємо ІСНАР:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [v_0^-; v_0^+], \dots, [\hat{v}_{p-1}^-; \hat{v}_{p-1}^+] \subseteq [v_{p-1}^-; v_{p-1}^+]; \\ [\hat{v}_k] = (\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s]; \\ v_k^- \leq (\vec{f}^s([\hat{v}_{k-p}], \dots, [\hat{v}_{k-1}]))^T \cdot [\hat{g}^s] \leq v_k^+, k = p, \dots, K. \end{cases} \quad (2.12)$$

Поточна структура ІРР λ_s із відомим інтервальним вектором параметрів $[\hat{g}^s]$ є одним із потенційних розв'язків задачі структурної ідентифікації. Якість поточної структури оцінюємо на основі виразу (2.7), чи (2.8), застосовуючи попередньо процедуру ідентифікації параметрів. Процедуру відбору структур – претендентів для побудови ІРР характеристик процесу анаеробного мікробіологічного бродіння побудуємо на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл.

У роботі запропоновано удосконалити метод структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії для побудови процедур реалізації ітераційної схеми розв'язування оптимізаційної задачі (2.11), яка на кожній ітерації забезпечує умову $\delta(\lambda_s) > \delta(\lambda_{s+1})$, а також має меншу обчислювальну складність реалізації.

2.3 Метод структурної ідентифікації різницевого рівняння на основі алгоритму бджолоїної колонії

Розглянемо детальніше метод структурної ідентифікації ІРР на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл.

Опираючись на відому схему реалізації методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії [59], зробимо певні висновки для процесів та операторів послідовного перетворення поточних структур ІРР. Результати цього узагальнення наведено на рисунку 2.2.

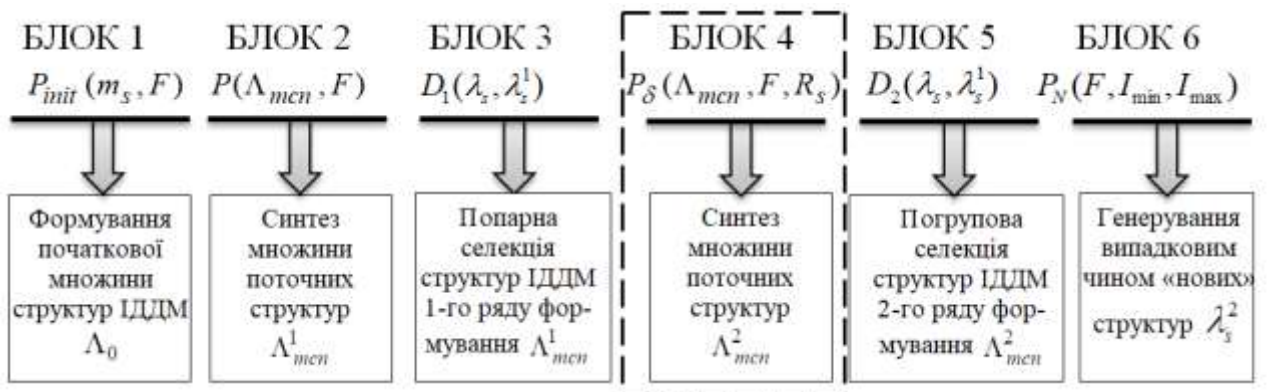


Рисунок 2.2 – Схема послідовності перетворень методу структурної ідентифікації

Зокрема, на цьому рисунку проілюстровано схему послідовності певних перетворень методу структурної ідентифікації, що розкриває суть цього

методу, та результати цих перетворень у вигляді отриманих проміжних структур ІРР.

Отже, суть методу структурної ідентифікації ІРР полягає у виконанні такої послідовності перетворень.

Блок 1: формування початкової множини структур Λ_{mcs} (для якої виконується умова $mcs=0$) за допомогою оператора $P_{init}(m_s, F)$, що є процедурою випадкового вибору структурних елементів із множини F у кількості m_s та оцінювання їх «якості» за допомогою цільової функції $\delta(\lambda_s)$.

Блок 2: синтез множини поточних структур із використанням оператора $P(\Lambda_{mcs}, F)$, який здійснює перетворення структури різницевого рівняння у вигляді (2.1). В контексті алгоритму бджолоїної колонії, цей оператор означає дослідження околу робочими бджолами відомого джерела нектару.

Блок 3: проведення попарної селекції множини структур ІРР першого ряду формування Λ_{mcs}^1 із використанням оператора $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$, який реалізує процес синтезу «кращої» із структур ІРР за значеннями цільової функції. В контексті алгоритму бджолоїної колонії цей оператор означає запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл.

Блок 4: синтез множини поточних структур із використанням оператора $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F, R_s)$, який перетворює структуру різницевого рівняння у вигляді (2.1), що у контексті алгоритму бджолоїної колонії означає дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками.

Блок 5: проведення по-групової селекції множини структур ІРР другого ряду формування Λ_{mcs}^2 із використанням оператора $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$, який реалізує процес синтезу множини «кращих» структур ІРР за значеннями цільової функції, що у контексті алгоритму бджолоїної колонії означає запам'ятовування координат та якості джерела нектару для бджіл-дослідників.

Блок 6: генерування «нових» структур ІРР λ_s із використанням оператора $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, який випадковим чином генерує «нову» структуру

IPР з множини всіх структурних елементів при умові, що усі структури для яких $Limit_s \geq LIMIT$ вважаються «вичерпними». У контексті алгоритму бджолої колонії означає пошук нового джерела нектару.

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

Реалізація методу структурної ідентифікації забезпечує мінімізацію цільової функції (2.11) у спосіб перетворення послідовності структур $\lambda_1, \dots, \lambda_s, \lambda_{s+1}, \dots, \lambda_0$ через застосування представлених операторів $P(\Lambda_{mcn}, F)$, $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$, $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$, $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$, які є аналогами відповідних процедур із алгоритму бджолої колонії [57].

Результати аналізу операторів цілеспрямованого перетворення «структур-предків» показали, що «корисні» їх властивості визначаються в операторі $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ значенням показника R_s . Зазначений оператор виділений пунктиром в блоці 4 на рисунку 2.2. Цей оператор призначений для визначення числа «структур-нащадків», які потрібно згенерувати із подібним властивостями (подібними структурними елементами) як у «структури-предка».

Згідно з методом структурної ідентифікації, цей оператор побудовано по аналогії з компонентами алгоритму колонії медоносних бджіл у якій припускають, що кількість бджіл-дослідників, які концентруються в околі джерела нектару (на основі повідомлення робочої бджоли) лінійно залежить від його якості. Що є цілком природнім. При цьому випадки побудови цього оператора на припущеннях про інші залежності між цими категоріями, на практиці не досліджувалися.

Варто зазначити, що природа поведінки колонії медоносних бджіл є достатньо складною. Зокрема, недостатньо дослідженим є біологічні механізми бджіл-дослідників. У цілому невідомо чим ці бджоли керуються,

приймаючи рішення летіти за тою чи іншою робочою бджолою. Однак у алгоритмах, які описано Карабогою Ю.Г. [63], абсолютно справедливо вважається, що кількість «завербованих» бджіл-дослідників завжди залежить від якості джерела нектару. У відомому методі структурної ідентифікації прийнято, що ця залежність є лінійною. Аналіз цього припущення показує, що на перший погляд воно є природнім, оскільки збільшення кількості згенерованих структур «навколо» поточної через використання нелінійного оператора, який збільшує кількість згенерованих «структур-нащадків» призведе до зростання часової складності реалізації методу. Але водночас таке збільшення може забезпечити концентрацію досліджень структур кращої якості та внаслідок підвищити ефективність алгоритму. Також у підсумку це може призвести до зниження обчислювальної складності навіть у випадку ускладнення процедури ідентифікації параметрів, унаслідок обчислення інтервальних оцінок параметрів IPP, яка є складовою методу структурної ідентифікації.

Отже, у відомому методі структурної ідентифікації значення показника R_s , який визначає кількість структур, які будуть згенеровані на основі s -ї структури із множини Λ_{mcn}^1 , для кожної структури обчислюють за такою формулою:

$$R_s = \text{ToInt} \left(\frac{S \cdot \left(2 \cdot \max \{ \delta(\lambda_s^1) \mid s=1 \dots S \} - \delta(\lambda_s^1) - \delta(\lambda_{s-1}^1) \right)}{\sum_{s=1}^S \left(\max \{ \delta(\lambda_s^1) \mid s=1 \dots S \} - \delta(\lambda_s^1) \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S, \quad (2.13)$$

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

Опираючись на вище зазначене, досліджено застосування двох випадків нелінійності функції якості джерела нектару – квадратичної та

кубічної залежності кількості згенерованих на основі поточної структури ІРР «структур-нащадків» від значення цільової функції $\delta(\lambda_s)$, відповідно:

$$R_s = ToInt \left(\frac{S \cdot \left(2 \cdot \max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 \mid s = 1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 - \left(\delta(\lambda_{s-1}^1) \right)^2 \right)}{\sum_{s=1}^S \left(\max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 \mid s = 1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^2 \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S, (2.14)$$

$$R_s = ToInt \left(\frac{S \cdot \left(2 \cdot \max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 \mid s = 1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 - \left(\delta(\lambda_{s-1}^1) \right)^3 \right)}{\sum_{s=1}^S \left(\max \left\{ \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 \mid s = 1 \dots S \right\} - \left(\delta(\lambda_s^1) \right)^3 \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S. (2.15)$$

У таблиці 2.1 наведено результати комп'ютерних експериментів, які обґрунтовують застосування квадратичної залежності (2.14) для побудови цього показника.

Таблиця 2.1 – Часова складність реалізації комп'ютерних експериментів для значення показника «інтенсивності пошуку джерела нектару»

Номер обчислювального експерименту	Кількість параметрів моделі	Кількість вимірювань	Кількість ітерацій при використанні		
			квадратичної залежності для показника R_s	лінійної залежності для показника R_s	кубічної залежності для показника R_s
1	2	3	2 245	2 356	2 641
2	3	5	58 067	62 131	69 392
3	4	10	947 511	1 042 262	1 775 384
4	10	50	10 003 873	12 004 647	13 539 142
5	12	70	29 978 542	40 471 031	50 345 657
6	15	100	43 823 119	85 734 678	114 624 871

Як бачимо з таблиці 2.1 в обчислювальних експериментах 1-3 для простіших моделей, які містять не більше чотирьох параметрів, у випадку застосування квадратичної залежності (2.14), зниження обчислювальної складності показника R_s становить від 5% до 10% у порівнянні з лінійною залежністю (2.13). Очевидно, що при ускладненні моделі із збільшенням кількості спостережень ефективність використання квадратичної залежності показника R_s підвищується. Для задачі структурної ідентифікації в обчислювальному експерименті 4, що містить 10 параметрів, обчислювальна складність із використанням квадратичної залежності показника R_s , у порівнянні з лінійною знижується на 20 %. А для випадку ІРР з 15 параметрів для 100 інтервальних вимірювань обчислювальна складність знижується на $(1 - \frac{43023119}{84934618}) \cdot 100\% = 49,3\%$.

У третьому розділі кваліфікаційної роботи представимо один із прикладів дослідження двох наведених вище випадків застосування нелінійних операторів для квадратичної та кубічної залежності кількості згенерованих структур ІРР на основі поточної, який також підтверджує загальну тенденцію при виборі квадратичної залежності (2.14) для побудови зазначеного оператора.

У розглянутому методі структурної ідентифікації математичних моделей послідовність перетворень структур ІРР, що використовується, прискорює виявлення ділянок з локальними мінімумами цільової функції та у випадку використання інтервальних оцінок параметрів моделей забезпечує знаходження єдиної структури на тестових прикладах.

2.4 Висновки до розділу

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз методів структурної ідентифікації різницевого рівняння. Показано, що вони зорієнтовані на використання експериментальних даних без урахування різної структури зброджуваної сировини та розкиду технологічних параметрів процесу, а також характеризуються високою обчислювальною складністю. Обґрунтовано використовувати метод структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл. Встановлено ряд недоліків цього методу, а саме: множинність структур для моделі; характеризується високою обчислювальною складністю.

Також у цьому розділі розглянуто задачу оцінювання якості структури різницевого рівняння та проведено обґрунтування методу його розв'язування. Поєднання компонентів моделі поведінки колонії медоносних бджіл та методу аналізу інтервальних даних створює можливість сформулювати теоретичні основи побудови процедур пошуку глобального мінімуму цільової функції в задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння.

3 АЛГОРИТМИ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО РІВНЯННЯ В ЗАДАЧІ АНАЕРОБНОГО МІКРОБІОЛОГІЧНОГО БРОДІННЯ

3.1 Розробка алгоритмів структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл

У працях [64, 65], запропоновано обчислювати значення показник R_s на основі такого припущення, що залежність кількості бджіл-дослідників, що летить в окіл джерела нектару, прямопропорційна залежності його якості.

Біологічні механізми бджіл-дослідників вивчені недостатньо, оскільки невідомо, чим вони керуються, коли вирішують летіти за певною робочою бджолою. З математичної точки зору вважається, що кількість «завербованих» бджіл-дослідників завжди є функцією якості джерела нектару.

Таким чином, цільова функція задачі структурної ідентифікації є досить складною, дискретною, і має неперервні підобласті параметрів та велику кількість локальних мінімумів. Тому доцільно дослідити інші способи реалізації обчислювальної процедури для визначення значення показника R_s [66].

Використання у розглянутому методі структурної ідентифікації математичних моделей послідовності перетворень структур ІРР, дозволяє швидко ідентифікувати ділянки з локальними мінімумами цільової функції та шукати серед них області з глобальними екстремумами.

Метод структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл, забезпечує розширення покриття простору пошуку розв'язування задачі без збільшення обчислювальної складності методу

структурної ідентифікації інтервальних моделей. Це розширення покриття забезпечується його неоднорідністю [67].

Використовуючи аналогії з фазою активності бджіл-дослідників із моделі поведінки колонії медоносних бджіл, реалізується різномірне покриття простору для розв'язку задачі структурної ідентифікації. Тобто, ділянки простору пошуку розв'язків будуть досліджуватися більш інтенсивно, ніж ті, які характеризуються меншими значеннями цільової функції. Для цього виконується процедура генерації «нових» структур ІРР за допомогою оператора $P_\delta(\lambda_{mcn}, F, R_s)$, заснованого лише на одній «структурі-предка». У той же час кількість «структур-нащадків», створених на основі поточної структури ІРР, прямопропорційна значенню цільової функції $\delta(\lambda_s)$, яка обчислюється для «структури-предка» і визначається значенням показника R_s . Тобто, чим гірша «структура-предок», тим менше генеруємо для неї «структури-нащадки», а в іншому випадку навпаки [67].

Відомо, що методи структурної ідентифікації, засновані на генетичних алгоритмах, охоплюють область розв'язків задачі рівномірно, а існуючий метод, заснований на алгоритмі бджолиної колонії, – нерівномірно. Це розширює покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації та формує ефективний механізм виявлення локальних мінімумів цільової функції.

Збільшення степеня нелінійності виразу (3.13) забезпечить більш інтенсивне вивчення ділянок простору пошуку розв'язків, що характеризуються меншими значеннями цільової функції. Звичайно, з одного боку, застосування такого підходу забезпечує можливість швидкого пошуку глобального екстремуму цільової функції, а з іншого – існує ризик «обходу» перспективних ділянок цільової функції ІРР, яка багатоекстремальна [68].

На рисунку 3.1 схематично зображено запропоновані залежності.

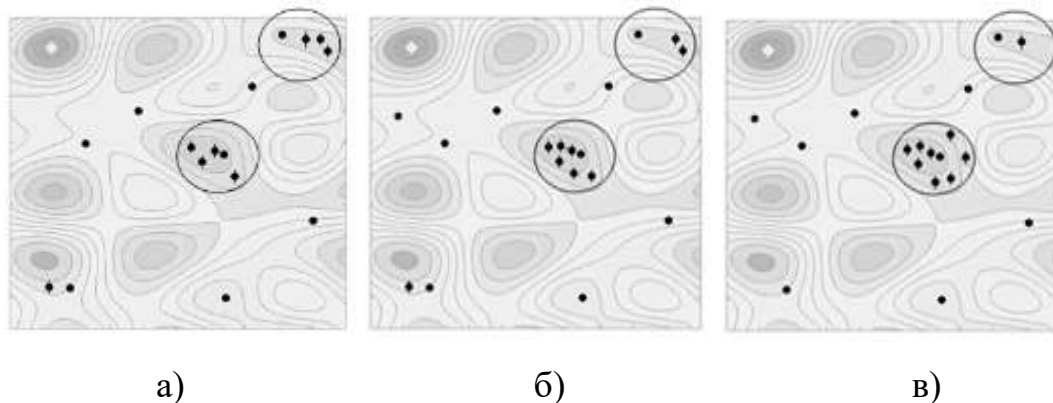


Рисунок 3.1 – Схематичне зображення покриття простору розв’язків задачі структурної ідентифікації із застосуванням залежностей:
а) лінійної; б) квадратичної; в) кубічної

На рисунку 3.1 за допомогою кольорових градацій зображена зміна значень цільової функції, де \blacksquare позначає найменші значення, а \square – найбільші. Елемент \blacklozenge позначає глобальний мінімум цільової функції $\delta(\lambda_s)$; елемент \bullet – поточна множина потенційних розв’язків задачі, що в задачі структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді ІРР означає поточну структуру λ_s ; \blacklozenge – множина згенерованих на основі початкової популяції «нових» потенційних розв’язків.

На основі удосконаленого методу структурної ідентифікації реалізована обчислювальна блок-схему алгоритму його реалізації (рисунок 3.1).

Блок-схема алгоритму розкриває суть взаємодії та послідовність виконання компонентів моделі поведінки колонії медоносних бджіл у контексті розв’язування задачі структурної ідентифікації із використанням квадратичної залежності показника R_s . Розглянемо кожен блок, що представлений на даній схемі.

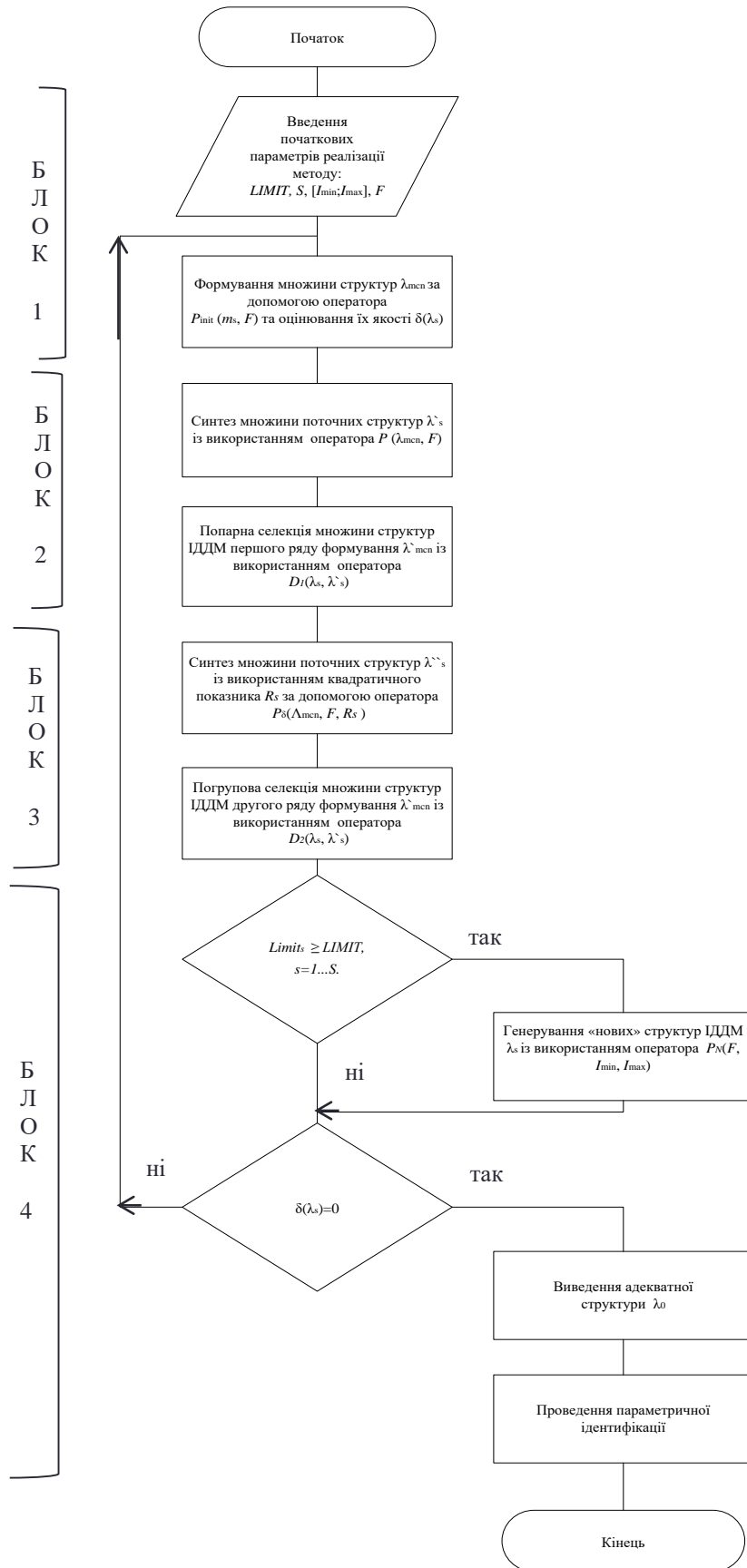


Рисунок 3.2 – Узагальнена блок-схема алгоритму реалізації удосконаленого методу структурної ідентифікації ІРР на основі алгоритму бджолоїної колонії

«Блок 1» ініціалізує початкові параметри алгоритму. Для початку встановлюємо значення деяких змінних. $LIMIT$ – максимальна можлива кількість ітерацій «незмінності» структури, тобто якщо поточна структура ІРР не оновлювалася вже $LIMIT$ разів, то вона вважається «вичерпаною»; S – початкова кількість структур ІРР; $[I_{\min}; I_{\max}]$ – інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне I_{\min} та максимальне I_{\max} значення потенційної кількості структурних елементів у структурі ІРР λ_s та набір структурних елементів F .

Потім формуємо початковий набір структур ІРР Λ_0 (потужності S). Слід зауважити, що початковий набір структур ІРР Λ_0 формуємо випадковим чином із множини структурних елементів F із використанням оператора $P_{init}(m_s, F)$.

«Блок 2» синтезує набір поточних структур ІРР $\Lambda_{m_{cn}}^1$, реалізований шляхом перетворення набору структур $\Lambda_{m_{cn}}$ (m_{cn} – номер поточної ітерації) у набір структур ІРР $\Lambda_{m_{cn}}^1$. Таке перетворення здійснюється оператором $P(\Lambda_{m_{cn}}, F)$. Далі виконується попарна селекція структур ІРР оператором $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$ з отриманням набору найкращих структур $\Lambda_{m_{cn}}^1$.

«Блок 3» перетворює кожен структуру $\lambda_{m_{cn}}^1$ із набору структур $\Lambda_{m_{cn}}^1$ у набір структур ІРР Λ_s^1 (де $s=1\dots S$), шляхом заміни випадковим чином елементів кожної структури λ_s^1 елементами із множини F . Тому позначимо за $\Lambda_{m_{cn}}^2$ таке об'єднання множин $\Lambda_{m_{cn}}^2 = \{\lambda_1^1 \cup \lambda_2^1 \dots \cup \dots \lambda_s^1 \dots \cup \lambda_S^1\}$, $s=1\dots S$. Таким чином, за допомогою оператора $P_s(\Lambda_{m_{cn}}, F, R_s)$ отримуємо набір структур $\Lambda_{m_{cn}}^2$. Далі із використанням оператора $D_2(\lambda_s, \lambda_s^1)$ проводиться по-групова селекція поточних структур ІРР із отриманням набору «найкращих» структур $\Lambda_{m_{cn}}^2$ із поточного набору $\Lambda_{m_{cn}}^1$.

«Блок 4» перевіряє «вичерпність» поточних структур ІРР. Якщо виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$, то усі структури $\lambda_s^2 \in \lambda_{mcs}^2$ вважаються «вичерпаними». Якщо структура є «вичерпаною», то замінюємо її «новою», яку генеруємо за допомогою оператора $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$.

Якщо знайдено хоча б одну структуру, для якої $\delta(\lambda_s^2) = 0$, то процедура структурної ідентифікації завершується, в іншому випадку повертаємося у «Блок 2» [22].

Як було зазначено в попередньому розділі, на інтенсивність пошуку джерела нектару впливає значення показника R_s в операторі $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F, R_s)$, який призначений для визначення кількості «структур-нащадків», які генеруються із подібними властивостями (подібними структурними елементами) як у «структури-предка». Зміна способу реалізації цього показника може зменшити обчислювальну складність його застосування.

Тому розглянемо детальніше «Блок 3» із рисунку 3.2. За аналогією до моделі поведінки колонії медоносних бджіл цей блок реалізує фазу активності бджіл-дослідників. Тобто після «бджолиного танцю» в окіл кращих джерел їжі летять бджоли-дослідники із вулика, тим більше бджіл, чим якісніше джерело їжі [68].

У «Блоці 3» оператор $P_\delta(\lambda_{mcs}, F, R_s)$ генерує набір поточних структур ІРР Λ_{mcs}^2 з врахуванням їх «якості»:

$$\Lambda_{mcs}^2 = P_\delta(\Lambda_{mcs}^1, F, R_s), \quad (3.15)$$

Із математичної точки зору, оператор $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F, R_s)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 з набору структур Λ_{mcs}^1 першого ряду утворення, сформованих на ітерації алгоритму mcs , у наборі структур ІРР Λ_s^1 (де $s = 1 \dots S$) шляхом заміни випадковим чином m_s елементів кожної

структури λ_s^1 елементами із набору структурних елементів F . Проте оператор $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ здійснює заміну лише для тих структур $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1$, для яких $R_s > 0$.

3.2 Порівняльний аналіз ефективності алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння

Застосування методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії у вигляді різницевого рівняння для синтезу математичних моделей має ряд переваг у порівнянні з їх вибором на фізичні міркування.

Важливим питанням є верифікація розробленого алгоритму структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл. У таблиці 2.1, наведено ефективність запропонованих удосконалень з точки зору зменшення часової складності реалізації методу структурної ідентифікації.

Розглянемо приклад структурної ідентифікації математичної моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, для якого використано різні способи задання нелінійності оператора для визначення кількості «структур-нащадків», які згенеровано навколо поточної «структури-предка», яку характеризує значення цільова функції.

Дослідження ефективності застосування запропонованих виразів (2.13), (2.14) та відомого (2.15) для цього оператора, проводилися на прикладі побудови моделі процесу формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах, описаних вище, щоб побудувати цю модель.

Для заданих факторів впливу результати вимірювань концентрації метану взято з праці [69].

За допомогою методу структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл для синтезу структури ІРР було згенеровано набір структурних елементів F з потужністю $L=9$. Унаслідок чого отримано таблицю 3.1 – упорядкований набір структурних елементів.

Таблиця 3.1 – Множина структурних елементів F моделей процесу формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу

№пп	Структурний елемент	№пп	Структурний елемент
1	2	3	4
1	v_{k-1}	167	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-5}$
2	v_{k-2}	...	...
...	...	177	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-16}$
16	v_{k-16}	...	...
17	$v_{k-1} \cdot v_{k-1}$	236	$v_{k-2} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-4}$
18	$v_{k-1} \cdot v_{k-2}$	...	...
...	...	367	$v_{k-9} \cdot v_{k-12} \cdot v_{15}$
32	$v_{k-1} \cdot v_{k-16}$	...	...
33	$v_{k-2} \cdot v_{k-2}$	560	$v_{k-14} \cdot v_{k-15} \cdot v_{k-16}$
34	$v_{k-2} \cdot v_{k-3}$	561	v_{k-1} / v_{k-2}
...	...	562	v_{k-1} / v_{k-3}
47	$v_{k-2} \cdot v_{k-16}$	...	...
...	...	575	v_{k-1} / v_{k-16}
152	$v_{k-16} \cdot v_{k-16}$	...	...
153	$v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-3}$	802	v_{k-16} / v_{k-1}
154	$v_{k-1} \cdot v_{k-2} \cdot v_{k-4}$	803	v_{k-16} / v_{k-2}
...
166	$v_{k-1} \cdot v_{k-3} \cdot v_{k-4}$	816	v_{k-16} / v_{k-15}

Вхідні параметри обчислювальної схеми методу задавали таким чином:
 $MCN=100, Limit=3, S=15, [I_{min}; I_{max}]=[3; 7]$.

В ході досліджень було проведено 5 обчислювальних експериментів із однаковими заданими початковими умовами. Варто зазначити, що у кожному з них дослідження проводилися паралельно із використанням формул (2.13), (2.14) та (2.15).

Зауважимо, що найскладнішою процедурою в методі структурної ідентифікації є процедура розрахунку значення цільової функції – $\delta(\lambda_s)$. Ось чому ефективність використання виразів (2.13), (2.14) та (2.15) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації ІРР буде оцінюватися на основі необхідної кількості обчислень значень показника $\delta(\lambda_s)$ для пошуку адекватної структури ІРР.

Порівняння обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації, заснований на алгоритмі бджолоїної колонії із застосуванням виразів (2.13), (2.14) та (2.15) при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації моделі динаміки формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу анаеробного мікробіологічного бродіння наведено у таблиці 3.2.

Як видно з таблиці 3.2, при реалізації методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії, із квадратичною залежністю (2.14) виявлення ділянок простору розв'язків задачі структурної ідентифікації ІРР з глобальними мінімумами відбувається найбільш ефективно – число згенерованих на основі поточної структури ІРР «структур-нащадків» від значення цільової функції $\delta(\lambda_s)$. Зокрема, в залежності від проведених експериментів, зменшення обчислювальної складності коливається від 5% до 10%.

Таблиця 3.2 – Порівняння ефективності застосування лінійного, квадратичного та кубічного операторів для обчислення показника R_s

Номер обчислювального експерименту	Кількість обчислень значень цільової функції, при реалізації відомого методу (із використанням лінійної залежності)	Кількість обчислень значень цільової функції, при реалізації відомого методу (із використанням квадратичної залежності)	Кількість обчислень значень цільової функції, при реалізації відомого методу (із використанням кубічної залежності)
1	4 564 016	4 251 322	5 741 124
2	3 897 144	3 703 571	4 008 522
3	4 700 102	4 398 780	4 561 098
4	5 204 320	4 823 119	5 321 632
5	4 112 864	3 826 193	4 678 561

Також, зменшення обчислювальної складності завдяки використанню квадратичної залежності на тестових прикладах, досягається мінімум на 5% для простих моделей та до 50% – для більш складних.

3.3 Опис об'єктної моделі та алгоритмічної реалізації методу структурної ідентифікації різницевого рівняння в інтервальному вигляді

Розроблена програмна система реалізації методу структурної ідентифікації моделей процесу анаеробного мікробіологічного бродіння у вигляді ІРР на основі алгоритму бджолоїної колонії є інструментальним засобом для математичного моделювання процесів бродіння у випадку, коли для побудови моделі вихідні дані представлені в інтервальному вигляді.

Розглянемо детальніше функціональні можливості представленої програмної системи. На рисунку 3.3 подано функціональну модель

розробленої програмної системи, яка зображає основні функції програмного продукту.



Рисунок 3.3 – Функціональну модель розробленої програмної системи для моделювання процесів анаеробного мікробіологічного бродіння

На рисунку 3.3 показано, що програмна система дає можливість користувачу ввести експериментальні дані та початкові параметри реалізації методу структурної ідентифікації ІРР на основі алгоритму бджолоїної колонії. Крім того, на основі введених початкових параметрів реалізації методу, реалізована функція «Формування набору структурних елементів» автоматично генерує набір всіх структурних елементів F . Функція «Пошук структури моделі» реалізує послідовність перетворень структур ІРР λ_s за допомогою запропонованого методу структурної ідентифікації. Функція «Збереження проміжних результатів» дає можливість зупинити процес структурної ідентифікації, тобто функцію пошуку структури моделі, та

зберегти проміжні результати. Для автоматизації процесу пошуку структури математичної моделі у вигляді IPP програмну систему розроблено із використанням об'єктноорієнтованого підходу.

Для реалізації програмної системи застосовано технологію .NET, мову програмування C# та використано інтегроване середовище розробки програмних продуктів Microsoft Visual Studio. На рисунку 3.4 наведено об'єктно-орієнтовану модель програмної системи для проведення структурної ідентифікації IPP на основі алгоритму бджолоїної колонії. Зауважимо, що програмна система реалізована у вигляді браузернонезалежного веб-додатку.

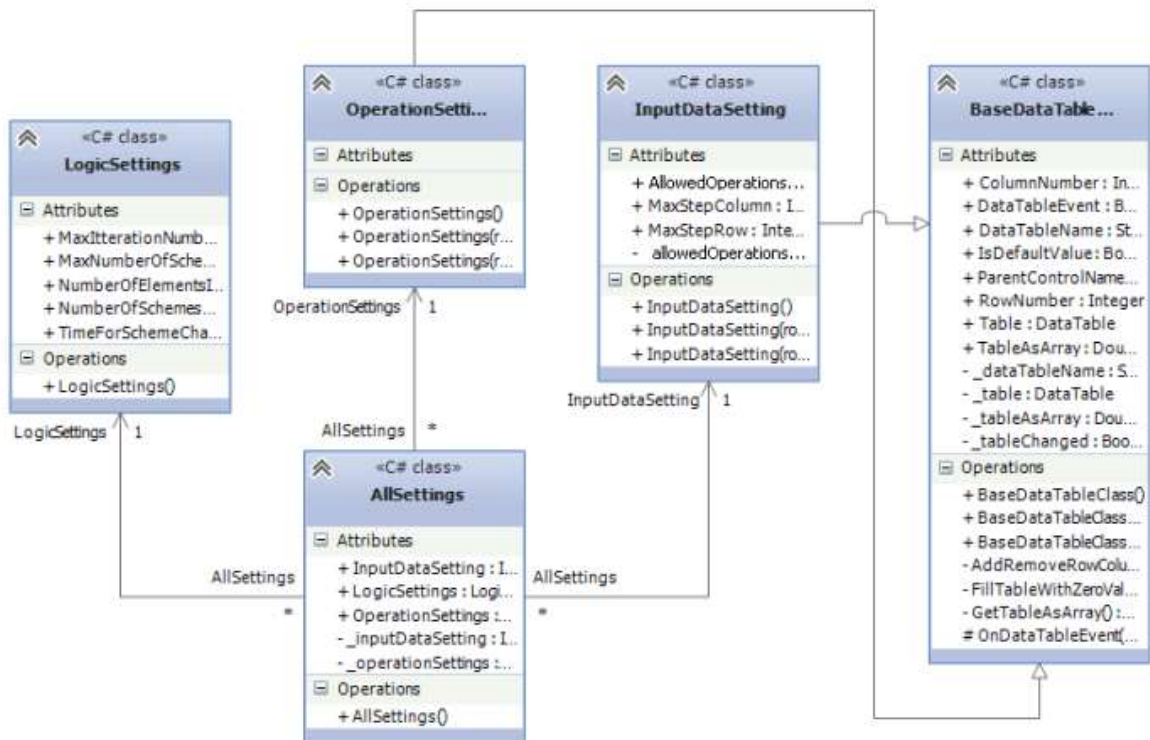


Рисунок 3.4 – Об'єктно-орієнтована модель програмної системи реалізації методу структурної ідентифікації IPP

Для введення даних та моніторингу процесу структурної ідентифікації, а також для зручності використання програмної системи було розроблено графічний інтерфейс, який представлено на рисунках 3.5-3.10. Розглянемо більш детально особливості реалізації інтерфейсу програмної системи на

прикладі задачі структурної ідентифікації моделі динаміки формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу анаеробного мікробіологічного бродіння, яку описано у праці [70].

На рисунку 3.5 зображено сторінку програмної системи «Input Data» для введення експериментальних даних. У зазначеній задачі ними є результати вимірювань концентрація метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу для заданих факторів впливу. Спершу вводимо розмірність таблиці з експериментальними даними (поля: Rows=4, Columns=8). Далі на сторінці динамічно формується таблиця заданої розмірності, яка повинна бути заповнена експериментальними даними.

Input Data

Rows: Max Step Rows: Input data deviation:

Columns: Max Step Columns: Initial condition deviation:

<input type="text" value="0.6"/>	<input type="text" value="0.63"/>	<input type="text" value="0.66"/>	<input type="text" value="0.66"/>	<input type="text" value="0.68"/>	<input type="text" value="0.65"/>	<input type="text" value="0.62"/>	<input type="text" value="0.61"/>
<input type="text" value="0.68"/>	<input type="text" value="0.74"/>	<input type="text" value="0.78"/>	<input type="text" value="0.82"/>	<input type="text" value="0.85"/>	<input type="text" value="0.83"/>	<input type="text" value="0.79"/>	<input type="text" value="0.71"/>
<input type="text" value="0.72"/>	<input type="text" value="0.78"/>	<input type="text" value="0.82"/>	<input type="text" value="0.85"/>	<input type="text" value="0.86"/>	<input type="text" value="0.82"/>	<input type="text" value="0.78"/>	<input type="text" value="0.73"/>
<input type="text" value="0.62"/>	<input type="text" value="0.63"/>	<input type="text" value="0.68"/>	<input type="text" value="0.7"/>	<input type="text" value="0.71"/>	<input type="text" value="0.67"/>	<input type="text" value="0.66"/>	<input type="text" value="0.65"/>

Рисунок 3.7 – Вікно введення експериментальних даних

Після цього, потрібно ввести такі значення: Max Step Rows, Max Step Columns, які визначають порядок різницевого рівняння, тобто визначають початкові умови для реалізації методу структурної ідентифікації IPP; Input data deviation, яке визначає величину похибки вимірювань справжніх значень прогнозованої характеристики (значення повинно знаходитися в межах від 0 до 1); Initial condition deviation, яке визначає величину похибки вимірювань

для встановлення початкових умов (значення повинно знаходитись в межах від 0 до 1).

У випадку, коли вхідні параметри (управління) впливають на модельовану характеристику, то для реалізації методу структурної ідентифікації необхідно перейти на сторінку «Experiments» натиснувши при цьому кнопку «Next».

Рисунок 3.6 ілюструє, що для введення векторів вхідних змінних (управління) спершу потрібно ввести розмірність та їх кількість. У випадку задачі структурної ідентифікації моделі динаміки формування метаноутворюючих бактерій є два вектори вхідних змінних, кожен із яких містить два значення факторів впливу, а саме: температура процесу бродіння та концентрація субстрату. Після того заповнюємо згенеровану таблицю для введення значень вхідних змінних (див. рисунок 3.6).

Experiments

The screenshot shows a web interface titled "Experiments". At the top, there is a label "Array Size:" followed by two dropdown menus, both currently set to "2". Below this, there are two rows of input fields. The first row contains two text boxes with the values "120" and "0.25". The second row contains two text boxes with the values "125" and "0.28". At the bottom of the form, there are two buttons: "<<Previous" and "Next>>".

Рисунок 3.6 – Вікно введення вхідних змінних (елементів управління)

Для реалізації функції «Формування набору структурних елементів» потрібно ввести співвідношення між вхідними змінними, після автоматичного формування елементів набору заданих початкових умов. Щоб ввести відношення між вхідними змінними необхідно перейти на сторінку

«Parameters Allowed Operations», загальний вигляд якої проілюстровано на рисунку 3.7. Для переходу далі необхідно натиснути кнопку «Next».

Parameters Allowed Operations



The image shows a software interface window titled "Parameters Allowed Operations". At the top, there is a text input field containing the expression "u1_0/u2_0". To the right of this field is an "Add" button, and further right are two small buttons with the symbols "/" and "*". Below the input field, there are four buttons arranged in two rows: "u1_0" and "u2_0" in the first row, and "u1_1" and "u2_1" in the second row. At the bottom of the window, there are two buttons: "<<Previous" on the left and "Next>>" on the right.

Рисунок 3.7 – Вікно введення комбінацій вхідних змінних (елементів управління)

Варто зазначити, що при переході на сторінку «Parameters Allowed Operations», на ній уже відображені кнопки, що визначають вхідні змінні (елементи управління), які були попередньо введені у вікні «Experiments». Для формування відношень між вхідними змінними доступні арифметичні операції: «*», «/». Після цього потрібно ввести по чергову усі необхідні відношення між вхідними змінними. Приклад виконання цієї операції зображено на рисунку 3.7. Слід зауважити, що комбінації з множини елементів (вхідних змінних) необхідно формувати, зважаючи на фізичний аналіз реального модельованого процесу для забезпечення умови зниження обчислювальної складності застосування методу структурної ідентифікації ІРР.

Далі необхідно задати початкові параметри реалізації методу структурної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії після введення комбінацій вхідних змінних, а для цього потрібно перейти у наступне вікно «Logic Settings».

Рисунок 3.8 ілюструє загальний вигляд вікна «Logic Settings». У цьому вікні потрібно заповнити усі поля, а саме: Number of Schemes for calculation –

S , Number of elements in structure – $[I_{\min}; I_{\max}]$, Max number of iterations – MCN, Max number of unchangeable structure – LIMIT, Time for structure change – час для проведення ідентифікації параметрів поточної структури IPP.

Logic Settings

Number of structures for calculation:

Number of elements used in structure:

From:

To:

Max number of iterations:

Max number of unchangeable structure:

Time for structure change:

Рисунок 3.8 – Вікно введення початкових параметрів реалізації методу структурної ідентифікації IPP

Далі запускаємо функцію “Пошук структури моделі” та переходимо до етапу структурної ідентифікації IPP, натиснувши при цьому кнопку «Next», яка переводить у вікно «Main», де можна прослідкувати перетворення структур IPP (рисунок 3.9).

На сторінці «Main» відображено поточну структуру IPP, поточне значення її показника якості, а також поточне значення показника обчислювальної складності реалізації методу структурної реалізації. Слід зауважити, що у цьому ж вікні буде виведено «оптимальну» структуру IPP (рисунок 3.10).

У результаті проведення процедури структурної ідентифікації моделі динаміки формування метаноутворюючих бактерій на стадії метаногенезу

анаеробного мікробіологічного бродіння отримали структуру цієї моделі, (див. рисунок 3.10).

```
Main [STOP]

Current delta:
0.35487102

Value of computation complexity indicator:
3158246

Following structure currently used:
currentPoint.A1 +
currentPoint.A2 * ((u1_0 * u2_1) / (u2_0 * u1_1)) * prognozValues[i, j - 2] +
currentPpoint.A3 * ((u1_0 * u2_1) / (u2_0 * u1_1)) * prognozValues[i - 1, j] +
currentPpoint.A4 * ((u1_0 * u2_1) / (u2_0 * u1_1)) * prognozValues[i, j - 1] +
currentPpoint.A5 * prognozValues[i - 1, j - 1] +
currentPpoint.A6 * prognozValues[i, j - 2] +
currentPpoint.A7 * prognozValues[i - 1, j] +
currentPpoint.A8 * (u1_1 / u2_1) * prognozValues[i - 1, j - 1] +
currentPoint.A9 * prognozValues[i, j - 2] * prognozValues[i, j - 2]
```

Рисунок 3.9 – Вікно моніторингу процесу структурної ідентифікації

```
Main [STOP]

Value of computation complexity indicator:
398151753

Final structure:
currentPoint.A1 +
currentPoint.A2 * ((u1_0 * u2_1) / (u2_0 * u1_1)) * prognozValues[i - 1, j - 1] +
currentPpoint.A3 * prognozValues[i - 1, j - 2] +
currentPpoint.A4 * prognozValues[i, j - 1] +
currentPpoint.A5 * ((u1_0 * u2_1) / (u2_0 * u1_1)) * prognozValues[i - 1, j]
```

Рисунок 3.10 – Вікно «Main» після завершення процедури структурної ідентифікації ІРР

Також проведено оцінку значення вектору параметрів ІРР, а також обчислено прогнозовані значення модельованої характеристики, тобто динаміки формування метаноутворюючих бактерій. Після завершення процедури структурної ідентифікації програмна система записує зазначені величини у текстовий файл.

3.4 Висновки до розділу

У третьому розділі удосконалено метод структурної ідентифікації різницевого рівняння на основі інтервальних моделей, що ґрунтуються на моделях поведінки колонії медоносних бджіл. В представленому методі обґрунтовано використання нелінійного оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару» у вигляді квадратичної залежності між кількістю «структурнащадків» згенерованих в околі поточної «структури-предка» та значенням цільової функції для цієї структури. Таким чином, в результаті використання запропонованого методу знижено обчислювальну складність його реалізації.

Також проведено порівняльний аналіз обчислювальної складності існуючого та запропонованого методу структурної ідентифікації. Показано зниження обчислювальної складності від 5% до 50% для простих та для складніших моделей відповідно.

В результаті удосконалення методу структурної ідентифікації ІРР розроблено блок-схему алгоритму його реалізації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл.

Запропоновано та обґрунтовано функціональну модель програмної системи для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз біохімічних процесів анаеробного бродіння у біогазових установках, в результаті чого встановлено основні його етапи, а саме: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез, метаногенез.

2. Охарактеризовано особливості задач математичного моделювання в умовах структурної невизначеності, встановлено, що для моделювання процесів у біогазових установках доцільно використовувати математичні моделі у вигляді різницевого рівняння.

3. Проаналізовано методи структурної ідентифікації інтервальних математичних моделей, показано, що вони зорієнтовані на використання експериментальних даних без урахування різної структури зброджуваної сировини та розкиду технологічних параметрів процесу бродіння, а також характеризуються високою обчислювальною складністю. Обґрунтовано використовувати метод структурної ідентифікації на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл.

4. Проведено оцінку якості структури інтервального різницевого рівняння та проведено обґрунтування методу його розв'язування.

5. Розроблено алгоритм структурної ідентифікації анаеробного мікробіологічного бродіння на основі моделей поведінки колонії медоносних бджіл. У запропонованому алгоритмі використано нелінійний оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару», що дозволило підвищити ступінь неоднорідності покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації і тим самим знизити обчислювальну складність його реалізації.

6. Проведено верифікацію розробленого алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого рівняння для моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння, показано зниження обчислювальної складності від 5% до 50% для простих та для складніших моделей відповідно.

7. Розроблено програмну систему для ідентифікації інтервальних різницевих рівнянь процесів анаеробного мікробіологічного бродіння в умовах структурної невизначеності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гураль І.В., Чехут І.Р., Івасів В.А. Обґрунтування вибору неавтономної моделі процесу бродіння у біогазовій установці // Матеріали VII всеукраїнської науково-практичної конференції молодих науковців «Інформаційні технології» (ІТ-2020). м. Київ, 2020. С.151-152.
2. Кульчицький С.Ю., Чехут І.Р. Обґрунтування вибору штучної нейронної мережі для навігації роботехнічної платформи // Матеріали III науково-практичної конференції молодих вчених і студентів «Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі» (ІКСМ-2020). Тернопіль, 2020. С. 22.
3. Березький О.М., Дубчак Л.О., Мельник Г.М. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи освітнього ступеня «Магістр». Спеціальність: комп'ютерна інженерія. Магістерська програма – «Комп'ютерна інженерія» / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ЗУНУ, 2020. 32 с.
4. Гураль І.В., Дубчак Л.О. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів, звітів про проходження практики, випускних кваліфікаційних робіт для студентів спеціальності «Комп'ютерна інженерія» / Під ред. О.М. Березького. Тернопіль: ТНЕУ, 2019. 33 с.
5. Боднар А.М. Перший крок до екологічного майбутнього – сортування сміття. – Тернопіль, 2013. – 12 с.
6. Gerber M., Span R. An Analysis of Available Mathematical Model for Anaerobic Digestion of Organic Substances for Production of Biogas // International Gas Union Research conference. Paris 2008. P. 5–7.
7. Гураль І.В. Дивак М.П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромодельовання процесів виробництва біогазу // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». – Хмельницький, 2014. С.152-158.

8. I. Hural., 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) UKRAINE 24-27 February 2015. P. 93-96.

9. Дивак М., Стахів П., Каліщук І. Ідентифікація параметрів моделей «вхід–вихід» динамічних систем на основі інтервального підходу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. 2004. Т. 9, № 4. С. 109–117.

10. Monod J. The Growth of Bacterial Cultures // Annual Reviews of Microbiology. 1949. Vol. 3. P. 371-394

11. Wolf K.-H. Kinetik in der bioverfahrenstechnik. Behr, Hamburg. 1991. ISBN 3925673-90-3

12. Monod J. The technique of continuous culture theory and applications. Ann. Inst. Pasteur, 1950. Vol. 79. P. 390-410.

13. Biswas J., Chowdhury R., Bhattacharya P. Kinetic studies of biogas generation using municipal waste as feed stock // Enzyme and Microbial Technology. 2006 Vol. 38. P. 493–503.

14. Pfeffer J. T. Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse // Biotechnology and Bioengineering. 1974. Vol. 16. P. 771–787.

15. Moser H. The dynamics of bacterial populations maintained in the chemostat. Carnegie Institution of Washington Publication. 1958. 614 p.

16. Contois D.E. Kinetics of bacterial growth: relationship between Population density and specific growth rate of continuous cultures // Journal of General Microbiology. 1959. Vol. 21. P.40–50.

17. Beba A, Atalay F. S. Mathematical models for methane production in batch fermenters // Biomass. 1986 Vol. 11. P. 173–184.

18. Pfeffer J. T. Temperature effects on anaerobic fermentation of domestic refuse // Biotechnology and Bioengineering. 1974. Vol. 16. P. 771–787.

19. Powell E. O. The growth rate of microorganisms as a function of substrate concentration // *Microbial Physiology and Continuous Culture*. 3rd International Symposium, Salisbury. Edited by: Powell E.O.; Evans C. G. T.; Strange R. E.; Tempest D. W. London, 1967. P. 34–56.

20. Chen Y. R., Hashimoto A. G. Kinetics of methane fermentation // *Biotechnology and Bioengineering Symposium*. 1978. No. 8. P. 269–282.

21. Griffin M. E., McMahon K. D., Mackie R. I., Raskin L. Methanogenic population dynamics during start-up of anaerobic digesters treating municipal solid waste and biosolids // *Biotechnology and Bioengineering*. 1998 Vol. 57, no. 3. P. 342–355.

22. Mitsdörffer R. Charakteristika der zweistufigen thermophilen mesophilen schlammfäulung unter berücksichtigung kinetischer ansätze // *Berichte aus wassergüte und abfallwirtschaft*. Technische Universität München, 1991. No. 109. 410p.

23. 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, UKRAINE February 25 March 1, 2014. P. 750–751.

24. 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) UKRAINE 24-27 February 2010. P. 93-96.

25. 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. P.17–36.

26. Hural I., Dyvak M., 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.

27. Wu B., Bibeau L.E., Gebremedhin K. G. Three-dimensional numerical simulation model of biogas production for anaerobic digesters // Canadian biosystems engineering. 2009. Vol. 51. P. 81-87.

28. Дивак М. П., Марценюк Є. О., Піговський Ю. Р., Дивак Т. М. Ідентифікація дискретних динамічних моделей процесів з інтервальною невизначеністю у біогазових установках переробки органічного сміття // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. 2010. Вип 11 (164). С.181–188.

29. Дивак М. П. Теоретичні засади побудови моделей "вхід–вихід" статичних систем методами аналізу інтервальних даних // Дис. доктора технічних наук. Тернопіль: Тернопільська академія народного господарства, 2003. 304 с.

30. Бочков А. Ф., Милевский М. В. Интервальные модели в задачах идентификации статистических объектов с неопределенностью. Красноярск, 1990 (Препринт // ВЦ СО АН СССР, №17). С. 7–10.

31. Бочков А. Ф., Вошинин А. П., Сотиров Г. Р. Интервальный анализ как альтернатива регрессионному анализу // Заводская лаборатория. 1990. №7. С. 76–81.

32. Бочков А. Ф., Милевский М. В. Оценивание параметров модели для объектов с интервальной неопределенностью в выходных параметрах. Москва, 1988. 23 с. Деп. в ВИНТИ, № 926 С. 88.

33. Вошинин А. П., Сотиров Г. Р. Оптимизация в условиях неопределенности. М.: МЭИ София: Техника, 1989. 224 с.

34. Ивахненко А. Г., Степашко В. С. Численное исследование помехоустойчивости многокритериальной селекции моделей // Автоматика. 1982. № 4. С. 26-36.

35. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем // Київ: Наукова думка, 1981. 296 с.

36. Ивахненко А. Г., Петухова С. А., Юдин В. М. Объективный выбор оптимальной кластеризации выборки данных при компенсации неробастных помех // Автоматика. 1993. №3. С. 46-58.

37. Ивахненко А. Г. Степашко В. С. Помехоустойчивость моделирования // К.: Наук. думка, 1985. 216 с.

38. Ивахненко А.Г., Коппа Ю. В. Регуляризация решающих функций в методе группового учета аргументов // Автоматика. 1970. №2. С. 19–23.

39. Ивахненко А. Г., Мюллер Й. А. Самоорганизация прогнозирующих моделей. К.: Техника. 1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник. 1984. 223 с.

40. Калман Р. Идентификация систем с шумами // Успехи матем. наук, 1985 Вып. 4. С. 27–41.

41. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. Тернопіль. Економічна думка, 2011. 216 с.

42. Дивак М. П., Стахів П. Г. Ідентифікація моделей об'єктів в умовах інтервальної невизначеності на основі методів аналізу інтервальних даних // Пр. міжн. конф. з управління "АВТОМАТИКА 2000", Львів 11–15 вересня 2000: В 7-ми томах. Львів: Держ. НДІ інформ. інфраструкт., 2000. Т. 2. С. 90-97.

43. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I., Dyvak T. Features of structure identification of models of distributed parameters objects based on the artificial bee colony algorithm // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014) : Proc. of the XIIth Intern. Conf. Lviv-Slavske, 2014. P. 419-420.

44. Porplytsya N., Dyvak M., Dyvak T. Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning // Computational Problems of Electrical Engineering. 2014. Vol. 4, №2. P. 57-68.

45. Voytyuk I., Porplytsya N., Pukas A., Dyvak T. Identification the interval difference operators based on artificial bee colony algorithm in task of modeling the air pollution from vehicular traffic // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017) : Proc. of the XIVth Intern. Conf. Lviv, 2017. P. 58-62.

46. Порплиця Н. П., М. П. Дивак. Реалізація методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі алгоритму поведінки бджолоїної колонії // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2015. Вип. 4(93). С. 34-40.

47. Дивак М. П., Дивак Т. М. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В. С. Степашко. Київ : МННЦ ІТС, 2009. Вип. 1. 236 с. С. 35–43.

48. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979. 302 с.

49. Дивак М. П., Манжула В. І. Багатокритеріальний підхід структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем // Міжнародний науково–технічний журнал “Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія”. 2005. №2. С. 37–44.

50. Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк І. Ф. Критерії структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління: Матер. міжнар. проблем. - наук. міжгалуз. конф. (ПНМК–2010), 1–4 червня 2010 р. Бучач, 2010. Т. 1., № 6. С. 280–283.

51. 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.

52. Dekhtiar I., Dyvak T. , Martsenyuk Ye. Features of biogas production process and methods of its modeling / I. Dekhtiar, // 12-th International Conference

“The Experience Of Designing And Application Of CAD Systems in Microelectronics” Polyana Svalyava (Zakarpattia) UKRAINE 19-23 February 2013. P.66-68.

53. Матвійчук Я. М. Математичне макромодельовання динамічних систем: теорія і практика. Л.: Вид-во ЛНУ, 2000. 214 с.

54. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. Тернопіль Економічна думка, 2011. 216 с.

55. Ljung L., Soderstrom T. Theory and practice of recursive identification // Theory. Cambr., Mass: MIT Press, 1983. 529 p.

56. Вороновский Г. К., Махотило К. В., Петрашев С. Н., Сергеев С. А. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности. Харьков: Основа, 1997. 111 с.

57. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы: Монография. Таганрог: ТРТУ, 1998. 242 с.

58. Порплиця Н. П., Дивак М. П. Синтез структури інтервального різницевого оператора з використанням алгоритму бджолої колонії // Індуктивне моделювання складних систем. 2013. Вип. 5. С. 256-269.

59. Опейда Й., Швайка О. Глосарій термінів з хімії // Інститутт фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України, Донецький національний університет. Донецьк: «Вебер», 2008. 758 с.

60. Фриш К. Из жизни пчёл / И. А. Халифман. (отв.ред.). Москва: Мир, 1980. 216 с.

61. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 446с.

62. Porplytsya N., Dyvak M., Dyvak T. Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning // Computational Problems of Electrical Engineering. 2014. Vol. 4, №2. P. 57-68.

63. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: Techn. rep. TR06. Erciyes: Erciyes Univ. Press, 2005. 10 p.

64. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. 432 с.

65. Льюнг Л. О точности модели в идентификации систем // Известия АН. Техническая кибернетика, №6. М.: Наука, 1992. С. 55–64.

66. Очеретнюк Н. П., Дивак М. П. Структурна ідентифікація інтервальної моделі процесу сушіння гіпсокартону // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : Міжнар. наук.-техн. журнал. 2013. № 2. С. 211-217.

67. Марков С. М. Некоторые задачи интерполяции, идентификации и оценивания для интервальных данных // Межд. конф. по интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ. 92: Сб. тр. Москва, 1992. Т.1. С. 103.

68. Camazine S., Sneyd J. A model of collective nectar source by honey bees: selforganization through simple rules // Journal of Theoretical Biology. 1991. № 149. P. 547–571.

69. Гураль І. В., Дивак М. П. Біохімічний аналіз процесів в біогазових установках та його застосування в задачі макромодельовання процесів виробництва біогазу // Міжнародний науково-технічний журнал «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах». Хмельницький, 2014. С.152-158.

70. Гураль І. В. Макромодельовання стадії метаногенезу зброджування твердих побутових органічних відходів у біогазових установках // Вісник національного технічного університету «ХП». Серія «Математичне моделювання в техніці і технологіях». 2016. С.23-30.

Додаток А

Лістинг програмного коду

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Linq.Expressions;
using System.Text;
using CommonUtilAssembly;
using StructureIdentification.Settings;
namespace StructureIdentification.AdditionalClasses
{
    public class PredictionValue
    {
        public int KilkistDelta = 0;
        public int KilkistDyhotomia = 0;
        private int RowNumber
        {
            get { return _allSettings.InputDataSetting.RowNumber; }
        }
        private int ColumnNumber
        {
            get { return _allSettings.InputDataSetting.ColumnNumber; }
        }
        private AllSettings _allSettings;
        private Data _inputData;
        ParameterExpression arrayParam =
        Expression.Parameter(typeof(IntervalValue[,]),
        "prognozValues");
        ParameterExpression iParam = Expression.Parameter(typeof(int),
        "i");
        ParameterExpression jParam = Expression.Parameter(typeof(int),
        "j");
        ParameterExpression pointParam =
        Expression.Parameter(typeof(Point), "currentPoint");
        private List<Expression> _schemes;
        public List<Expression> Schemes
        {
            get { return _schemes == null || _schemes.Count == 0 ?
            (_schemes = GetAllSchemes()) :
            _schemes; }
        }
        private List<Expression> _usedSchemes = new List<Expression>();
        public List<Expression> UsedScemes
        {
            get { return _usedSchemes; }
        }
    }
}
```

```

private Func<IntervalValue[,], int, int, IntervalValue>
_currentFunction;
public Func<IntervalValue[,], int, int, IntervalValue>
CurrentFunction
{
    get
    {
        if (!UseNewScheme && _currentFunction != null)
            return _currentFunction;
        _currentFunction = Expression.Lambda<Func<IntervalValue[,],
int, int,
IntervalValue>>
(
    CurrentScheme,
    arrayParam,
    iParam,
    jParam
).Compile();
        return _currentFunction;
    }
}
private Expression GetNewScheme()
{
    if (NotUsedScheme.Count == 0)
        UsedScemes.Clear();
    var rnd = new Random();
    var newScheme = NotUsedScheme[rnd.Next(0, NotUsedScheme.Count -
1)];
    UsedScemes.Add(newScheme);
    return newScheme;
}
public List<Expression> NotUsedScheme
{
    get { return Schemes.Where(v =>
!UsedScemes.Contains(v)).ToList(); }
}
private Expression _currentScheme;
public Expression CurrentScheme
{
    get
    {
        if (!UseNewScheme && _currentScheme != null)
            return _currentScheme;
        UseNewScheme = false;
        _currentScheme = GetNewScheme();
        return _currentScheme;
    }
}
public bool UseNewScheme { get; set; }
public PredictionValue(AllSettings allSettings, Data inputData)
{
    _allSettings = allSettings;
    _inputData = inputData;
}

```



```

    }
    public bool ValidateCondition(DataCondition secondData,
DataCondition data)
    {
        if (secondData.Delta < data.Delta)
            return true;
        if (secondData.Delta > data.Delta)
            return false;
        return !(secondData.Centre > data.Centre);
    }
    public Point CalculateNewDirection(double r)
    {
        var rand = new Random();
        var list = new List<double>();
        for (var i = 0; i < 11; i++)
        {
            list.Add(rand.NextDouble());
            if (rand.Next(2) != 0)
                list[i] = -list[i];
        }
        if (list[9] > 0)
            list[9] = -list[9];
        if (list[10] < 0)
            list[10] = -list[10];
        double R;
        R = Math.Sqrt(Math.Pow(list[0], 2) + Math.Pow(list[1], 2) +
Math.Pow(list[2], 2) +
Math.Pow(list[3], 2));
        var result = new Point(list[0] / R, list[1] / R, list[2] / R,
list[3] / R, list[4] / R, list[5] / R,
list[6] / R, list[7] / R, list[8] / R, list[9] / R, list[10] /
R);
        KonusR.KonusRastrigin k = new KonusRastrigin();
        k.GetPoint();
        return result;
    }
    public IntervalValue[,] PodilData(Data inputData)
    {
        if (inputData.InputData.Length < 10)
            inputData.GetInputDataIntervalView().CopyTo(null, 60);
        return null;
    }
    public DataCondition ValidateNewPointWithPodil(Point
currentPoint, Data inputData, int
dataType)
    {
        _inputData = inputData;

        PodilData(inputData);
        this.KilkistDelta++;
        var prognozValues = this.Prediction(currentPoint, inputData,
dataType);
        var experimentalValues = inputData.GetInputDataIntervalView();

```

```

    if (experimentalValues == null || experimentalValues.Length <=
2)
    return null;
    var listVidstan = new List<double>();
    var listCentre = new List<double>();
    for (var i = 0; i < RowNumber; i++)
    {
        for (var j = 0; j < ColumnNumber; j++)
        {
            var prognozWidth = prognozValues[i, j].Up - prognozValues[i,
j].Down;
            var
                listResult
                =
OperationInterval.CrossInterval(prognozValues[i, j],
experimentalValues[i, j]);
            if (listResult.Count == 1)
            {
                var unionInterval = (IntervalValue)listResult[0];
                var secondWidth = unionInterval.Up - unionInterval.Down;
                var
                    centre
                    =
Math.Abs(((prognozValues[i, j].Up
+
prognozValues[i, j].Down) / 2)
- ((experimentalValues[i, j].Up + experimentalValues[i, j].Down)
/ 2));
                listVidstan.Add(prognozWidth - secondWidth);
                listCentre.Add(centre);
            }
            else
            {
                var centre = (double)listResult[1];
                listVidstan.Add(centre);
                listCentre.Add(centre);
            }
        }
    }
    DataCondition data = new DataCondition();
    data.Delta = listVidstan[0];
    for (int i = 0; i < listVidstan.Count; i++)
    {
        if (data.Delta < listVidstan[i])
        {
            data.Delta = listVidstan[i];
            data.Centre = listCentre[i];
        }
    }
    return data;
}
public IntervalValue[,] Prediction(Point currentPoint, Data
inputData, int dataType)
{
    IntervalValue[,] input = inputData.GetInputDataIntervalView();
    if (input == null || input.Length <= 2)
        return null;
    var prognozValues = new IntervalValue[RowNumber, ColumnNumber];
    for (int i = 1; i < RowNumber; i++)

```

```

{
for (int j = 1; j < ColumnNumber; j++)
{
prognozValues[i, j] = new IntervalValue(0, 0);
}
}
for (int i = 0; i < 2; i++)
{
for (int j = 0; j < ColumnNumber; j++)
{
var settedPrognoz = new IntervalValue();
settedPrognoz.Up = m1 * (input[i, j].Up + input[i, j].Down) /
2;
settedPrognoz.Down = m2 * (input[i, j].Up + input[i, j].Down) /
2;
prognozValues[i, j] = settedPrognoz;
}
}
for (int i = 0; i < RowNumber; i++)
{
for (int j = 0; j < 2; j++)
{
//TODO use Initial condition deviation as % for add/sub
IntervalValue settedPrognoz = new IntervalValue();
settedPrognoz.Up = m1 * (input[i, j].Up + input[i, j].Down) /
2;
settedPrognoz.Down = m2 * (input[i, j].Up + input[i, j].Down) /
2;
prognozValues[i, j] = settedPrognoz;
} }
for (int i = 2; i < RowNumber; i++)
{
for (int j = 2; j < ColumnNumber; j++)
{
prognozValues[i, j] = CurrentFunction(prognozValues, i, j);
}
}
return prognozValues;
}
#region Scheme generation
private List<Expression> GetAllSchemes()
{
var res = new List<Expression>();
//var arrayParam =
Expression.Parameter(typeof(IntervalValue[,]), "prognozValues");
//var iParam = Expression.Parameter(typeof(int), "i");
//var jParam = Expression.Parameter(typeof(int), "j");
//var pointParam = Expression.Parameter(typeof(Point),
"currentPoint");
var allPrognozValues = GetAllPossiblePronozValues(arrayParam,
iParam, jParam);
var allAllowedOperations = GetAllowedOperationList();
var allowedOperationsAndPrognozValues = new List<Expression>();

```

```

    allowedOperationsAndPrognozValues.AddRange(allPrognozValues);

allowedOperationsAndPrognozValues.AddRange(allAllowedOperations)
;
    foreach (var oneAllowedOperation in allAllowedOperations)
    {
        for (var i = 0; i < allPrognozValues.Count; i++)
        {

allowedOperationsAndPrognozValues.Add(Expression.Multiply(oneAll
owedOperation,
allPrognozValues[i]));
        }
    }
    var pointA = new List<Expression>
    {
        Expression.Property(pointParam, "A1"),
        Expression.Property(pointParam, "A2"),
        Expression.Property(pointParam, "A3"),
        Expression.Property(pointParam, "A4"),
        Expression.Property(pointParam, "A5"),
        Expression.Property(pointParam, "A6"),
Expression.Property(pointParam, "A7"),
        Expression.Property(pointParam, "A8"),
        Expression.Property(pointParam, "A9"),
        Expression.Property(pointParam, "A10"),
        Expression.Property(pointParam, "A11")
    };
    var                allCombinationForPointA                =
GetAllCombinationForPointA(pointParam,
allowedOperationsAndPrognozValues);
    foreach (var oneComb in allCombinationForPointA)
    {
        var oneScheme = Expression.Add(oneComb[0], oneComb[1]);
        for (var i = 2; i < oneComb.Count; i++)
        {
            oneScheme = Expression.Add(oneScheme, oneComb[i]);
        }
        res.Add(oneScheme);
    }
    return res;
}
private                List<List<BinaryExpression>>
GetAllCombinationForPointA(Expression
pointParam, List<Expression> allExpressions)
{
    var pointA = new List<Expression>
    {
        Expression.Property(pointParam, "A1"),
        Expression.Property(pointParam, "A2"),
        Expression.Property(pointParam, "A3"),
        Expression.Property(pointParam, "A4"),
        Expression.Property(pointParam, "A5"),

```

```

Expression.Property(pointParam, "A6"),
Expression.Property(pointParam, "A7"),
Expression.Property(pointParam, "A8"),
Expression.Property(pointParam, "A9"),
Expression.Property(pointParam, "A10"),
Expression.Property(pointParam, "A11")
};
var res = new List<List<BinaryExpression>>();
foreach (var onePintA in pointA)
{
    res.Add(allExpressions.Select(v =>
Expression.Multiply(onePintA, v)).ToList());
}
var s = new StringBuilder();
res[0].ForEach(v=>s.AppendLine(v.ToString()));
var ss = s.ToString();
res.AddRange(pointA.ToArray());
var indexList = res.Select(oneList => Enumerable.Range(0,
oneList.Count).Select(v=>(short)v).ToList()).ToList();
var
    allIndexCombination
CombinationUtils.AllCombinationsOf(indexList.ToArray());
var
    allCombinationOfA
CombinationUtils.AllCombinationsOf(res.ToArray());
return allCombinationOfA;
}
private Expression GetOneExprerExpression(Expression operand1,
Expression operand2,
char operation)
{
    switch (operation)
    {
        case '/':
            return Expression.Divide(operand1, operand2);
            break;
        case '*':
            return Expression.Multiply(operand1, operand2);
            break;
        default:
            throw new Exception(string.Format("Operation '{0}' does not
implemented",
operation));
    }
}
private List<Expression> GetAllowedOperationList()
{
    var res = new List<Expression>();
    var arrayParam = Expression.Parameter(typeof(double[,]),
"Operators");
    foreach (var oneOper in
_allSettings.InputDataSeting.AllowedOperations)
    {
        var operands = oneOper.Split(new char[] { '/', '*' });
        var operandExp = operands.Select(v =>

```

```

    {
    var array = v.Replace("P", "").Replace("O", "").Split(new[] {
    '_' });
    return
        Expression.ArrayIndex(arrayParam,
    Expression.Constant(int.Parse(array[0])),
    Expression.Constant(int.Parse(array[1])));
    }).ToList();
    var operations = oneOper.Where(v => v == '/' || v ==
    '*').ToList();
    var previousOperand = GetOneExprerExpression(operandExp[0],
    operandExp[1],
    operations[0]);
    for (var i = 1; i < operations.Count; i++)
    {
    previousOperand = GetOneExprerExpression(previousOperand,
    operandExp[(i + 1)
    * 2], operations[i]);
    }
    res.Add(previousOperand);
    }
    return res;
    }
    private List<Expression> _allSchemes;
    public List<Expression> AllSchemes
    {
    get
    {
    if (_allSchemes != null && _allSchemes.Count != 0)
    return _allSchemes;
    _allSchemes = GetAllSchemes();
    return _allSchemes;
    }
    }
    private List<Expression> GetAllPossiblePronozValues(Expression
    arrayParam, Expression
    iParam, Expression jParam)
    {
    var allPrognosValues = new List<Expression>();
    allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam, iParam,
    Expression.Constant(0)));
    allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam,
    Expression.Constant(0),
    iParam));
    for (var i = 1; i < _allSettings.InputDataSetting.MaxStepRow -
    1; i++)
    {
    allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam, iParam,
    Expression.Subtract(iParam, Expression.Constant(i))));
    }
    for (var i = 1; i <
    _allSettings.InputDataSetting.MaxStepColumn; i++)
    {
    allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam,

```

```

Expression.Subtract(iParam, Expression.Constant(i)), jParam));
    }
    for (var i = 0; i <= _allSettings.InputDataSetting.MaxStepRow;
i++)
    {
        for (var j = 0; j <=
_allSettings.InputDataSetting.MaxStepColumn; j++)
        {
            if (i == 0)
            {
                allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam, iParam,
Expression.Subtract(jParam, Expression.Constant(j))));
                continue;
            }
            if (j == 0)
            {
                allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam,
Expression.Subtract(iParam, Expression.Constant(i)), jParam));
                continue;
            }
            if (i == 0 && j == 0)
                continue;
            var iExp = i == 0 ? iParam : Expression.Subtract(iParam,
Expression.Constant(i));
            var jExp = j == 0 ? jParam : Expression.Subtract(jParam,
Expression.Constant(j));
            allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam, iExp,
jExp));
            allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam,
Expression.Subtract(iParam, Expression.Constant(i)),
Expression.Subtract(jParam,
Expression.Constant(j))));
        }
    }
    var count = allPrognosValues.Count;
    for (var i = 0; i < count; i++)
    {
        for (var j = i; j < count; j++)
        {
            allPrognosValues.Add(Expression.Multiply(allPrognosValues[i],
allPrognosValues[j]));
        }
    }
    return allPrognosValues;
}
#endregion

}
}

```

Додаток Б
Світлокопії публікацій

КИЇВСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ БОРИСА ГРИНЧЕНКА
Факультет інформаційних технологій та управління
Кафедра комп'ютерних наук і математики
Кафедра інформаційної та кібернетичної безпеки

УНІВЕРСИТЕТ ДЕРЖАВНОЇ ФІСКАЛЬНОЇ СЛУЖБИ УКРАЇНИ
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційних систем і технологій

ISSN: 2664-2638 (Online)

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ – 2020

**Збірник тез
VII Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих
науковців**

21 травня 2020 року
м. Київ

Київ – 2020

ДЖЕРЕЛА

1. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Міненерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.
2. В.С. Грінченко, “Зниження магнітного поля трифазних ліній електропередачі гратчастим електромагнітним екраном,” Технічна електродинаміка, № 4, С. 29 – 32, 2018.
3. V. Grinchenko and U. Pyrohova, “Mitigation of overhead line magnetic field by U-shaped grid shield,” in Proc. 2019 IEEE 2nd Ukraine Conf. Electrical and Computer Engineering, pp. 345 – 348.

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НЕАВТОНОМНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗБРОДЖУВАННЯ У БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ

Гураль І.В., Чехут І.Р., Івасів В.А.

Тернопільський національний економічний університет, м. Тернопіль

Біоенергетика є одним із альтернативних джерел енергії. Використання біомаси за допомогою біогазових установок дають змогу отримати високоефективні органічні добрива та енергію у вигляді біогазу. В Україні нараховується лише декілька таких установок. З економічної точки зору ефективність тих установок є низькою, проте в умовах збільшення забруднення побутовими відходами задача створення біогазових установок з метою переробки цих відходів є актуальною.

Зважаючи на актуальність задачі побудови біогазових установок для переробки органічних відходів, важливим залишається економічне обґрунтування доцільності створення таких установок. Таке обґрунтування можна провести із використанням методів математичного моделювання, які би відтворювали процес отримання біогазу та його перетворення в електричну енергію.

На сьогоднішній день розроблено ряд математичних моделей, які описують біохімічні процеси у біогазових установках, що відзначаються складністю і мають низьку адекватність, та моделі, які описують процеси у біогазових установках на рівні вхідних та вихідних змінних. У праці [1] розроблена автономна модель біогазової установки, в якій динаміка відбродженого субстрату не залежить від вхідних змінних. Зазначена модель процесів зброджування не дає можливість показати взаємозв'язок між управляючими змінними і кількістю утвореного біогазу. Водночас, аналіз процесів зброджування показав, що на його інтенсивність і, як наслідок, обсяг виходу біогазу впливають такі групи факторів: біологічні, фізичні, хімічні та організаційно технологічні [2].

За цих умов виникає задача побудови неавтономної моделі процесу зброджування органічних відходів у біогазових установках з метою

дослідження впливу вхідних факторів на обсяг отриманого біогазу і визначення таких технологічних характеристик процесу зброджування, які забезпечать максимальний його вихід. Розроблена модель уможливить провести економічне обґрунтування доцільності створення біогазової установки виходячи із витрат на її побудову та обсягу утвореного біогазу.

ДЖЕРЕЛА

1. Дивак М.П., Гураль І.В. Інтервальне представлення динаміки анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках // Індуктивне моделювання складних систем. – 2014. – Вип. 6. – С. 55-68.
2. Wu B., Bibeau E.L., Gebremedhin K.G. Three-dimensional numerical simulation model of biogas production for anaerobic digesters // Canadian biosystems engineering. – Volume 51. – 2009. – P. 81-87.

МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ MS EXCEL

Карасьова М.О., Долгальова О.В., Гришук Ю.В.

Донбаська національна академія будівництва і архітектури, м. Краматорськ

Запорукою успішності підприємства є ефективно сплановані логістичні процеси. Головним інструментом логістики являються транспортні задачі. Вони представляють собою задачі вибору оптимального варіанта логістики товарів від пункту виробника до пунктів збуту з урахуванням всіх реальних можливостей. Тому українським підприємствам слід звертати особливу увагу на організацію та вирішення даного питання.

Ми пропонуємо детально розглянути реалізацію задачі за Методом мінімальної вартості за існуючими даними (табл. 1) підприємства ПАТ «ЗевсКераміка» (м. Слов'янськ) з використанням MS Excel.

Таблиця 1

Об'єми зберігання і споживання та вартість транспортування виробів між складами та містами споживачами

Пункт та об'єми споживання/ Пункт та об'єми виробництва	Харків 1992 т	Полтава 1129 т	Дніпро 797 т	Запоріжжя 996 т
1	2	3	4	5
Склад №1 1359 т	4 735,00	728,00 ₴	3 228,00 ₴	1 210,00 ₴
Склад №2 1893 т	4 610,00 ₴	682,00 ₴	3 400,00 ₴	1 197,00
Склад №3 1665 т	4 800,00 ₴	650,00 ₴	3 338,00 ₴	1 253,00 ₴

	197
ТУМАННІ ОБЧИСЛЕННЯ В ІОТ-СИСТЕМАХ	
Чичкань А.І.	140
РОЗРОБКА ВЕБ-ДОДАТКУ ОБЛІКУ ТА КАТАЛОГІЗАЦІЇ ДОМАШНЬОЇ БІБЛІОТЕКИ	
Шепета А.С., Сидорова М.Г.	142
РОЗРОБЛЕННЯ ДОДАТКУ ДЛЯ СОРТУВАННЯ ФАЙЛІВ	
Шкікавий В.М.	143
РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМАЛЬНОЇ РЕКЛАМНОЇ ПРОПОЗИЦІЇ З ДОПОМОГОЮ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ	
Шупік Л.В.	145
ПРОГРАМУВАННЯ МІКРОКОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ШКАЛЬНОГО ВИВОДУ ДАНИХ У ВБУДОВАНИХ СИСТЕМАХ	
Ярошенко Д.В.	146
Секція 3. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ МЕТОДИ..... 148	
ПРО МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРНОСТЕЙ ДАНИХ	
Божуха Д.І., Косухіна О.С.	148
РОЗРОБКА НАПІВ-АНАЛІТИЧНОЇ МОДЕЛІ ГРАТЧАСТОГО ЕКРАНА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	
Грінченко В.С.	149
ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ НЕАВТОНОМНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ ЗБРОДЖУВАННЯ У БІОГАЗОВІЙ УСТАНОВЦІ	
Гураль І.В., Чехут І.Р., Івасів В.А.	151
МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ MS EXCEL	
Карасьова М.О., Долгальова О.В., Гришук Ю.В.	152
КЛІТИННИЙ АВТОМАТ ЯК ІНСТРУМЕНТ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	
Кисельов М.О.	154
АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ТРАНСПОРТУВАННЯ КЛІЄНТІВ КОМПАНІЇ ДО АЕРОПОРТУ	
Козачок Д.І., Михальчук Г.Й.	156
ЕКОНОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЯК ІНСТРУМЕНТ ДОСЛІДЖЕННЯ СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	
Панасюк О.Л.	157
МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ НАСЕЛЕННЯ ЗА УМОВ ВАЛЮТНОЇ ПАНІКИ	
Савка Н.Я., Пастух Р.С.	159
МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ МІСЦЯ РОЗМІЩЕННЯ ЗВОРотноГО ГОРТАННОГО НЕРВА ПРИ ХІРУРГІЧНИХ ОПЕРАЦІЯХ НА ЩИТОПОДІБНІЙ ЗАЛОЗІ	
Срогній Т.І., Понзель О.І.	161

**Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії**

**III НАУКОВО-ПРАКТИЧНА
КОНФЕРЕНЦІЯ МОЛОДИХ ВЧЕНИХ І СТУДЕНТІВ
«ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ КОМП'ЮТЕРНІ
СИСТЕМИ ТА МЕРЕЖЬ»**

26 листопада 2020 р.

**Тернопіль
2020**

ЗМІСТ

<i>Моспанко О.А.</i> Застосування нейромережових технологій для прогнозування конкурентної стратегії торговельних підприємств.....	7
<i>Моспанко О.А.</i> Ефективна організація користувачьких потоків при використанні пуассонівських потоків.....	8
<i>Гаврилюк Н.О.</i> Алгоритми та методи машинного навчання.....	9
<i>Гаврилюк Н.О.</i> Аналіз професійного самовизначення особисті на етапі навчання у ВНЗ.....	10
<i>Суслін В.В.</i> Алгоритм шифрування даних на основі модулярного експоненіювання.....	11
<i>Суслін В.В.</i> Програмна система шифрування даних на основі алгоритму криптолайт.....	12
<i>Каштелян І.В., Кулиняк Р.В.</i> Використання систем штучного інтелекту для покращення засобів планування задач	13
<i>Кулиняк Р.В., Каштелян І.В.</i> Алгоритм визначення "токсичності" повідомлення з використанням засобів NLP.....	14
<i>Момотюка О.В., Поворозник В.С.</i> Застосування нечіткої логіки в системах захисту інформації.....	15
<i>Капустинський Р.І., Щирба З.В.</i> Аналіз застосування нечітких систем для управління доступом до ресурсів.....	16
<i>Капустинський Р.І., Щирба З.В.</i> Сучасні застосування нечітких систем.....	17
<i>Пастернак А.О., Кондратюк М.І.</i> Автоматизовані системи управління функціонуванням теплових мереж.....	18
<i>Кондратюк М.І., Пастернак А.О.</i> Алгоритм оптимізації керування температурою води у теплових мережах.....	19
<i>Понзель О.І., Янзюк С.І.</i> Штучні нейронні мережі радіального типу як засіб автоматизації прийняття рішень ..	20
<i>Янзюк С.І., Пастух Р.С.</i> Автоматизовані системи контролю забруднення повітря шкідливими викидами автотранспорту.....	21
<i>Кульчицький С.Ю., Чехут І.Р.</i> Обґрунтування вибору штучної нейронної мережі для навігації роботехнічної платформи.....	22
<i>Баган Я.А., Бабій Ю.В.</i> Алгоритми текстурної сегментації на основі статистичних ознак.....	23
<i>Бабій Ю.В., Баган Я.А.</i> Алгоритми розпізнавання дорожніх знаків для мобільних пристроїв.....	24
<i>Дубчак Л.О., Мартинюк Н.В.</i> Аналіз сучасних підходів до керування освітленням «розумного» будинку.....	25

Інтелектуальні комп'ютерні системи та мережі, Тернопіль, 26 листопада 2020 р.

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ НАВІГАЦІЇ РОБОТЕХНІЧНОЇ ПЛАТФОРМИ

Вступ. На сьогоднішній день використання роботів в різних областях людської діяльності стає все більш помітним. Однією з найголовніших функцій, які можуть виконувати автономно керовані роботи, є планування траєкторії руху. Існують безліч методів для реалізації інтелектуальної системи управління мобільними роботами (навчання з підкріпленням, байєсовські мережі тощо). Проте вони мають певні обмеження, що не дозволяють ефективно використовувати їх для вирішення багатопільового завдання [1]. Одним з найперспективніших методів для вирішення проблематики завдання є штучні нейронні мережі. Даний підхід застосовується не тільки в складних навігаційних завданнях, а й у плануванні та моделюванні траєкторії руху робота починаючи з моменту його появи і закінчуючи найновішими роботами.

Постановка задачі. Актуальною задачею є аналіз відомих методів для реалізації інтелектуальної системи управління рухом робототехнічної платформи, а саме мобільним роботом та вибір архітектури штучної нейронної мережі.

Основний матеріал. Застосування штучних нейронних мереж (ШНМ) в робототехніці є широко поширеною практикою в силу їх порівняно легкої реалізації. У подібних завданнях робот є «тілом», а ШНМ – «мозком» агента, взаємодіє з середовищем. Варто зауважити, що створення ефективної мережі може виявитися важкоздійснюваним завданням з причини високої розмірності простору пошуку.

У мобільній робототехніці з допомогою використання ШНМ вирішують завдання проходження певної траєкторії [2], уникнення перешкод, а також завдання навігації [3].

Залежно від кількості внутрішніх шарів і характеру зв'язків виділяють кілька типів нейронних мереж: мережі прямого поширення (перцептрони), рекурентні нейронні мережі (мережі Хопфілда) та інші.

В результаті проведеного аналізу ШНМ для реалізації інтелектуальної системи управління руху робототехнічної платформи, а саме мобільного робота, доцільно використовувати нейронна мережу Хопфілда, оскільки це повнозв'язна нейронна мережа із симетричною матрицею зв'язків. В процесі роботи динаміка таких мереж сходиться до одного з положень рівноваги. Ці положення рівноваги визначаються заздалегідь в процесі навчання, вони є локальними мінімумами функціонала, званого енергією мережі (в найпростішому випадку – локальними мінімумами негативно певної квадратичної форми на n -вимірному кубі). Така мережа може бути використана як автоасоціативна пам'ять, як фільтр, а також для вирішення деяких завдань оптимізації. На відміну від багатьох нейронних мереж, що працюють до отримання відповіді через певну кількість тактів, мережі Хопфілда працюють до досягнення рівноваги, коли наступний стан мережі в точності дорівнює попередньому: початковий стан є вхідним чином, а при рівновазі отримують вихідний образ

Висновок. Проаналізувавши вищезгадані рекурентні нейронні мережі, можна зробити висновок, що для реалізації інтелектуальної системи управління мобільного робота, будемо використовувати мережу Хопфілда, яка на відміну від інших ШНМ відповідає не тільки за обробку сенсорних даних, локалізації, а й за обхід перешкод.

Список літератури

- 1.Лашов В.С., Носков В.П., Рубцов И.В. Опыт создания автономных мобильных робототехнических комплексов специального назначения. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, спец. вып. «Специальная робототехника и мехатроника». 2012. С. 7–23.
- 2.Fierro R., Lewis F.L. Control of a nonholonomic mobile robot using neural networks. IEEE Trans. On. Neural Netw. 1998. Т. 9. № 4. Р. 589–600.
- 3.Dierks T., Brenner B., Jagannathan S. Neural network-based optimal control of mobile robot formations with reduced information exchange. IEEE Trans. Control Syst. Technol. 2013. Т. 21. № 4. Р. 1407–1415.