

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний економічний університет

На правах рукопису

Порплиця Наталія Петрівна

УДК 519.24

**Ідентифікація інтервальних моделей об'єктів з
розподіленими параметрами на основі поведінкових
моделей бджолоїної колонії**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук

Науковий керівник:
Дивак Микола Петрович,
доктор технічних наук,
професор

Тернопіль – 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА У ВИГЛЯДІ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО ТА МЕТОДИ ЇЇ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ.....	14
1.1 Особливості задач математичного моделювання об'єктів з розподіленими параметрами в умовах невизначеності.....	15
1.2 Задача структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді різницевого оператора за умов забезпечення точності моделі в межах точності експериментальних даних та методи її розв'язування..	23
1.3 Огляд та аналіз алгоритмів ройового інтелекту.....	38
1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження.....	42
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	45
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПІДСТАВИ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ У ВИГЛЯДІ РІЗНИЦЕВИХ ОПЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКОВИХ МОДЕЛЕЙ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ.....	46
2.1 Поведінкова модель бджолоїної колонії та її біологічне підґрунтя.....	46
2.2 Теоретичні основи побудови методу структурної ідентифікації ІРО на основі поєднання принципів ройового інтелекту та аналізу інтервальних даних.....	59
2.3 Розширення простору пошуку оптимальних структур у задачі структурної ідентифікації математичних моделей.....	70
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	78
РОЗДІЛ 3.МЕТОД ТА АЛГОРИТМ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО ОПЕРАТОРА НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКОВИХ МОДЕЛЕЙ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ.....	79

3.1	Метод структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.....	79
3.2	Приклад застосування методу структурної ідентифікації інтервальних моделей на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії для моделювання процесу розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії сушіння.....	90
3.3	Порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолоїного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора	100
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	107
	РОЗДІЛ 4. ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДУ ТА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ У ВИГЛЯДІ ІРО ДЛЯ ЗАДАЧІ ВИЯВЛЕННЯ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА.....	108
4.1	Опис об'єктної моделі та алгоритмічної реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів.....	108
4.2	Особливості проведення хірургічної операції на щитоподібній залозі пацієнта.....	117
4.3	Ідентифікація моделі у вигляді інтервального різницевого оператора для прогнозування розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу.....	119
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	126
	ВИСНОВКИ.....	127
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
	ДОДАТКИ.....	145

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ПЗ	програмне забезпечення
ІСНАР	інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь
МГУА	метод групового урахування аргументів
РО	різницевий оператор
ІРО	інтервальний різницевий оператор
АБК	алгоритм бджолоїної колонії
ГА	генетичний алгоритм
ПМБК	поведінкова модель бджолоїної колонії

ВСТУП

Актуальність теми. У теорії систем задачі моделювання об'єктів з розподіленими параметрами є одними з найскладніших, оскільки, крім моделювання часових змін, необхідно одночасно моделювати просторовий розподіл їх характеристик. До зазначеного класу відносять задачі моделювання процесу сушіння гіпсокартону під час виробництва та моделювання електрофізіологічних характеристик тканин на хірургічній рані. Для них спільною є необхідність синтезу математичної моделі при її невідомій структурі та параметрах. Переважно для побудови таких моделей використовують дедуктивний підхід, коли з огляду на фізичні міркування визначають загальний вигляд диференціального рівняння, потім його дискретизують і розв'язують. Однак такий підхід вимагає детального вивчення фізики процесу, визначення коефіцієнтів дифузії чи тепло- та масоперенесення, що суттєво ускладнює задачу математичного моделювання.

Водночас, застосовуючи індуктивний підхід, задачу структурної ідентифікації математичної моделі розв'язують на основі аналізу експериментальних даних. У цьому випадку математичні моделі синтезують у вигляді різницевих операторів, які є дискретними аналогами диференціальних рівнянь у частинних похідних. Зазвичай експериментальні дані отримують за допомогою вимірювальних пристроїв, які характеризуються похибками вимірювань. Тому для врахування невизначеності в експериментальних даних доцільно використовувати методи інтервального аналізу даних. У межах індуктивного підходу існують такі відомі методи: групового урахування аргументів (МГУА), редукції, на основі генетичних алгоритмів та ін. Найбільш вагомими результатами при дослідженні цієї проблематики на основі індуктивного підходу отримали наукові школи таких зарубіжних та українських учених: Akaike H., Ljung L., Haber R., Дивак М. П., Івахненко О. Г., Степашко В. С.

Однак одні з цих методів характеризується високою обчислювальною складністю пошуку математичної моделі, яка зазвичай не є оптимальною, тобто переускладнена, а інші, зокрема МГУА, не забезпечує заданої точності моделювання в межах похибок експериментальних даних.

Останнім часом для розв'язування задач дискретної оптимізації застосовують методи та алгоритми, які ґрунтуються на основі децентралізації та самоорганізації мультиагентних систем, наприклад, алгоритми бджолоїної колонії. Результати аналізу показали, що вони можуть бути застосовані для розв'язування задачі структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами. Це забезпечить можливість уникнення локальних екстремумів складних функцій мети та зменшення кількості ітерацій для пошуку глобального екстремуму і, як наслідок, знаходження моделей простої структури із гарантованими прогностичними властивостями.

Отже, актуальною є науково-прикладна задача створення методів структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів на основі поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії, які б у підсумку забезпечували зниження обчислювальної складності розв'язування задачі структурної ідентифікації та одночасну побудову простих моделей із гарантованими прогностичними властивостями.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.
Дисертаційна робота виконувалася згідно з тематичним планом науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету протягом 2012 – 2015 років. Основні результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання таких тем:

- держбюджетна прикладна розробка на тему «Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотнього гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі» (державний реєстраційний номер

0112U000078), у якій автором побудовано математичну модель розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани в процесі операції на щитоподібній залозі пацієнта у вигляді інтервального різницевого оператора;

- комплексне держбюджетне прикладне дослідження на тему «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (державний реєстраційний номер 0114U000569), у якому автором розроблено метод та програмне забезпечення для структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії;

- госпдоговірна науково-дослідна робота на тему «Розподілена система контролю технологічного процесу виробництва гіпсокартону» (державний реєстраційний номер 0112U003917), у якій автором побудовано математичну модель розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення;

- кафедральна науково-дослідна робота на тему «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (державний реєстраційний номер 0111U010356), у якій автором розроблено математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації методу структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевих операторів.

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

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційного дослідження є зниження обчислювальної складності методів структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО з гарантованими прогностичними властивостями шляхом поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз відомих методів та алгоритмів ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами в умовах невизначеності і сформулювати можливі напрями їх розвитку;

- розробити теоретичну основу для побудови методів структурної ідентифікації моделей із гарантованими прогностичними властивостями у вигляді IPO на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії;

- розробити метод структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів із гарантованими прогностичними властивостями та обчислювальну схему його реалізації для випадку, коли експериментальні дані отримані в інтервальному вигляді;

- провести порівняльний аналіз обчислювальної складності застосування розробленого та відомого методів структурної ідентифікації IPO, останній з який ґрунтується на генетичних алгоритмах;

- розробити програмний комплекс для структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді IPO із застосуванням поведінкових моделей бджолоїної колонії;

- провести апробацію розроблених методу структурної ідентифікації та програмного комплексу для побудови математичних моделей розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону, а також для побудови математичної моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани в процесі операції на щитоподібній залозі пацієнта.

Об'єкт дослідження – процеси макромоделювання об'єктів з розподіленими параметрами.

Предмет дослідження – методи структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді різницевих операторів на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та аналізу інтервальних даних.

Методи дослідження. При розробленні методу та алгоритму структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів було застосовано методи аналізу інтервальних даних та формальні принципи самоорганізації мультиагентних систем. Для дослідження показників оптимальності структур інтервальних різницевих операторів, збіжності та обчислювальної складності методу та алгоритму структурної ідентифікації було використано комп'ютерне моделювання. Розв'язування інтервальних систем нелінійних алгебричних рівнянь здійснювали методами математичного програмування. Для проектування програмного комплексу реалізації алгоритмів структурної ідентифікації використано об'єктно-орієнтований підхід, а для його створення – мову C# та .NET технологію.

Наукова новизна одержаних результатів. У межах дисертаційної роботи *вперше*:

- у теорії ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами запропоновано та обґрунтовано поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолої колонії, що забезпечило створення теоретичної основи для зниження обчислювальної складності методів структурної ідентифікації моделей із гарантованими прогностичними властивостями у вигляді інтервальних різницевих операторів;

- створено новий метод структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на поведінкових моделях бджолої колонії, що забезпечує одночасне зниження обчислювальної складності методу та спрощення математичних моделей із гарантованими прогностичними властивостями;

- запропоновано нейроподібну обчислювальну схему реалізації методу структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора, яка, на відміну від існуючих, побудована на основі поведінкових моделей

бджолиної колонії, що забезпечує збіжність реалізації методу структурної ідентифікації.

На основі розроблених методу структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді ІРО та нейроподібної схеми його реалізації *удосконалено*:

- математичні моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення, які, на відміну від існуючих, є простішими і одночасно враховують більший діапазон зміни значень чинників технологічного процесу;

- математичну модель розподілу на площині хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, який є реакцією на подразнення тканин хірургічної рани змінним струмом, що, на відміну від існуючих, потребує меншої кількості вимірювань для ідентифікації і тим самим зменшує затрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розробленого методу структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами створено програмний комплекс, який придатний для побудови математичних моделей складних об'єктів у вигляді ІРО із заданою точністю. Розроблений програмний комплекс реалізовано на мові програмування C# із застосуванням .NET технології.

Математичну модель розподілу на площині хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, який є реакцією на подразнення тканин хірургічної рани змінним струмом, використано в Тернопільській міській комунальній лікарні швидкої допомоги для моніторингу області локалізації зворотного гортанного нерва в реальному масштабі часу.

Розроблені метод структурної ідентифікації, програмний комплекс та математичну модель розподілу вологості на поверхні листів гіпсокартону використано для налаштування чинників технологічного процесу його

виробництва на приватному підприємстві «Українські гіпсокартонні системи», що дозволило зменшити затрати часу для налаштування цього процесу та збільшити продуктивність сушильної камери на 15%.

На підставі проведених у дисертаційній роботі досліджень розроблено методичне забезпечення, яке використовують у навчальному процесі Тернопільського національного економічного університету при викладанні дисциплін «Програмні засоби моделювання динамічних систем», «Технологія .NET» та «Інтервальні обчислення та інтервальний аналіз».

Акти використання результатів дисертаційного дослідження подано в додатках до дисертації.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автором:

[24] – розроблено метод структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолої колонії та аналізу інтервальних даних та нейроподібну обчислювальну схему його реалізації; [114] – запропоновано та обґрунтовано поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолої колонії, що дало можливість створити теоретичну основу методів структурної ідентифікації моделей у вигляді ІРО; [113] – проведено апробацію програмних засобів реалізації методу структурної ідентифікації ІРО для розв’язування задачі побудови моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння; [106] – досліджено обчислювальну складність реалізації методів структурної ідентифікації, що ґрунтуються на генетичних алгоритмах на прикладі побудови моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії сушіння; [22] – побудовано математичну модель розподілу на площині координат хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу; [23] – розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолої

колонії; [21] – проведено апробацію розробленого методу структурної ідентифікації на прикладі побудови моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння; [25] – встановлено основні аналогії функціонування бджолоїної колонії стосовно алгоритму розв’язування задачі структурної ідентифікації IPO; [112] – проведено порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолоїного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей об’єктів з розподіленими параметрами; [110] – розроблено програмний комплекс для структурної ідентифікації математичних моделей об’єктів з розподіленими параметрами у вигляді IPO; [20] – проаналізовано особливості моделювання об’єктів з розподіленими параметрами на основі експериментальних даних представлених в інтервальному вигляді; [108] – досліджено параметри методу структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів та їх вплив на обчислювальну складність його застосування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах:

- на XI та XII Міжнародній науково-технічній конференції “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії: TCSET (Львів – Славсько, 2012, 2014);
- на XII та XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці CADSM (Львів – Поляна, 2013, 2015);
- на 16-й Міжнародній конференції «Обчислювальні проблеми електротехніки» СРЕЕ (Львів, 2015);
- на II, III, IV, V Всеукраїнській школі-семінарі молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” АСІТ (Тернопіль, 2012, 2013, 2014, 2015);
- на Міжнародній школі-семінарі для молодих науковців «Індуктивне

модельовання: теорія і застосування» (с. Жукін Київської обл., 2014, 2015);

- на науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу Тернопільського національного економічного університету (2012-2015);
- на наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2012-2015).

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 14 наукових праць із загальним обсягом 78 сторінок, зокрема 5 статей у фахових виданнях України, 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus [24, 113], 9 публікацій у матеріалах конференцій, 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus [20, 25].

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 138 найменувань та двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 159 сторінок друкарського тексту, з них 125 сторінок основного тексту. Робота містить 30 рисунків і 12 таблиць.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАДАЧІ ІДЕНТИФІКАЦІ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА У ВИГЛЯДІ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО ТА МЕТОДИ ЇЇ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ

У контексті математичного моделювання об'єкти з розподіленими параметрами є одними з найскладніших. Математичні моделі таких об'єктів необхідно будувати, наприклад, для задач моделювання процесу сушіння гіпсокартону під час його виробництва та моделювання електрофізіологічних характеристик тканин хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі. Спільною для вказаного класу задач є необхідність синтезу математичної моделі при невідомих її структурі та параметрах. Для побудови таких моделей застосовують як дедуктивний, так і індуктивний підходи.

Розглянуті в цьому розділі методи розв'язування задач математичного моделювання об'єктів з розподіленими параметрами переважно ґрунтуються на індуктивному підході. У цьому випадку задачу структурної ідентифікації математичної моделі розв'язують на основі аналізу експериментальних даних, які отримують за допомогою вимірювальних пристроїв із певними похибками вимірювання. Такий підхід вимагає використання методів інтервального аналізу даних для побудови математичних моделей. У розділі також проведено аналіз методів структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді різницевого оператора на основі аналізу інтервальних даних.

Зазначені задачі відносять до NP-складних оптимізаційних задач, що зумовлює застосування нетрадиційних методів їх розв'язування. Тому актуальним завданням є аналіз методів та алгоритмів розв'язування цих задач, зокрема алгоритмів ройового інтелекту. У завершальній частині розділу здійснено постановку задач дисертаційного дослідження. Матеріали,

які обґрунтовують постановку задач дисертаційного дослідження, опубліковано автором у працях [20, 106-108, 114].

1.1 Особливості задач математичного моделювання об'єктів з розподіленими параметрами в умовах невизначеності

Математичне моделювання є одним із найбільш результативних методів наукових та інженерних досліджень, який застосовують у різних галузях знань [115, 119]. Водночас найважливішим інструментом математичного моделювання є математична модель об'єкта чи процесу.

Важливо зазначити, що застосування математичних моделей забезпечує можливість отримання інформації про властивості та характеристики реального об'єкта чи процесу без проведення складних та, як правило, високовартісних експериментів [95].

Реальні об'єкти та процеси, а також їх моделі поділяють на два класи: із зосередженими параметрами та розподіленими параметрами. Об'єкти із зосередженими параметрами, звісно, є простішими та характеризуються нижчою точністю [116]. Теорія систем у класичній інтерпретації є орієнтованою на математичні моделі із зосередженими параметрами. Однак, якщо зважати на той факт, що об'єктів із строго зосередженими параметрами в природі не існує, то використання такої математичної моделі є спрощенням об'єкта моделювання, що не завжди є прийнятним через зниження точності моделювання.

У теорії систем задачі моделювання об'єктів з розподіленими параметрами є одними з найскладніших, оскільки, крім моделювання часових змін, необхідно одночасно моделювати просторовий розподіл їх характеристик [116]. Під розподіленими параметрами таких об'єктів розуміють їх характеристики, наприклад: тиск, температуру, густину, вологість, амплітуду [109].

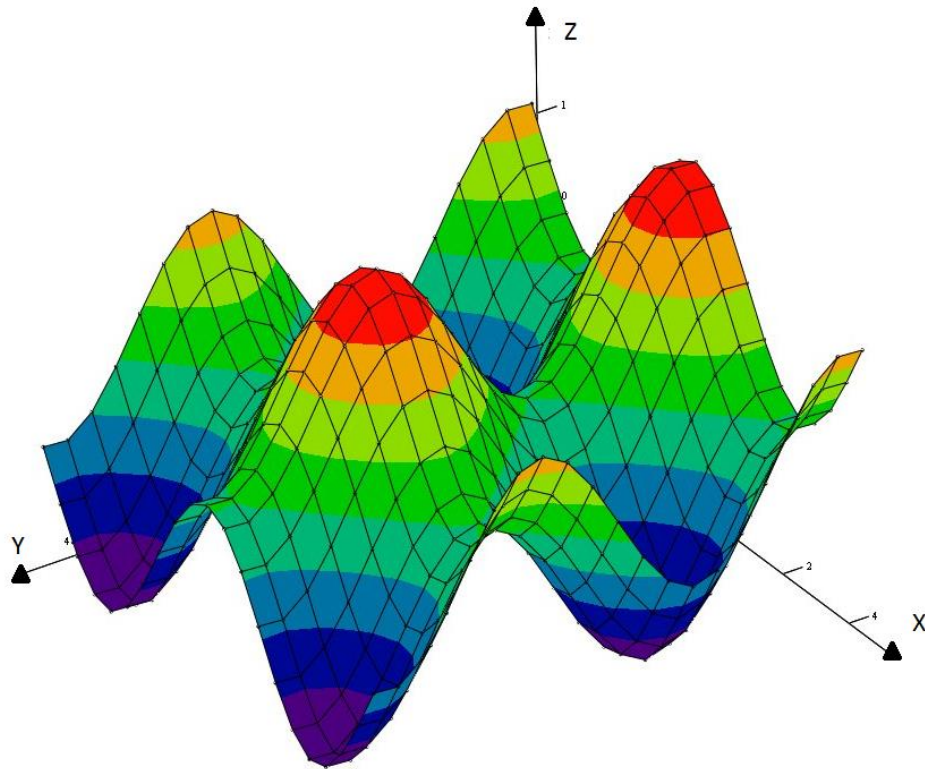


Рис. 1.1. Розподіл параметра (характеристики) реального об'єкта

На рис. 1.1 показано розподіл значень деякого параметра (характеристики) реального об'єкта (вісь z) у точках із дискретними координатами (x, y) . Такий параметр (характеристику) об'єкта називають його розподіленим параметром. Значення цього параметра відрізняється у різних точках об'єкта, тобто розподілені по ньому, як показано на рис. 1.1, за допомогою кольорових градацій. Тоді об'єкт, який характеризується кількома такими параметрами (характеристиками), називають об'єктом з розподіленими параметрами [116]. До зазначеного класу об'єктів та процесів відносять процеси сушіння, наприклад, гіпсокартону під час виготовлення [106], де параметром (характеристикою) є вологість на поверхні листа, та електрофізіологічні властивості тканин хірургічної рани [22], де параметром є провідність тканин при подразненні, наприклад, змінним струмом, яка проявляється у реакції на таке подразнення в деякому інформаційному сигналі у вигляді його амплітуди та ін.

Зауважимо, що математичну модель такого об'єкта чи процесу зазвичай будують як засіб для вирішення певних більш глобальних задач, які виходять

за межі самого об'єкта моделювання. До зазначеного класу задач належать такі: задача забезпечення якості продукції [106] під час виробництва листів гіпсокартону, де основним процесом є контроль розподілу вологості на завершальній стадії його виготовлення, а основою для прийняття рішень є математичні моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону; задача визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання під час операції на щитоподібній залозі пацієнта, де основою для прийняття рішень є математичні моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу [22].

Особливості задачі моделювання розподілу вологості на листі гіпсокартону. Побудова математичної моделі розподілу вологості на листі гіпсокартону забезпечить зменшення кількості бракованої готової продукції, тобто листів гіпсокартону, унаслідок зменшення затрат часу на налаштування чинників технологічного процесу на стадії сушіння [70]. Якість виготовлених листів гіпсокартону залежить від великої кількості чинників: якості гіпсу та компонентів, які надають водно-гіпсовій суміші еластичності та однорідності; параметрів технологічного процесу тощо. Проте аналіз технологічної схеми їх виготовлення показав, що найбільше на якість готового продукту впливає завершальна стадія його виготовлення, тобто процес сушіння листа гіпсокартону в сушильній камері [70]. Адже якщо значення вологості на поверхні листа є нижчим від допустимого, то він втрачає еластичність, в іншому випадку картон може відшаруватися від гіпсового осердя. Однак проведення вимірювання вологості на поверхні кожного листа гіпсокартону на виробництві, по-перше, є високовартісним, а по-друге, вимагає суттєвих затрат часу [70]. Тому доцільно побудувати математичну модель, яка б пов'язувала розподіл вологості на листі гіпсокартону із чинниками технологічного процесу сушіння.

Варто зазначити, що пристрої для вимірювання вологості на поверхні листа гіпсокартону характеризуються високою похибкою. Тому доцільно

подати виміряні значення вологості в інтервальному вигляді [67]:

$$[z_{i,j,k}^-; z_{i,j,k}^+], \quad i = 1, \dots, I, \quad j = 1, \dots, J, \quad (1.1)$$

де $z_{i,j,k}^-; z_{i,j,k}^+$ - нижня та верхня межі інтервалу можливих значень виміряного показника вологості на поверхні листа гіпсокартону у точці з дискретно-заданими координатами $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$ та часовою дискретою $k = 1, \dots, K$.

Межі інтервалу можливих значень виміряної вологості на поверхні листа гіпсокартону визначаємо на основі відносної похибки вимірювального пристрою [60]: $z_{i,j,k}^- = z_{i,j,k} - z_{i,j,k} \cdot \varepsilon$ та $z_{i,j,k}^+ = z_{i,j,k} + z_{i,j,k} \cdot \varepsilon$, де $z_{i,j,k}$ - виміряне значення відносної вологості; ε - відносна похибка вимірювального пристрою.

Особливості задачі визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання під час операції на щитоподібній залозі пацієнта. Розв'язання цієї задачі є актуальним завданням із огляду на зниження ризику для здоров'я пацієнта. Патології щитоподібної залози зустрічаються у 8-18% дорослого населення планети [5]. Крім того, в ендокринній патології хвороби щитоподібної залози посідають друге місце за поширеністю [5] та доволі часто вимагають оперативного втручання. Під час проведення хірургічної операції на щитоподібній залозі постає проблема визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання [85]. У кожного пацієнта розташування зворотного гортанного нерва характеризується індивідуальними анатомічними особливостями. Пошкодження зворотного гортанного нерва може призвести до порушення звуковимови, дихальних розладів у пацієнта та навіть втрати голосу [5]. Для візуалізації зворотного гортанного нерва тканини хірургічної рани пацієнта подразнюють змінним струмом за допомогою спеціального пристрою, внаслідок чого отримують інформаційний сигнал [85]. Інформативним параметром цього сигналу є його

максимальна амплітуда у точках подразнення. У цьому випадку об'єктом моделювання є електрофізіологічні властивості тканин хірургічної рани, а одним із параметрів об'єкта є максимальна амплітуда інформаційного сигналу на площині поверхні хірургічної рани [85]. Водночас доцільно враховувати похибку вимірювального пристрою та подавати виміряні значення максимальної амплітуди інформаційного сигналу в інтервальному вигляді. Зважаючи на необхідність визначення місцезнаходження зворотного гортанного нерва на хірургічній рані, доцільно побудувати таку математичну модель розподілу максимальної амплітуди, яка б відображала оцінку максимальної амплітуди інформаційного сигналу залежно від розташування точки подразнення на хірургічній рані, якщо експериментальні дані представлено в інтервальному вигляді.

Незважаючи на абсолютну відмінність природи розглянутих задач, вони мають одну спільну рису: в обох випадках необхідно побудувати модель об'єкта з розподіленими параметрами. У першому випадку це слід зробити для аналізу вологості на поверхні листа гіпсокартону, а в другому – для оцінювання електрофізіологічних властивостей тканин хірургічної рани з метою виявлення зворотного гортанного нерва.

Для побудови математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами існує два основних підходи: дедуктивний та індуктивний.

У межах дедуктивного підходу [84] математичні моделі зазначеного класу об'єктів будують на основі фундаментальних законів з огляду на фізичні міркування. Водночас модельований об'єкт чи процес описують крайовими задачами у вигляді диференціальних чи інтегрально-диференціальних рівнянь у частинних похідних або ж нескінченними системами звичайних диференціальних рівнянь [109].

Таким чином, об'єкт з розподіленими параметрами можна описати системою диференціальних рівнянь у такому загальному вигляді [109]:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \tau} = L_i \left(T_i; \frac{\partial T_i}{\partial x}; \dots; \frac{\partial^{n_1} T_i}{\partial x^{n_1}}; \frac{\partial T_i}{\partial y}; \dots; \frac{\partial^{n_2} T_i}{\partial y^{n_2}}; \frac{\partial T_i}{\partial z}; \dots; \frac{\partial^{n_3} T_i}{\partial z^{n_3}} \right), \quad (1.2)$$

$$x, y, z \in V, \quad i = 1 \dots n,$$

де $T_i(x, y, z, \tau)$ – фазові змінні $i = 1 \dots n$; x, y, z – просторові координати; τ – момент часу; V – простір зміни змінних x, y, z ; n, n_1, n_2, n_3 – задані цілі числа; L_i – лінійні чи нелінійні оператори.

Тоді граничні умови для системи рівнянь вважають однорідними і задають у такому загальному вигляді [109]:

$$\begin{aligned} L_{d,i}[T_i(x, y, z, \tau), T_{i+1}(x, y, z, \tau)] &= 0, \quad x, y, z \in D_{1,i}, \quad i = 1 \dots n-1, \\ \tilde{L}_{d,j}[T_i(x, y, z, \tau)] &= 0, \quad x, y, z \in D_{2,j}, \quad j = 1 \dots \tilde{n}, \\ \tilde{\tilde{L}}_{d,\mu}[T_\mu(x, y, \bar{z}_\mu, \tau) \cdot U_\mu(x, y, \tau)] &= 0, \quad x, y \in D_{3,\mu}, \quad \mu = 1 \dots m, \end{aligned} \quad (1.3)$$

де $L_{d,i}, \tilde{L}_{d,j}, \tilde{\tilde{L}}_{d,\mu}$, ($i = 1 \dots n-1$; $j = 1 \dots \tilde{n}$; $\mu = 1 \dots m$) – лінійні чи нелінійні оператори; $L_{1,i}, L_{2,j}, L_{3,\mu}$, ($i = 1 \dots n-1$; $j = 1 \dots \tilde{n}$; $\mu = 1 \dots m$) – граничні підобласті простору V ; \tilde{n}, m – задані числа; \bar{z}_μ , ($\mu = 1 \dots m$) – фіксовані значення координати z ; $U_\mu(x, y, \tau)$, ($\mu = 1 \dots m$) – вхідні впливи.

Водночас значеннями вихідних характеристик об'єкта є значення фазових змінних $T_i(x, y, \bar{z}_i, \tau)$ при фіксованих значеннях $z = \bar{z}_i$, $i = 1 \dots n$.

Варто зазначити, що структура моделі об'єкта у формі (1.2) містить деякі коефіцієнти дифузії, тепло- та масоперенесення тощо, які за умов неоднорідного середовища в більшості випадків неможливо визначити [116]. Крім того, застосування такого підходу вимагає детального вивчення фізичної природи різних процесів та явищ, якими характеризується модельований об'єкт, а в певних випадках і взагалі не є прийнятним

унаслідок того, що деякі елементи структури моделі, з математичної точки зору, не завжди можна адекватно трактувати. Водночас це призводить до суттєвого ускладнення математичної моделі, що підвищує обчислювальну складність її застосування.

Наприклад, при спробі застосування дедуктивного підходу для розв'язування задачі забезпечення якості продукції при виробництві листів гіпсокартону, враховуючи їх неоднорідність, загальний вигляд математичної моделі буде надзвичайно складним. Адже таке диференціальне рівняння повинно враховувати просторовий розподіл коефіцієнтів дифузії, які на практиці отримати для усієї партії листів гіпсокартону не можливо. До того ж це диференціальне рівняння ще необхідно розв'язати, як правило, використовуючи для цього його дискретний аналог.

Якщо взяти до уваги описані недоліки дедуктивного підходу, то для зазначених задач доцільно побудувати математичні моделі у вигляді «чорної скриньки», які описують зв'язок між вхідними та вихідними змінними, не розкриваючи внутрішньої суті реального об'єкта чи процесу [76]. Для синтезу таких моделей застосовують методи індуктивного моделювання.

Найбільш вагомі результати для розвитку методів побудови математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами в межах індуктивного підходу отримали наукові школи таких зарубіжних та українських вчених, як Akaike H., Ljung L., Haber R., Дивак М. П., Івахненко О. Г., Степашко В. С..

У цьому випадку математичну модель реального об'єкта синтезують у вигляді різницевого оператора (схеми) [77]. Варто зазначити, що різницевий оператор є дискретним аналогом диференціальних рівнянь у частинних похідних. Загальний вигляд різницевого оператора синтезують на основі даних спостережень, отриманих у процесі експерименту в умовах невизначеності [41, 79]. Такий підхід описано в працях українського вченого О. Г. Івахненка [74-79]. Застосування індуктивних методів забезпечує

зниження часових затрат на синтез математичних моделей та їх спрощення через автоматизацію процесу синтезу. У загальному випадку різницевий оператор представляють у вигляді [79]:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T (v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (1.4)$$

$$j = 1, \dots, J, h = 1, \dots, H, k = 1, \dots, K,$$

де $\vec{f}^T(\bullet)$ – базисні функції (функціональні перетворення); символ (\bullet) означає набір аргументів у виразі (1.4); $v_{i,j,h,k}$ – модельована характеристика у точці з дискретно-заданими просторовими координатами $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, $h = 1, \dots, H$ та на часовій дискреті $k = 1, \dots, K$; $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ – вектори вхідних змінних у точках з дискретно-заданими просторовими координатами $i = 1, \dots, I$, $j = 1, \dots, J$, $h = 1, \dots, H$ та на часовій дискреті $k = 0, \dots, K$; \vec{g} – вектор параметрів різницевого оператора.

Для побудови математичної моделі у вигляді різницевого оператора (1.4) потрібно визначити її загальний вигляд, тобто структуру моделі (у задачі структурної ідентифікації), після цього слід провести процедуру налаштування її параметрів (у задачі параметричної ідентифікації) [41]. Важливо зазначити, що задача параметричної ідентифікації математичної моделі є етапом задачі структурної ідентифікації.

Розв'язавши задачу структурної ідентифікації, визначають загальний вигляд різницевого оператора: вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$; вектор параметрів різницевого оператора \vec{g} ; набори векторів вхідних змінних (управління) $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$; порядок різницевого оператора. Варто зазначити, що етап визначення компонентів вектора параметрів \vec{g} та задавання для їх пошуку початкових умов, тобто значень елементів із набору

$v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ для певних (початкових) дискрет, називають задачею параметричної ідентифікації [41].

Складність побудови математичної моделі у вигляді різницевого оператора (1.4) полягає в тому, що його параметри не мають фізичного змісту [61]. Тому в процесі ідентифікації математичної моделі вони можуть приймати будь-які апріорі не відомі значення. Крім того, сама задача структурної ідентифікації належить до класу NP-складних.

Отже, задача структурної ідентифікації різницевого оператора є актуальною та ускладнюється у випадку, коли дані експерименту представлено в інтервальному вигляді (1.1) [67]. Задача структурної ідентифікації різницевого оператора зводиться до багаторазового розв'язання задачі параметричної ідентифікації, що робить першу надзвичайно складною та вимагає застосування для її розв'язання як методів стохастичного пошуку, так і принципів теорії самоорганізації [77].

1.2 Задача структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді різницевого оператора за умов забезпечення точності моделі в межах точності експериментальних даних та методи її розв'язування

Розглянемо задачу структурної ідентифікації різницевого оператора (РО) у такому загальному вигляді [67]:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T(v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, \dots, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-d,j-d,h-d,k-d}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \quad i = d, \dots, I, \quad j = d, \dots, J, \quad h = d, \dots, H, \quad k = d, \dots, K, \quad (1.5)$$

де $\vec{f}^T(\bullet)$ - вектор невідомих базисних функцій (структурних елементів), який визначає структуру різницевого оператора; символ (\bullet) означає набір базисних функцій у виразі (1.5); $v_{i,j,h,k}$ - модельована характеристика у точці

з дискретно-заданими просторовими координатами $i = d, \dots, I$, $j = d, \dots, J$, $h = d, \dots, H$ та на часовій дискреті $k = d, \dots, K$; $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ - вектори вхідних змінних (управлінь); d - порядок РО (1.5); \vec{g} - вектор невідомих параметрів РО.

Слід зазначити, що загальний вигляд РО (1.5) отримуємо на основі аналізу експериментальних даних, які подано в інтервальному вигляді та отримано для обмеженої кількості часових дискрет за умов різних значень чинників впливу [67]. Вектор оцінок \hat{g} параметрів \vec{g} та вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$ у різницевому операторі (1.5) отримуємо за умов забезпечення точності математичної моделі в межах похибок вимірювання модельованої характеристики [67]:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] \in [z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+], \quad i = d, \dots, I, \quad j = d, \dots, J, \quad h = d, \dots, H, \quad k = d, \dots, K, \quad (1.6)$$

де $[z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+]$ - інтервал можливих значень модельованої характеристики в точці з дискретними координатами i, j, h в k -тий момент часу, ширину якого визначаємо на основі похибок вимірювання модельованої характеристики.

У виразі (1.6) $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$ означає інтервальні оцінки прогнозованої характеристики, які обчислюємо на основі такого РО:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] = [\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{g}, \quad i = d, \dots, I, \quad j = d, \dots, J, \quad h = d, \dots, H, \quad k = d, \dots, K. \quad (1.7)$$

Узявши до уваги те, що всі обчислення в різницевому операторі (1.7) необхідно проводити із застосуванням правил інтервальної арифметики, РО (1.7) називаємо інтервальним різницевим оператором (IPO) [67].

Складність задачі налаштування ІРО (1.7) полягає в тому, що не відомими є не лише параметри, а і його структура [59, 65].

Варто зазначити, що параметрична ідентифікація в цьому випадку є етапом структурної ідентифікації. Як відомо, у випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає в знаходженні оцінок параметрів ІРО шляхом розв'язування інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [62] для деякого відомого вектора базисних функцій (структурних елементів ІРО):

$$\left\{ \begin{array}{l} [\widehat{v}_{0,0,0,0}^-; \widehat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}^-; \widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}^+] \subseteq [z_{i-d,j-d,h-d,k-d}^-; z_{i-d,j-d,h-d,k-d}^+]; \\ [\widehat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}^-] = \vec{f}^T([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,0,h-1,0}], [\widehat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{k-1}) \cdot \widehat{g}; \\ z_{i,j,h,k}^- \leq \vec{f}^T([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,0,h-1,0}], [\widehat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \widehat{g} \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, d = 2, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K. \end{array} \right. \quad (1.8)$$

ІСНАР (1.8) отримуємо, підставляючи інтервальні оцінки вихідної характеристики $[\widehat{v}_{i,j,h,k}^-; \widehat{v}_{i,j,h,k}^+]$ (задані у вигляді початкових умов та прогнозовані на основі виразу (1.7) у решті вузлів сітки) в умови (1.6).

Для розв'язання ІСНАР (1.8) використовуємо метод параметричної ідентифікації на основі процедур випадкового пошуку, запропонований у праці [71]. Застосування цього методу передбачає, замість розв'язування ІСНАР (1.8), пошук деякого наближення до її розв'язку, яке задає якість поточної структури ІРО [71].

Скористаємося рядом позначень, що необхідні для розкриття суті формальної постановки задачі, які наведені у праці [114].

Позначимо за λ_s поточну структуру ІРО:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\}, \quad (1.9)$$

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 IPO.

Далі введемо наступні умовні позначення: $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ – кількість елементів у поточній структурі λ_s ; F – множина усіх структурних елементів, $F = \{f_1(\bullet); \dots; f_l(\bullet); \dots; f_L(\bullet)\}$ де $|F| = L$ (потужність множини F); $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots; g_{m_s}^s\}$ – вектор невідомих значень параметрів [114].

Задача структурної ідентифікації полягає в пошуку структури λ_0 IPO у вигляді (1.9), щоб для сформованого на її основі інтервального різницевого оператора [114]:

$$[v_{i,j,h,k}(\lambda_0)] = [f_1^0(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^0 + [f_2^0(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_0}^0, \quad (1.10)$$

виконувалися умови (1.6), тобто було забезпечено належність інтервальних оцінок прогнозованого значення модельованої характеристики до інтервалів допустимих значень модельованої характеристики на множині усіх дискрет.

Якість поточної структури IPO оцінюємо на основі значення показника $\delta(\lambda_s)$, який кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (1.6) [68]. У подальшому $\delta(\lambda_s)$ будемо називати функцією мети оптимізаційної задачі структурної ідентифікації математичної моделі із гарантованими прогностичними властивостями.

Значення показника якості $\delta(\lambda_s)$, для поточної структури IPO λ_s , обчислюємо за допомогою виразів, отриманих у праці [62] на основі модифікації ІСНАР:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{i=d,\dots,I, j=d,\dots,J, h=d,\dots,H, k=d,\dots,K} \left\{ \left| \text{mid}(\vec{f}_s^T([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,0,h-1,0}], [\widehat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \widehat{g}^s) - \text{mid}([z_{i,j,h,k}]) \right| \right\}, \quad (1.11)$$

якщо $[\widehat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \emptyset \quad \exists i = d, \dots, I, \quad \exists j = d, \dots, J, \quad \exists h = d, \dots, H,$

$\exists k = d, \dots, K;$

$$\begin{aligned}
\delta(\lambda_s) = & \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \{ \text{wid}(\vec{f}^{Ts}([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,0,h-1,0}], [\widehat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, \\
& [\widehat{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \widehat{g}^s) \\
& - \text{wid}((\vec{f}^{Ts}([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,0,h-1,0}], [\widehat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, \\
& [\widehat{v}_{1,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \widehat{g}^s) \cap [z_{i,j,h,k}]) \}, \\
& \text{якщо } [\widehat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \emptyset \quad \forall i=1, \dots, I, \quad \forall j=1, \dots, J, \quad \forall h=1, \dots, H, \\
& \quad \forall k=1, \dots, K;
\end{aligned} \tag{1.12}$$

де $\text{mid}(\bullet), \text{wid}(\bullet)$ - операції визначення центру та ширини інтервалів відповідно.

Вираз (1.11) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, а вираз (1.12) у випадку $\delta(\lambda_s)=0$ забезпечує виконання умов (1.6).

Задачу структурної ідентифікації ІРО запишемо формально у вигляді задачі знаходження мінімуму функції мети $\delta(\lambda_s)$ [114]:

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\widehat{g}^s, \vec{f}_s(\bullet)} \min, \quad m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \quad \vec{f}_s(\bullet) \in F. \tag{1.13}$$

Із виразів (1.11) та (1.12) бачимо, що для обчисленого значення функції мети $\delta(\lambda_s)$ для структури ІРО λ_s , за будь-яких умов буде виконуватися нерівність $\delta(\lambda_s) \geq 0$. Отже, функція мети $\delta(\lambda_s)$ має глобальний мінімум лише у тих точках, для яких виконується рівність $\delta(\lambda_s) = 0$. Теорія множинності моделей [74] дає можливість стверджувати, що у просторі пошуку розв'язків задачі структурної ідентифікації ІРО функція $\delta(\lambda_s)$ має багато глобальних мінімумів.

Чим менше значення $\delta(\lambda_s)$, тим «краща» поточна структура ІРО. Якщо $\delta(\lambda_s) = 0$, то поточна структура ІРО дає можливість побудувати адекватну

модель, для якої інтервальні оцінки прогнозованої характеристики належать до інтервалів можливих значень модельованої характеристики.

Як уже зазначалося, задача структурної ідентифікації різницевого оператора зводиться до багаторазового розв'язання задачі параметричної ідентифікації, коли необхідно розв'язувати ІСНАР (1.8). Тому актуальною є необхідність розробки методів структурної ідентифікації, які б забезпечували зменшення кількості ітерацій методу для пошуку адекватної структури математичної моделі, а відповідно їй зменшували б необхідну кількість розв'язувань задачі параметричної ідентифікації.

Методам структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами присвячено велику кількість праць. Серед найефективніших із них слід відзначити методи нарощування чи редукції структури математичної моделі, групового урахування аргументів, а також методи, які ґрунтуються на генетичних алгоритмах з модифікованими операторами схрещування та селекції.

Метод редукції структури математичної моделі. Метод редукції для синтезу математичної моделі передбачає задання початкової структури математичної моделі і послідовне вилучення незначущих елементів цієї моделі [67]. Зауважимо, що загальний вигляд математичної моделі визначають на основі аналізу експериментальних даних з огляду на фізичні міркування. Далі досліджують можливості спрощення цієї математичної моделі, тобто вилучення з неї окремих структурних елементів [103]. Для виявлення незначущих структурних елементів математичної моделі використовують деякі критерії [67]. Під незначущими структурними елементами моделі розуміємо такі, вилучення яких, призведе до зменшення значення функції мети (1.13).

Наприклад, якщо задано таку початкову модель об'єкта з розподіленими параметрами у вигляді різницевого оператора:

$$v_{i,j,h,k} = g_1 \cdot v_{i,j-1,h,k} + g_2 \cdot v_{i-1,j,h-1,k} + g_3 \cdot v_{i-1,j-1,h-1,k}^2 + g_4 \cdot v_{i,j,h-1,k}, \quad (1.14)$$

яка містить чотири параметри g_1, g_2, g_3, g_4 , тоді за допомогою певного критерію визначають незначущі структурні елементи моделі (наприклад, для моделі (1.15) незначущим може бути структурний елементи $v_{i,j-1,h,k}$). Далі виявлені незначущі структурні елементи вилучають та проводять процедуру параметричної ідентифікації спрощеної моделі:

$$v_{i,j,h,k} = g_2 \cdot v_{i-1,j,h-1,k} + g_3 \cdot v_{i-1,j-1,h-1,k}^2 + g_4 \cdot v_{i,j,h-1,k}. \quad (1.15)$$

Для виявлення незначущих параметрів математичної моделі спочатку проводять незначне збурення математичної моделі, потім проводять етап параметричної ідентифікації та використовують деякий критерій виявлення незначущих параметрів, наприклад, обчислюють модулі їх відносних відхилень та за їх значеннями визначають незначущі параметри [103]. Як правило, незначущі параметри характеризуються значно більшими значеннями відносних відхилень. Процедуру редукції повторюють, поки не буде забезпечено певний критерій адекватності математичної моделі. У випадку редукції математичної моделі з гарантованими прогностичними властивостями адекватною вважають таку модель для якої ІСНАР (1.8) сумісна.

Однак метод редукції має ряд недоліків. По-перше, невідомі порядок та степінь різницевого оператора, які необхідно визначити для формування початкової структури математичної моделі. З одного боку, це може призвести до неможливості знаходження розв'язку задачі структурної ідентифікації, а з іншого – до суттєвого збільшення обчислювальної складності застосування методу редукції. По-друге, при вилученні структурних елементів математичної моделі не враховують їх взаємодію з

іншими компонентами моделі [67]. Це може призвести до втрати значущих структурних елементів оптимальної математичної моделі.

Метод «нарощування» структури математичної моделі. Метод послідовного включення чи «нарощування» структури математичної моделі передбачає формування початкової структури математичної моделі в простому вигляді [67]. Тобто, як правило, таку початкову структуру математичної моделі задають у вигляді різницевого оператора першого порядку, який містить структурні елементи не вищі від другого степеня.

Далі здійснюють ускладнення структури математичної моделі шляхом додавання нових структурних елементів та проводять процедуру параметричної ідентифікації. Таке ускладнення структури математичної моделі проводять, поки не буде забезпечено критерій верифікації моделі, що у випадку синтезу математичної моделі з гарантованими прогностичними властивостями означає забезпечення сумісності ІСНАР (1.8).

Застосування такого підходу може призвести до переускладнення структури математичної моделі через неможливість виявлення важливих структурних елементів математичної моделі [67]. Крім того, метод «нарощування» характеризується високою обчислювальною складністю.

Метод групового урахування аргументів. Автором цього методу є видатний український вчений О. Г. Івахненко [79]. МГУА є індуктивним методом, де математичну модель шукають на основі експериментальних даних, отриманих в умовах неповноти інформації. Він є одним із найбільш ефективних методів структурно-параметричної ідентифікації математичних моделей складних об'єктів чи процесів та ґрунтується на постулаті: чим менш точні дані, тим простішою має бути математична модель [79]. В основу МГУА покладено проведення багаторядної селекції моделей-претендентів за допомогою зовнішніх критеріїв та налаштування їх параметрів на основі внутрішніх критеріїв.

Тоді в загальному випадку задача ідентифікації математичної моделі полягає у формуванні на основі експериментальних даних множини моделей-претендентів різної структури в такому загальному вигляді [77]:

$$\widehat{v}_f = f(v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, u_{0,0}, \dots, u_{i,k}, \widehat{g}_f). \quad (1.16)$$

Як уже зазначалося, оцінювання «якості» моделей-претендентів у МГУА здійснюють на основі зовнішніх критеріїв. Для застосування зовнішніх критеріїв вибірку результатів спостережень ділять на дві (наприклад, 50% та 50%) чи більше частин (наприклад, 40%, 40% та 20%): початкову вибірку (на її основі шукають параметри моделі) та контрольну (на її основі здійснюють вибір «кращої» моделі-претендента) [119].

На першій ітерації методу формують початкову множину моделей-претендентів. Далі проводять процедуру параметричної ідентифікації (наприклад, за допомогою методу найменших квадратів) для кожної моделі-претендента на основі початкової вибірки експериментальних даних [79].

Після проведення процедури параметричної ідентифікації множини моделей-претендентів проводиться селекція кращих із них у кількості p із застосуванням зовнішнього критерію. Це означає, що всі моделі-претенденти поточного ряду селекції перевіряють за умовою мінімізації певного критерію «якості» моделі на контрольній вибірці експериментальних даних [79]:

$$f^* = \arg \min_{f \in \zeta} C(v; f(v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, u_{0,0}, \dots, u_{i,k}, \widehat{g}_f)), \quad (1.17)$$

де C – критерій для оцінювання якості отриманого розв'язку задачі параметричної ідентифікації кожної моделі-претендента $f \in \zeta$, яку генерують у процесі розв'язування задачі структурної ідентифікації.

Зовнішній критерій обирають залежно від специфіки розв'язуваної задачі (критерій регулярності, критерій мінімального зміщення, комбінований критерій тощо). Наприклад, за критерієм регулярності якість поточної моделі-претендента визначають як середньоквадратичне відхилення цієї моделі на контрольній вибірці [119]:

$$\Delta^2(B) = \frac{\sum_{i,j,h,k \in N_B} (\hat{v}_{i,j,h,k} - v_{i,j,h,k})^2}{\sum_{i,j,h,k \in N_B} v_{i,j,h,k}^2} \longrightarrow \min. \quad (1.18)$$

Величина p здебільшого є однаковою на усіх рядах селекції та визначає свободу вибору і зазвичай задається дослідником у межах 40%-60% від кількості моделей-претендентів у початковій популяції.

Далі проводять схрещування відібраних «кращих» моделей-претендентів на основі алгоритмів автоматичного формування структур моделей МГУА. Усі ці алгоритми реалізують схему масової селекції: послідовно формують моделі-претенденти не нижчої складності, ніж на попередньому ряді селекції [77].

Отже, за допомогою обраного алгоритму автоматичного формування структур моделей МГУА генерують «нові» моделі-претенденти наступного ряду селекції (k) на основі відібраних моделей-претендентів, отриманих на попередньому ряді селекції ($k - 1$) [79]. Далі знову проводять селекцію та схрещування, поки не буде виконаний критерій зупинки.

Не існує єдиного загального критерію завершення процедури структурної ідентифікації. Цим критерієм завершення може бути обрано один із наступних, що формулюються таким чином: середнє значення похибки прогнозування наступного ряду селекції більше за значення похибки на попередньому ряді; мінімальне значення похибки прогнозування наступного ряду селекції більше від мінімального значення похибки попереднього ряду тощо.

Однак МГУА не забезпечує побудову моделей із гарантованими прогностичними властивостями, оскільки він ґрунтується на таких зовнішніх критеріях, як, наприклад, критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними, які є не придатними у випадку, коли експериментальні дані подано в інтервальному вигляді.

У випадку ж ідентифікації моделі з гарантованими прогностичними властивостями одночасне застосування принципів МГУА та критерію верифікації інтервальної моделі (1.6), призведе до необхідності багаторазового розв'язування задачі параметричної ідентифікації, коли потрібно розв'язувати ІСНАР (1.8). Тому метод структурної ідентифікації побудований на основі такого підходу характеризуватиметься високою обчислювальною складністю.

Таким чином, доцільно провести дослідження в напрямі зниження обчислювальної складності методів структурної ідентифікації моделей з гарантованими прогностичними властивостями. Водночас варто реалізувати такі основні процедури МГУА, як автоматичне генерування варіантів структур-претендентів та їх селекцію, таким чином, щоб забезпечити можливість побудови моделей із гарантованими прогностичними оцінками. Звісно, застосування цього підходу не дозволить знайти оптимальну модель, а лише субоптимальну, однак це суттєво знизить обчислювальну складність.

Особливості структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді ІРО із застосуванням генетичних алгоритмів із модифікованими операторами селекції та схрещування. У працях [41, 107, 108] розглянуто метод структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО на основі генетичних алгоритмів із модифікованими операторами селекції та схрещування за принципами розіграшу «лотереї». Генетичні алгоритми - це адаптивні методи пошуку для розв'язання оптимізаційних задач, які моделюють генетичні процеси біологічних організмів [127]. Варто зазначити, що ці алгоритми активно

застосовують такі основні процедури, як схрещування, селекцію та мутацію [45].

Авторами праць [41] уведено наступні позначення: ген – структурний елемент (базисна функція); хромосома – поточна структура IPO; популяція – множина структур IPO на поточній ітерації генетичного алгоритму.

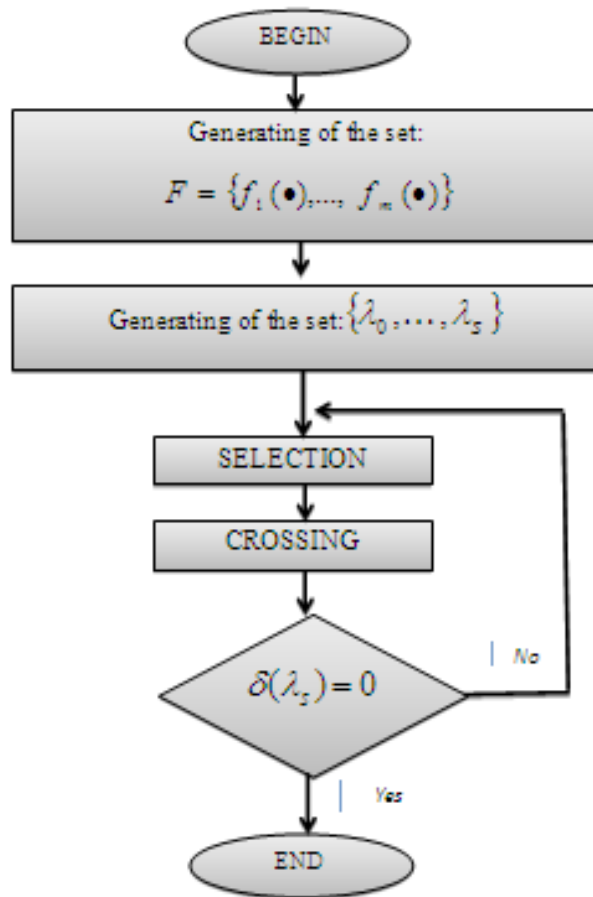


Рис. 1.2. Блок-схема реалізації методу структурної ідентифікації математичних моделей з гарантованими прогностичними властивостями на основі генетичних алгоритмів

Як показано на рис.1, на першому кроці реалізації цього методу структурної ідентифікації формують набір F структурних елементів (генів) – компонентів вектора базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$. При цьому припускають, що сформований набір F структурних елементів гарантовано включає всі елементи шуканої (прийнятної) структури різницевого оператора [41].

Формування набору структурних елементів різницевого оператора

відбувається наступним чином: комбінації із множини елементів $\{v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-d,j-d,h-d,k-d}\}$ формують у відповідності до порядку IPO d , тоді як комбінації з множини елементів $\{\bar{u}_{i,j,h,0}, \dots, \bar{u}_{i,j,h,k}\}$ генерують з огляду на фізичні особливості модельованого реального процесу для забезпечення умови зниження обчислювальної складності застосування методу [107].

На другому кроці реалізації методу структурної ідентифікації випадковим чином здійснюють формування структур IPO (хромосом), що задають початкову множину моделей-претендентів. Якщо на цьому кроці отримано хоча б одну структуру різницевого оператора, для якої $\delta(\lambda_s) = 0$, тоді відбувається завершення процедури структурної ідентифікації [42]. В іншому випадку переходять на третій крок, де проводять селекцію множини «кращих» (з найменшими значеннями функції мети $\delta(\lambda_s)$) структур IPO у кількості 50% від усіх згенерованих структур IPO (популяції) [41]. Якщо на цьому кроці отримано хоча б одну структуру різницевого оператора, для якої $\delta(\lambda_s) = 0$, завершуємо процедуру структурної ідентифікації.

На четвертому кроці проводять схрещування відібраних структур IPO (особин популяції) із застосуванням нестандартного оператора схрещування, розробленого авторами методу. Цей оператор «схрещування», на відміну від операторів, що використовують в межах класичних підходів, побудований на принципі «розіграшу лотереї», що дозволяє контролювати складність згенерованих на його основі моделей-претендентів [41]. Якщо на цьому кроці отримано хоча б одну структуру різницевого оператора, для якої $\delta(\lambda_s) = 0$, завершуємо процедуру структурної ідентифікації.

Після завершення процедури схрещування проводять селекцію найкращих структур IPO (перехід на третій крок). Важливо зазначити, що з метою зменшення ризику втрати важливих структурних елементів шуканої моделі на наступний ряд селекції, окрім отриманих в результаті схрещування пар поточних структур IPO, подають також і

структури, отримані з попереднього ряду селекції [41].

Таким чином, вхідними параметрами для реалізації методу структурної ідентифікації моделей з гарантованими прогностичними властивостями на основі генетичних алгоритмів з модифікованими операторами селекції та схрещування є S – розмір популяції, $[I_{\min}; I_{\max}]$ – нижня та верхня межі інтервалу, який визначає кількість структурних елементів у поточній структурі, а також множина структурних елементів F [108].

У ході критичного аналізу цього методу структурної ідентифікації були виявлені наступні недоліки [111].

По-перше, це випадкове формування початкової множини структур IPO (хромосом), що здійснюють на першій ітерації методу, проводять таким чином, щоб використати весь сформований набір структурних елементів F (генів), що призводить до суттєвого збільшення початкової кількості структур IPO (особин популяції), адже початкова кількість структур IPO (особин популяції) прямо пропорційно залежить від кількості структурних елементів (генів) у наборі F .

Така залежність зумовлена тим, що метод структурної ідентифікації на основі генетичного алгоритму базується на припущенні, що множина структурних елементів F повинна гарантовано включати всі елементи шуканої оптимальної структури IPO. Унаслідок цього для задач структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами набір генів (множина структурних елементів F) повинен містити у собі всі можливі комбінації з множини елементів $\{v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-d,j-d,h-d,k-d}\}$ відповідно до заданого порядку IPO у поєднанні з комбінаціями із множини елементів $\{\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}\}$, які генерують з огляду на результати аналізу фізичних особливостей модельованого реального процесу, що призводить до збільшення потужності множини F , а відповідно й до підвищення обчислювальної складності застосування методу.

По-друге, у ході селекції множини «кращих» (із найменшими значеннями функції мети $\delta(\lambda_s)$) структур IPO (популяції найкращих особин) на кожній ітерації відкидають 50% від усіх згенерованих структур, що в результаті може бути причиною відсутності прийнятної структури IPO після завершення процедури структурної ідентифікації внаслідок втрати важливих компонентів моделі.

По-третє, схрещування відібраних структур IPO (особин популяції) відбувається із застосуванням оператора «схрещування», який побудовано на принципі «розіграшу лотереї», де відбувається попарне «схрещування» структур (особин), які відбирають із множини кращих структур IPO (популяції кращих особин) випадковим чином. Основним недоліком такого оператора схрещування є нераціональний випадковий вибір структур (особини) для схрещування.

По-четверте, у запропонованому в праці [41] методі структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів відсутній оператор мутації, який є класичним оператором генетичного алгоритму, що унеможливорює отримання різноманіття популяції кращих особин. Зокрема через його відсутність цей метод структурної ідентифікації IPO не містить ефективного механізму для уникнення локальних екстремумів складної багатоекстремальної функції мети задачі структурної ідентифікації.

Результати аналізу існуючих методів структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів показали, що:

- застосування методу редукції може призвести до втрати значущих структурних елементів оптимальної структури математичної моделі, крім того, він характеризується високою обчислювальною складністю;
- метод «нарощування» характеризується високою обчислювальною складністю, а його застосування може призвести до переускладнення структури математичної моделі;

- МГУА не забезпечує побудову математичних моделей із гарантованими прогностичними властивостями;
- основними недоліками методу структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів із модифікованими процедурами селекції та схрещування є висока обчислювальна складність та відсутність ефективного механізму для уникнення локальних екстремумів складної функції мети задачі структурної ідентифікації.

Останнім часом для розв'язування задач параметричної ідентифікації, коли функція мети є дискретною, застосовують методи та алгоритми, які ґрунтуються на основі децентралізації та самоорганізації мультиагентних систем [1,3]. Сюди відносять алгоритми бджолоїної колонії, зозулі, мурашині та ін., які ґрунтуються на принципах ройового інтелекту. Тому важливим завданням є аналіз цих методів та виявлення можливості їх застосування для розв'язування задачі структурної ідентифікації, які, з математичної точки зору, є задачами дискретної оптимізації.

1.3 Огляд та аналіз алгоритмів ройового інтелекту

Методи ройового інтелекту моделюють колективну поведінку мультиагентних децентралізованих систем. Ці методи застосовують для розв'язування складних оптимізаційних задач, зокрема багатовимірної оптимізації, дискретної оптимізації, багатокритеріальної оптимізації тощо [1]. В основу методів ройового інтелекту покладено біологічний принцип: особини об'єднуються у зграї чи колонії для покращення умов своєї життєдіяльності. Зокрема кожна особина колонії має більше шансів на виживання у боротьбі з хижаками, загалом колонія може ефективніше проводити пошук їжі, ніж кожна особина самотійно тощо [1]. Таким чином, будь-яка колонія живих організмів у процесі функціонування ефективно вирішує оптимізаційні і, як правило, багатокритеріальні задачі.

Методи ройового інтелекту так само, як і інші еволютивні методи, використовують для розв'язання задачі популяцію особин (потенційних розв'язків) та метод стохастичної оптимізації, який моделює соціальну поведінку цих особин за аналогією, наприклад, до поведінки риб у зграї чи комах у колонії [83].

Спочатку випадковим чином формують початкову популяцію агентів алгоритму (потенційних розв'язків оптимізаційної задачі), а далі відбувається пошук оптимальних чи субоптимальних розв'язків уже із застосуванням поведінкових моделей популяцій живих організмів. Особини популяції локально взаємодіють між собою та довкіллям. Це означає, що якщо одна особина популяції виявила «перспективний шлях», то частина інших особин популяції може швидко рушити за нею. Водночас для забезпечення широкого покриття простору розв'язків оптимізаційної задачі в популяції наявні особини, які рухаються хаотично. Саме локальна взаємодія усіх особин популяції реалізує принципи ройового інтелекту [83].

До алгоритмів, які ґрунтуються на основі принципів ройового інтелекту відносять алгоритми зозулі, бджолоїної колонії, кажанів, рою часток, мурашиний та ін. Розглянемо частину з них детальніше.

Мурашиний алгоритм. Цей алгоритм моделює поведінку мурах, пов'язану з їх здатністю швидко знаходити найкоротший шлях від мурашника до джерела їжі та адаптуватися до змінних умов довкілля [28]. Біологічною особливістю мурах є те, що під час руху вони виділяють феромони (хімічні речовини, що мають специфічний запах). Феромони теж мають характерну особливість – здатність поступово випаровуватися. Інформація, яку залишили на шляху попередники, тобто концентрація феромонів, використовується іншими мурахами під час вибору шляху до джерела їжі. Таким чином, мурахи обирають ті шляхи, на яких запах феромонів «сильніший» [28]. Концентрація феромонів на шляху залежить від кількості мурах, які пройшли по ньому та давності його проходження. На

початкових ітераціях алгоритму вищою концентрацією будуть характеризуватися коротші шляхи, адже мурахи-розвідники зможуть пройти по них кілька разів, потім концентрація феромонів буде підтримуватися завербованими мурахами. Ті виявлені маршрути, що не використовуються мурахами, із часом стають не активними через випаровування феромонів.

Така поведінка мурах при виборі кращого шляху забезпечує можливість знаходження нових маршрутів, якщо попередні стали не доступними [28].

Алгоритм рою часток. Алгоритм частково моделює соціально-психологічну поведінку колонії тварин, які шукають місця для поселення з найкращими умовами. Основою для побудови алгоритму була поведінка птахів та риб у зграї [51]. Саме тому агентів системи нейтрально названо частками.

У цьому методі кожна частка є потенційним розв'язком задачі та характеризується місцем розташування та швидкістю. Кожна частка рухається до оптимального розв'язку і здійснює обмін інформацією з «сусідніми» частками. Усі вони також мають пам'ять, де зберігається інформація про координати кращого, знайденого нею місця для поселення, та глобального кращого місця, знайденого зграєю [28]. На кожній ітерації алгоритму напрям та довжину вектора швидкості для кожної із часток змінюють, щоб, з одного боку, вони рухалися в напрямку глобального кращого місця для поселення, а з іншого боку, щоб бути якнайближче до кращого місця, знайденого кожною з них.

Алгоритм штучної бджолоїної колонії. АБК – це евристичний алгоритм, що ґрунтується на принципах ройового інтелекту. Вперше основні засади АБК (*Artificial Bee Colony algorithm*) були сформульовані турецьким вченим Д. Карабогою у 2005 році для розв'язування оптимізаційної задачі із складною функцією мети багатьох змінних [13]. Основна ідея АБК полягає у моделюванні поведінки колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару).

У природі спочатку із вулика вилітає кілька бджіл-розвідників, які шукають цінні джерела нектару у випадковому напрямку. Цінність джерела нектару визначають кількістю нектару та відстанню від вулика до нього. Повернувшись у вулик, бджоли-розвідники повідомляють про знайдені джерела їжі та їх якість інших особин колонії за допомогою «бджолиного танцю». На основі отриманої інформації про кількість знайденого нектару, напрямку до джерела та відстані від вулика, бджоли із вулика обирають джерело нектару, до якого полетять. Чим якісніше джерело їжі, тим більше бджіл із вулика до нього полетить [14]. Далі процес повторюється.

Водночас, коли звичайні особини збирають нектар із відомих джерел нектару, бджоли-розвідники продовжують шукати нові цінні джерела їжі. У випадку, якщо на певній ділянці нектар вичерпався, бджоли покидають її і натомість відлітають до нових цінних джерел нектару, знайдених розвідницями [14].

Усі розглянуті методи та алгоритми побудовано на основі принципів ройового інтелекту. У загальному випадку схему реалізації всіх ройових алгоритмів можна сформулювати наступним чином [83]:

1. Ініціалізація популяції агентів алгоритму (в просторі пошуку розв'язків задачі випадковим чином формують певну кількість початкових точок (потенційних розв'язків задачі)).
2. Переміщення агентів алгоритму (на основі набору правил переміщення специфічного для кожного ройового алгоритму здійснюють переміщення агентів у просторі розв'язків задачі у такий спосіб, щоб наблизитися до екстремуму функції мети).
3. Завершення процедури (якщо виконано умову зупинки, в іншому випадку здійснюється перехід на другий крок).

Методи на основі ройового інтелекту мають багато спільних рис із генетичними алгоритмами: наприклад, ініціалізація початкової популяції здійснюється випадковим чином, для оцінювання знайдених розв'язків

використовують відомі значення функції мети тощо. Водночас ці методи не використовують генетичних операторів (схрещення, мутації), натомість особини популяції локально взаємодіють та змінюють швидкості, а також мають пам'ять. Крім того, механізми взаємодії між особинами популяції у ройових та генетичних алгоритмах є абсолютно різними [28]. Зокрема в генетичних алгоритмах хромосоми обмінюються інформацією попарно, тому вся популяція рухається синхронно у напрямку екстремуму функції мети. Проте у ройових алгоритмах взаємодія між особинами популяції відбувається локально, що забезпечує виявлення локальних екстремумів та відповідно швидше знаходження глобального екстремуму функції мети [83]. Крім того, перевагою методів та алгоритмів на основі ройового алгоритму є менша кількість параметрів алгоритму.

Унаслідок аналізу відомих ройових алгоритмів було встановлено, що найбільш придатним у контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації ІРО є алгоритм бджолоїної колонії. По-перше, він містить ефективний механізм для уникнення локальних екстремумів функції мети, а по-друге, дозволяє легко встановити основні аналогії між особливостями харчової поведінки бджолоїної колонії та основними поняттями задачі структурної ідентифікації.

1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження

Унаслідок проведеного аналізу задач моделювання об'єктів з розподіленими параметрами було встановлено, що, крім моделювання часових змін, необхідно одночасно моделювати просторовий розподіл їх характеристик. Розглянуто два типи таких задач, а саме: задачу забезпечення якості продукції під час виробництва листів гіпсокартону та задачу визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання під час операції на щитоподібній залозі пацієнта. Встановлено, що для них спільною

є необхідність синтезу математичної моделі при її невідомих структурі та параметрах.

Сформульовано оптимізаційну задачу структурної ідентифікації математичної моделі об'єкта з розподіленими параметрами за умов забезпечення точності математичної моделі в межах точності експериментальних даних. Показано, що ця задача зводиться до багаторазового розв'язування ІСНАР (1.10) та належить до класу NP-повних.

Проведено аналіз основних методів розв'язування задачі структурної ідентифікації із застосуванням різницевих операторів, унаслідок якого було встановлено, що одні з цих методів характеризується високою обчислювальною складністю пошуку математичної моделі, яка зазвичай не є оптимальною, тобто переускладнена, а інші, зокрема МГУА, не забезпечують заданої точності моделювання в межах похибок експериментальних даних.

Крім того, встановлено, що для розв'язування задач подібного класу, які математично зводяться до задач дискретної оптимізації, останнім часом застосовують методи та алгоритми, які ґрунтуються на принципах ройового інтелекту. Сюди відносять алгоритми бджолоїної колонії, зозулі, мурашині та ін., які ґрунтуються на принципах ройового інтелекту. Особливість таких методів та алгоритмів полягає у тому, що вони не використовують генетичних операторів (схрещення, мутації), натомість особини популяції локально взаємодіють, змінюють швидкості та мають пам'ять. Перевага ройових алгоритмів у контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації математичної моделі з гарантованими прогностичними властивостями полягає у тому, що взаємодія між особинами популяції відбувається локально, що забезпечує виявлення локальних екстремумів та відповідно швидке знаходження глобального екстремуму функції мети. Результати аналізу таких алгоритмів показали, що найбільш придатним у

контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації ІРО є алгоритм бджолиної колонії.

На основі вищесказаного сформульовано основну мету дисертаційного дослідження: зниження обчислювальної складності методів структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО з гарантованими прогностичними властивостями шляхом поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолиної колонії.

Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі задачі:

- розробити теоретичну основу для побудови методів структурної ідентифікації моделей із гарантованими прогностичними властивостями у вигляді ІРО на основі поведінкових моделей бджолиної колонії;

- розробити метод структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів із гарантованими прогностичними властивостями та обчислювальну схему його реалізації для випадку, коли експериментальні дані отримані в інтервальному вигляді;

- провести порівняльний аналіз обчислювальної складності застосування розробленого та відомого методів структурної ідентифікації ІРО, останній з який ґрунтується на генетичних алгоритмах;

- розробити програмний комплекс для структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО із застосуванням поведінкових моделей бджолиної колонії;

- провести апробацію розроблених методу структурної ідентифікації та програмного комплексу для побудови математичних моделей розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону, а також для побудови математичної моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани в процесі операції на щитоподібній залозі пацієнта.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Проаналізовано задачі побудови макромоделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення із заданою точністю та макромоделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани у процесі хірургічної операції на щитоподібній залозі пацієнта. Установлено, що для побудови зазначених моделей необхідно розв'язати задачу структурної ідентифікації різницевого оператора за результатами експерименту, поданими в інтервальному вигляді.

2. Проведено постановку задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора на основі даних обчислювального експерименту, які отримано в інтервальному вигляді. Показано, що ця задача належить до класу NP-складних та призводить до багаторазового розв'язування задачі параметричної ідентифікації. Запропоновано для розв'язування зазначеної задачі використати принципи саморганізації та методи стохастичного пошуку.

3. Встановлено недоліки існуючих методів та алгоритмів структурної ідентифікації різницевих операторів. Обґрунтовано для розв'язування задачі структурної ідентифікації ІРО використання ройових алгоритмів.

4. Проведено огляд та аналіз існуючих алгоритмів, що ґрунтуються на принципах ройового інтелекту. Показано їх переваги у порівнянні із генетичними алгоритмами. Встановлено, що для розв'язування задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора доцільно застосувати алгоритм бджолої колонії і на цій основі сформульовано задачі дисертаційного дослідження.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ПІДСТАВИ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ У ВИГЛЯДІ РІЗНИЦЕВИХ ОПЕРАТОРІВ НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКОВИХ МОДЕЛЕЙ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ

У попередньому розділі розглянуто постановку задачі структурної ідентифікації різницевого оператора на основі аналізу інтервальних даних і обґрунтовано для її розв'язування використання поведінкових моделей бджолоїної колонії. Метою цього розділу є розробка теоретичних основ поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії для їх застосування під час розв'язування задач структурної ідентифікації макромоделей.

У цьому розділі наведено основні біологічні засади поведінки бджолоїної колонії в процесі пошуку їжі і на цій основі введено основні поняття елементів структури різницевого оператора та математичне формулювання задачі ідентифікації макромоделі як задачі знаходження глобального екстремуму функції мети з атрибутами поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Під час розробки теоретичних основ необхідно встановити аналогії між поведінковими моделями бджолоїної колонії та поведінкою алгоритмів оптимізації структури математичної моделі, що і є предметом розгляду в цьому розділі дисертаційної роботи. Матеріали цього розділу дисертаційної роботи опубліковані автором у працях [24, 25, 112, 114].

2.1 Поведінкова модель бджолоїної колонії та її біологічне підґрунтя

Бджоли – це високорганізований вид комах, адже йому притаманна властивість спільно організовувати та ефективно проводити пошук їжі, води,

житла тощо. Загальновідомо, що колонія медоносних бджіл функціонує за принципом розподілу обов'язків відповідно до приналежності тієї чи іншої особини до певної касти у колонії. Водночас кожній робочій бджолі відведена своя роль: одні будують воскові стільники, збирають нектар, переробляють його у мед, а пилок – у пергу, інші годують матку, охороняють гніздо, регулюють процес природного роїння тощо. Детально процес розподілу обов'язків між робочими бджолами було вперше досліджено у праці [126]. Обов'язки робочих бджіл можна умовно поділити на три основні типи: догляд за приплодом, робота у вулику та робота у полі. Варто зазначити, що кожна робоча бджола виконує конкретний тип роботи у певний період свого життя, що зумовлено особливостями анатомічного розвитку робочої бджоли в період росту. Зокрема «молоді» робочі бджоли у перші дні життя займаються очищенням комірок, із яких вони та інші особини вивелися. Далі, починаючи орієнтовно з 6-денного віку і до 11-13-денного віку, ці робочі бджоли годують личинок, що зумовлено повноцінним розвитком глоткових та верхньощелепних залоз, котрі виділяють маточне молочко у цей період їх життя [126]. Варто зазначити, що ці залози в робочих бджіл функціонують лише в першій половині життя, коли вони займаються роботою у вулику. Наприкінці цього періоду у бджіл посилено функціонують воскові залози, що зумовлює перші вильоти з вулика. Вони споруджують житло, «лагодять» його, заклеюючи щпарини прополісом, будують стільники тощо. Крім того, під час таких перших вильотів із вулика робоча бджола запам'ятовує його вигляд та навколишнє середовище. Перші вильоти є доволі короткочасними, однак надалі вони збільшуються у часі, але рідко перевищують п'ять хвилин та стають більш дальніми. Такі обов'язки робочі бджоли виконують до сімнадцяти- та двадцятиденного віку.

Лише після цього «дорослі» робочі бджоли [126] починають займатися пошуком їжі за межами вулика. У живій природі із вулика спочатку вилітає у випадковому напрямку певна кількість бджіл-розвідників для пошуку

нових джерел нектару. Варто зауважити, що в процесі пошуку їжі в залежності від рельєфу місцевості медоносна бджола може долати відстань до 14 км. Знайшовши «якісне» джерело їжі, бджоли повинні зафіксувати своє місцезнаходження стосовно вулика та подолати зворотний шлях. Повернувшись до вулика, бджоли-розвідники інформують інших дорослих робочих бджіл про знайдені ними джерела нектару. Спілкування між особинами бджолиної колонії відбувається за допомогою «бджолиних танців» [116]. У вулику бджола-розвідник починає «танцювати», повідомляючи решті про напрямок та відстань до джерела їжі, а також про кількість знайденого нектару. У залежності від відстані до джерела їжі розрізняють два типи танців. Перший бджола-розвідник виконує у випадку, якщо джерело їжі знаходиться на відстані не більшій, ніж 100 м від вулика, другий – якщо ця відстань перевищує 100 м. Однак бджоли розпізнають джерело їжі, про яке їх повідомила бджола-розвідник, не тільки за інформацією, отриманою із танцю, а й за запахом, який вони чують від «танцівниці». Отже, коли бджола-розвідник повертається у вулик, вона ділиться знайденим нектаром з іншими особинами та після цього починає танцювати на вертикальній поверхні сот. Варто зазначити, що у вулику бджоли «танцюють» лише в тому випадку, якщо виявлене ними джерело їжі відрізняється високими ціннісними якостями, у протилежному ж бджола обирає одну з двох альтернатив – залишитися у вулику та чекати на інформацію від інших особин чи продовжити випадковий пошук джерел нектару. Бджоли визначають цінність джерел нектару за відстанню від вулика і за якістю їжі в порівнянні з їжею з інших джерел [4]. Чим далі знаходиться їжа від вулика, тим солодшою вона повинна бути, щоб змусити бджолу ділитися інформацією, тобто «танцювати», таким чином мобілізуючи інших особин для пошуку їжі в певному напрямку [4]. Якщо бджола виконує перший танець, то вона біжить по сотах, описуючи круги, та часто змінює напрям, а якщо другий, то спочатку описує півколо, а потім по прямій лінії

біжить до початкової точки руху. Тривалість «бджолиного танцю» може бути від 15 секунд до кількох хвилин [126].

Варто зазначити, що за різні характеристики джерела їжі відповідають різні елементи «бджолиного танцю». Так напрямом, у якому знаходиться джерело їжі, бджоли-розвідники повідомляють через напрямом прямого відрізка танцю, а відстань до джерела їжі визначається кількістю прямих відрізків танцю, здійснених бджолою протягом 15 секунд: 600 м – 7 відрізків, 6 км – 2 відрізки і т.д. Кількість знайденого нектару визначають за часом, який бджола-розвідник витрачає на танець, та за пробами нектару, отриманими від неї. Якщо джерело їжі знаходиться досить далеко від вулика, то мобілізовані бджоли орієнтуються практично лише на запах принесеного бджолою-розвідником нектару. Після «бджолиного танцю» в окіл кращих джерел їжі летять бджоли із вулика, водночас, чим якісніше джерело їжі, тим більше туди летить бджіл [26]. Важливо зазначити, що мобілізовані бджоли на основі інформації, отриманої із «танцю», дістаються саме в окіл джерела їжі (точку, віддалену від знайденого джерела нектару в радіусі 5-6 метрів), а далі бджоли переходять на інший спосіб пошуку, тобто за кольором та запахом, про що свідчать результати експериментів, описані у статті [26]. Адже коли бджола-розвідник збирає нектар із квітів, то її тіло «всмоктує» запах джерела нектару. Робочі бджоли у вулику під час танцю доторкаються до розвідниці вусиками, які відіграють роль органів нюху в бджіл, розпізнають запах та запам'ятовують його. Саме тому, коли мобілізовані бджоли потрапляють в окіл джерела нектару, то далі проводять пошуки уже за його запахом. Крім того, запах дозволяє бджолам розрізняти квіти, які вони уже відвідали, від інших, які мають схоже забарвлення. Якщо ж бджоли уже відвідували квіти чи рослини, запах яких запам'ятали від «танцівниці», то ще одним орієнтиром у процесі пошуку джерела нектару буде і забарвлення квітів [126].

Після того як мобілізовані бджоли знайшли місцезнаходження джерела

їжі, вони збирають нектар та повертаються у вулик, де також можуть почати «танцювати». Ділянки, на яких джерело нектару вичерпалося, медоносні бджоли покидають. Бджоли-розвідники знову відлітають для пошуку нових джерел їжі, після цього процес повторюється.

Описана харчова поведінка бджолиної колонії лягла в основу алгоритму бджолиної колонії, який застосовують для розв'язання складних оптимізаційних задач.

Таким чином, розглянуте біологічне підґрунтя організації колективного пошуку та забезпечення їжею колонії медоносних бджіл дає можливість виділити основні компоненти поведінкової моделі та встановити між ними відповідні зв'язки. Схему взаємозв'язку компонентів поведінкової моделі бджолиної колонії подано на рис. 2.1.

Усіх бджіл колонії, котрі займаються пошуком джерел їжі, умовно поділяють на три групи [14]:

- *робочі бджоли* (проводять пошук їжі в околі вже відомих джерел нектару та інформують бджіл-дослідників про якість досліджуваних джерел);
- *бджоли-дослідники* (знаходяться у вулику, де отримують інформацію від робочих бджіл, після цього летять у пошуках нектару в окіл знайдених робочими бджолами джерел їжі);
- *бджоли-розвідники* (здійснюють випадковий пошук нових джерел нектару).

Розглянемо детальніше процедури та модулі поведінкової моделі бджолиної колонії. Процедура виявлення вичерпаних джерел нектару реалізує механізм прийняття рішення робочою бджолою про те, чи досліджуване нею джерело є вичерпаним. У випадку, якщо відоме джерело ще не вичерпане, то далі відбувається виклик процедури дослідження околу відомого джерела нектару. Ця процедура реалізує політ бджоли в окіл відомого джерела нектару для дослідження його якості із подальшим викликом процедури визначення його якості та процедури запам'ятовування його координат та якості.

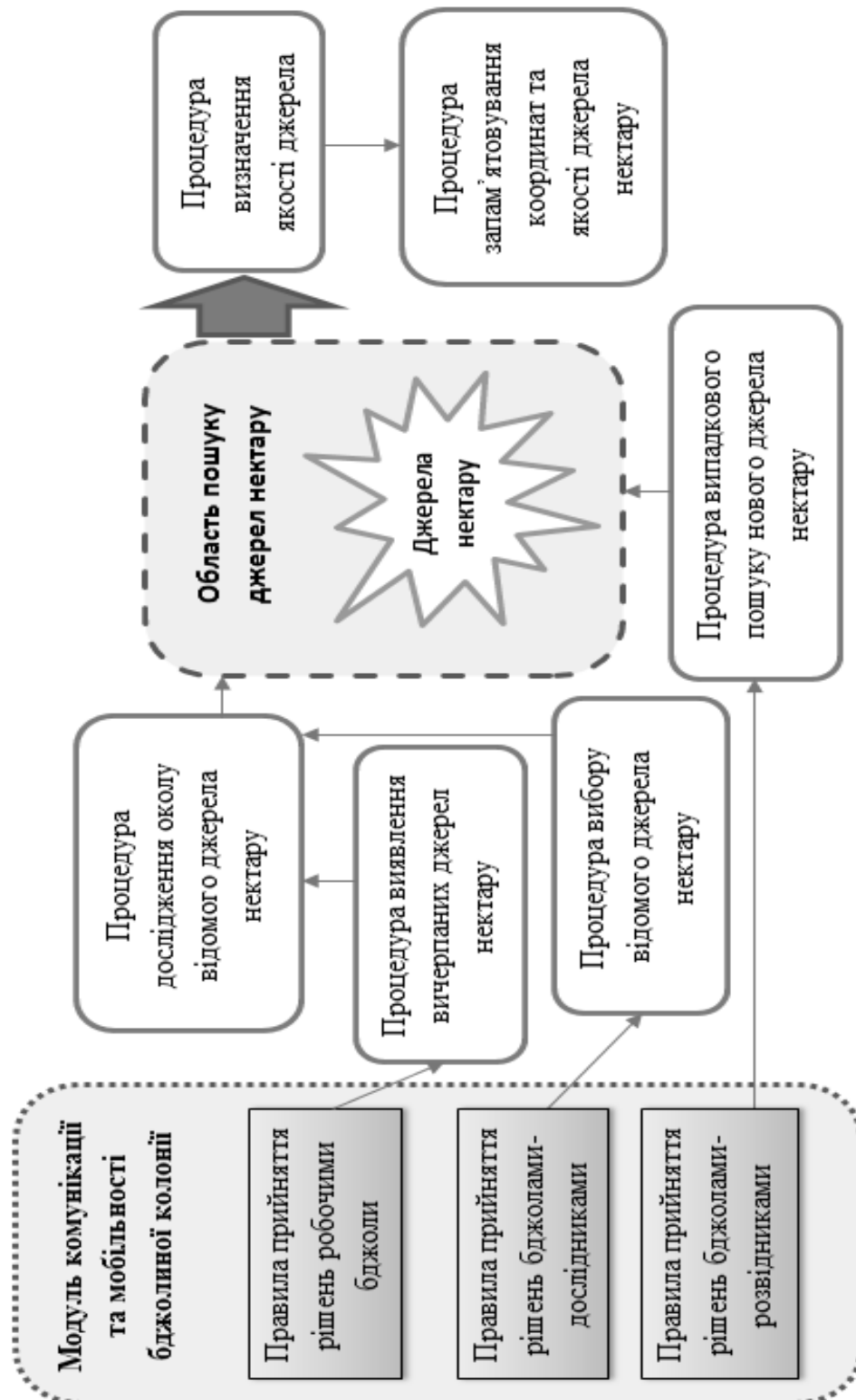


Рис. 2.1. Схема взаємозв'язку компонентів поведінкової моделі бджолоїної колонії

Процедура вибору відомого джерела нектару бджолами-дослідниками означає наступне: на основі інформації отриманої, із танців робочих бджіл,

бджоли-дослідники, обирають відоме джерело нектару, в окіл якого вони полетять. Насправді біологічні механізми, на основі яких бджола-дослідник приймає рішення летіти за тою чи іншою робочою бджолою, досліджені недостатньо, однак вважають, що кількість «завербованих» бджіл-дослідників, із математичної точки зору, завжди є функцією від якості джерела нектару [4]. Це означає, що в окіл «кращих» джерел нектару летить більше бджіл-дослідників, а в окіл «гірших» може не полетіти жодна.

Процедура випадкового пошуку нового джерела нектару реалізує політ бджіл-розвідників у випадковому напрямку для пошуку нових джерел нектару з подальшим викликом процедури визначення його якості та процедури запам'ятовування його координат та якості. Процедура запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл означає механізм прийняття рішення про те місцезнаходження, якого із джерел нектару потрібно запам'ятати – знайденого у околі чи відомого. Робоча бджола зафіксує координати «кращого» джерела нектару. Модуль комунікації та мобільності бджіл колонії забезпечує передачу інформації між бджолами колонії та мобільність бджіл між різними групами. Мобільність бджіл означає можливість переходу бджоли з однієї групи в іншу. Наприклад, якщо робоча бджола прийняла рішення про те, що досліджуване нею джерело нектару є вичерпаним, то вона переходить у групу бджіл-розвідників. Правила прийняття рішень різними групами бджіл визначають кількісні критерії, на основі яких бджоли обирають, яку процедуру виконати наступною.

Тепер доцільно встановити основні аналогії між поведінковою моделлю і основними процедурами методу структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді IPO. Зокрема у контексті задачі структурної ідентифікації IPO поведінка бджоли при виборі місцезнаходження джерела нектару безпосередньо реалізує сам алгоритм синтезу поточної структури IPO; область пошуку нектару – множина всіх

можливих структур IPO з відомими оцінками компонентів вектора параметрів \widehat{g} ; *окіл джерела нектару* – множина структур IPO, що можуть бути згенеровані на основі поточної шляхом часткової заміни її структурних елементів; *координати джерела нектару* – поточна структура IPO λ_s ; *якість джерела нектару* визначається значенням функції мети $\delta(\lambda_s)$ для поточної структури IPO λ_s , яке задає точність математичної моделі, побудованої на основі поточної структури λ_s .

Структуру IPO λ_s задаємо у вигляді деякого набору структурних елементів із множини F , як показано у виразі (1.9). У дисертаційній роботі запропоновано ввести десяткове кодування структур IPO для зручності оперування ними. Тому множину всіх структурних елементів (базисних функцій) F , згенеровану для реалізації методу структурної ідентифікації, формуємо у вигляді упорядкованого набору, як показано у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Множина всіх структурних елементів

№	Структурний елемент
1	$f_1 (\bullet)$
2	$f_2 (\bullet)$
...	...
$L-1$	$f_{L-1} (\bullet)$
L	$f_L (\bullet)$

Таким чином кожному структурному елементу із множини F можна поставити у відповідність його порядковий номер із табл. 2.1. Тоді поточну структуру IPO λ_s будемо задавати у вигляді набору $\{N_1, N_2, \dots, N_{m_s}\}$, де N – номер структурного елемента із табл. 2.1.

Введемо оператор $P(\Lambda_{mcs}, F)$, який здійснює перетворення структури

різницевого оператора у вигляді (1.9) відповідно до процедури дослідження околу відомого джерела нектару робочими бджолами. У контексті задачі структурної ідентифікації це означає, що на поточній ітерації застосування методу структурної ідентифікації потрібно на основі кожної з поточних структур математичної моделі λ_s , які задають координати відомих джерел нектару, згенерувати по одній «новій» λ'_s , які задаватимуть координати точок в околі цих джерел їжі. Варто зазначити, що згадана «нова» структура означає окіл джерела нектару, тому має бути «близькою» до первинної структури IPO λ_s . Тобто оператор $P(\Lambda_{mcs}, F)$ здійснює перетворення множини поточних координат джерел нектару в координати точок в їх околі, тобто здійснює перетворення множини поточних структур IPO Λ_{mcs} , згенерованих на ітерації алгоритму *mcs* у множину структур IPO Λ'_{mcs} . Генеруємо таку «нову» структуру λ'_s шляхом заміни випадковим чином частини елементів поточної λ_s . Заміну частини елементів здійснюємо наступним чином: чим гірша структура λ_s , тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити.

Введемо показник n_s , який визначає кількість замінюваних елементів у поточній структурі IPO λ_s , у залежності від її якості в межах поточної множини структур Λ_{mcs} . Потрібно зауважити, що в контексті задачі структурної ідентифікації кількість структурних елементів у шуканій структурі IPO є не відомою, однак відповідно до постановки задачі наведеної у першому розділі дисертаційного дослідження відомими є межі інтервалу $[I_{\min}; I_{\max}]$, що задають відповідно мінімальну та максимальну кількість структурних елементів у поточній структурі IPO λ_s .

Це означає, що структури IPO, отримані на поточній ітерації застосування методу, можуть мати різну кількість елементів. Тому при обчисленні кількості елементів n_s , які необхідно замінити, враховуємо як

якість поточної структури λ_s у межах усієї поточної множини так і кількість її елементів m_s .

Далі проводимо заміну визначеної кількості структурних елементів n_s поточної структури IPO λ_s . Елементи поточної структури, які потрібно замінити, обираємо випадковим чином. Кодування структурних елементів, як уже зазначалося, здійснюємо на основі порядкових номерів структурних елементів із усієї множини структурних елементів F . Водночас номери елементів, які будемо замінити у поточній структурі IPO λ_s , визначаємо випадковим чином. Далі аналогічно вибираємо структурні елементи з множини всіх структурних елементів F та здійснюємо заміну.

Наприклад, нехай поточну структуру IPO λ_s задає набір порядкових номерів структурних елементів $\{5, 7, 12, 14, 22\}$, потужність множини структурних елементів $L=25$, а кількість елементів поточної структури, які потрібно замінити $n_s = 2$. Тоді випадковим чином обираємо елементи поточної структури λ_s , які необхідно замінити, наприклад «7» та «12», а також елементи з множини F «16», «20», на які будемо їх замінювати.

Далі проводимо заміну, внаслідок чого отримуємо «нову» структуру λ'_s , задану набором $\{5, 16, 20, 14, 22\}$. Отримана «нова» структура IPO λ'_s у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії задає координати точки в околі відомого джерела нектару.

У контексті задачі структурної ідентифікації математичної моделі *процедура визначення якості джерела нектару* означає проведення етапу параметричної ідентифікації структури IPO λ_s та визначення її якості на основі виразів (1.11) та (1.12), тобто обчислення для неї значення функції мети $\delta(\lambda_s)$.

Введемо оператор попарної селекції $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ «кращої» із структур IPO λ_s та λ'_s за значеннями функції мети відповідно до *процедури*

запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл. Оператор $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ реалізує процес синтезу множини «кращих» структур IPO Λ^1_{mcp} із поточних множин Λ_{mcp} , Λ'_{mcp} . Таким чином, отримуємо множину структур IPO першого ряду формування $\lambda^1_s \in \Lambda^1_{mcp}$, $s = 1 \dots S$.

Введемо показник R_s , який, з математичної точки зору, означає кількість структур, які будуть згенеровані на основі s -ї структури із множини Λ^1_{mcp} відповідно до процедури вибору відомого джерела нектару бджолами-дослідниками. Зазначений показник R_s у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії означає кількість бджіл-дослідників, які обрали відоме джерело-нектару з координатами λ^1_s .

Його значення обчислюватимемо на основі такого припущення: кількість бджіл-дослідників, що летить в окіл джерела нектару, про яке повідомила робоча бджола, прямо пропорційно залежить від його якості.

Таблиця 2.2

Приклад вихідних даних для обчислення показника R_s

Номер поточної структури IPO, λ^1_s	Значення функції мети, $\delta(\lambda^1_s)$	Кількість «нових» структур, R_s
1	0,1	2
2	0,12	2
3	0,4	0
4	0,5	0

У таблиці 2.2 показано приклад вихідних даних для обчислення показника R_s . Кількість робочих бджіл задаємо кількістю структур, наявних на поточній ітерації реалізації методу, тобто чотирьох. Кількість структур, які повинні бути згенеровані на їх основі, тобто кількість бджіл-дослідників, також чотири. Для структур «1» та «2» необхідно згенерувати по дві «нових»

структури, оскільки значення функції мети $\delta(\lambda_s^1)$, обчислені для них, є дуже близькими та найменшими із отриманих для усієї множини структур. Для структур «3» та «4» не буде згенеровано «нових» структур, адже вони є значно «гіршими».

Варто зазначити, що розподіл бджіл у популяції задаємо наступним чином: робочі бджоли – 50% популяції; бджоли-дослідники – 50%.

Введемо оператор $P_\delta(\Lambda_{mcp}, F)$, який здійснює перетворення структури різницевого оператора у вигляді (1.9) відповідно до *процедури дослідження околу відомого джерела нектару* бджолами-дослідниками. У контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії процедура польоту до відомого джерела нектару означає політ бджіл-дослідників в окіл відомих джерел їжі.

Оператор $P_\delta(\Lambda_{mcp}, F)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 з множини структур Λ_{mcp}^1 першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму *mcp*, у множини структур IPO Λ'_s (де $s = 1 \dots S$) у спосіб заміни випадковим чином n_s елементів кожної структури λ_s^1 , елементами із множини структурних елементів F .

Введемо оператор погрупової селекції $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$ «кращої» структури IPO із λ_s^1 та множини $\Lambda'_s = \{\lambda_1 \dots \lambda_r \dots \lambda_{R_s}\}$ за значеннями функції мети відповідно до *процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару* для бджіл-дослідників.

Оператор погрупової селекції $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$ реалізує процес синтезу множини «кращих» структур IPO Λ_{mcp}^2 із поточних множин Λ_{mcp}^1 та Λ_{mcp}'' у спосіб селекції структур IPO λ_s^2 за показниками якості, де $\Lambda_{mcp}'' = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$, $s = 1 \dots S$. Таким чином отримуємо множину структур IPO другого ряду формування Λ_{mcp}^2 .

Структури IPO λ_s^2 другого ряду формування на наступній ітерації застосування методу задають координати множини відомих джерел нектару

Λ_{mcp}^2 , за якими закріплені робочі бджоли популяції.

Введемо лічильник $Limit_s$, який для кожної поточної структури IPO, зміна значень, якого імітує процес зменшення кількості нектару відповідно до *процедури виявлення вичерпаних джерел нектару*.

Його значення інкрементуємо кожного разу, якщо під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася», та обнуляємо в іншому випадку. Збільшення значення лічильника $Limit_s$ імітує процес вичерпування джерела нектару. Водночас використаємо критерій, який дозволяє виявляти вичерпані джерела нектару. Для цього введено константу $LIMIT$, значення якої дослідник задає як один із параметрів методу структурної ідентифікації перед його застосуванням. Таким чином, кожне джерело нектару (структура IPO λ_s^2), для якого виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$, вважаємо вичерпаним. У такому випадку робоча бджола, закріплена за ним, стає бджолою-розвідником та здійснює випадковий пошук «нового» джерела нектару.

Введемо оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, який випадковим чином генерує «нову» структуру IPO з множини всіх структурних елементів відповідно до *процедури випадкового пошуку нового джерела нектару*.

Оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ означає генерування випадковим чином структури λ_s^2 із множини усіх структурних елементів F , де кількість структурних елементів $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$. Варто зазначити, що при формуванні «нової» структури IPO оператором $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, йому будуть доступні всі структурні елементи із множини F .

Модуль комунікації та мобільності бджіл колонії, який включає набір правил прийняття рішень різними типами бджіл, означає взаємодію між операторами генерування та селекції структур IPO.

Правила прийняття рішень різними групами бджіл, які визначають процедури у поведінковій моделі для різних груп бджіл, у методі структурної

ідентифікації математичних моделей у вигляді ІРО означають попередньо введені оператори. Використовуємо їх для інтерпретації значень змінних n_s , R_s та $Limit_s$.

Зважаючи на визначені компоненти поведінкової моделі та проведені аналогії щодо процедур методу структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО, доцільно визначити деякі формальні аспекти побудови зазначеного методу.

2.2 Теоретичні основи побудови методу структурної ідентифікації ІРО на основі поєднання принципів ройового інтелекту та аналізу інтервальних даних

У попередньому підрозділі розглянуто компоненти поведінкової моделі бджолиної колонії, а також проведено аналогії з основними процедурами методу структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО. Розглянемо поєднання компонентів поведінкової моделі з методами аналізу інтервальних даних і на цій основі сформулюємо теоретичні основи побудови процедур пошуку глобального мінімуму функції мети $\delta(\lambda_s)$ в задачі структурної ідентифікації ІРО.

Задачу структурної ідентифікації ІРО розв'язують за допомогою певної послідовності перетворень структур λ_s , де значення функції мети $\delta(\lambda_s)$, обчисленої для них на кожній ітерації, набуває менших значень. Якщо $\delta(\lambda_s)=0$, то це означає, що поточна структура ІРО λ_s , для якої обчислене таке значення функції мети $\delta(\lambda_s)$, у просторі розв'язків є точкою глобального мінімуму $\delta(\lambda_s)$.

При побудові процедур, які лежать в основі методу структурної ідентифікації, необхідно здійснити такі послідовності перетворень, які

забезпечували б на кожній ітерації зменшення значень функції мети $\delta(\lambda_s)$.

Водночас застосування аналізу інтервальних даних передбачає для оцінювання якості кожної згенерованої структури ІРО розв'язування ІСНАР. 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:

$$G(\lambda_s) = f_1^s(\bullet) \cdot \widehat{g}_1^s + f_2^s(\bullet) \cdot \widehat{g}_2^s + \dots + f_{m_s}^s(\bullet) \cdot \widehat{g}_{m_s}^s. \quad (2.1)$$

Слід зауважити, що зазначений оператор дає можливість підвищити ступінь нелінійності ІРО, шляхом використання мультиплікативних згорток.

Відомий порядок РО d дає можливість задати початкові умови у такому вигляді:

$$\begin{aligned} [\widehat{v}_{0,0,0,0}^-; \widehat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, [\widehat{v}_{1,d-1,1,0}^-; \widehat{v}_{1,d-1,1,0}^+] \subseteq [z_{1,d-1,1,0}^-; z_{1,d-1,1,0}^+], \dots, \\ [\widehat{v}_{d,d,d,d-1}^-; \widehat{v}_{d,d,d,d-1}^+] \subseteq [z_{d,d,d,d-1}^-; z_{d,d,d,d-1}^+]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Тоді з використанням оператора $G(\lambda_s)$ та врахуванням початкових умов (2.2) отримуємо математичну модель об'єкта з розподіленими параметрами у вигляді ІРО:

$$[\widehat{v}_{i,j,h,k}] = [f_1^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^s + [f_2^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_s}^s, \quad (2.3)$$

де $f_i^s([\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) = [f_i^s(\bullet)]$, а набір аргументів $[\widehat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\widehat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}]$ означає задані у вигляді початкових умов або спрогнозовані в попередніх точках простору та часу інтервальні оцінки модельованої характеристики.

Прогнозовані значення модельованої характеристики отримуємо на основі ІРО (2.3) рекурентно, підставивши у нього початкові умови (2.2).

Вектор відомих параметрів ІРО (2.3) \widehat{g}^s отримуємо у вигляді розв'язку ІСНАР, яку тепер можемо сформулювати у такому загальному вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\widehat{v}_{0,0,0,0}^-; \widehat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]; \\ [\widehat{v}_{i,j,h,k}] = [f_1^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^s + [f_2^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_s}^s; \quad (2.4) \\ z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^s + [f_2^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_s}^s \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K. \end{array} \right.$$

Зауважимо, що в ІСНАР (2.4) інтервальні рівняння $z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^s + [f_2^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_s}^s \leq z_{i,j,h,k}^+$ отримуємо із умов забезпечення точності математичної моделі в межах похибок вимірювання модельованої характеристики: $[\widehat{v}_{i,j,h,k}] \in [z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+]$.

Поточна структура ІРО λ_s із відомим вектором параметрів \widehat{g}^s є одним із потенційних розв'язків задачі структурної ідентифікації. Якість поточної структури ІРО λ_s оцінюємо на основі виразу (2.1), початкових умов (2.2), інтервального різницевого оператора (2.3), які дають можливість сформулювати ІСНАР (2.4), та деякого показника $\delta(G(\lambda_s))$, отриманого з системи (2.4) у такому вигляді таких виразів:

$$\delta(G(\lambda_s)) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}([\widehat{v}_{i,j,h,k}]) - \text{mid}([z_{i,j,h,k}]) \right| \right\} \quad (2.5)$$

$$\text{якщо } [\widehat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \emptyset \quad \exists i = d, \dots, I, \exists j = d, \dots, J, \exists h = d, \dots, H,$$

$$\exists k = d, \dots, K;$$

$$\delta(G(\lambda_s)) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \{wid([\widehat{v}_{i,j,h,k}]) - wid([\widehat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}])\} \quad (2.6)$$

$$\text{якщо } [\widehat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \emptyset \quad \forall i = d, \dots, I, \quad \forall j = d, \dots, J, \quad \forall h = d, \dots, H, \\ \forall k = d, \dots, K.$$

Зауважимо, що інтервальні оцінки модельованої характеристики $[\widehat{v}_{i,j,h,k}]$ отримуємо з ІРО (2.3) при заданих початкових умовах (2.2). Формула (2.5) визначає відстань між серединою інтервалу прогнозованого значення модельованої характеристики $[\widehat{v}_{i,j,h,k}]$ та серединою інтервалу виміряного значення цієї характеристики у випадку коли є такі точки, в яких прогнозований інтервал не перетинається з експериментальним. В іншому випадку показник $\delta(G(\lambda_s))$ обчислюємо на основі формули (2.6) як різницю ширини інтервалу прогнозованого значення з шириною перетину інтервалів $[\widehat{v}_{i,j,h,k}]$, $[z_{i,j,h,k}]$.

Таким чином, функцію мети задачі структурної ідентифікації перепишемо у вигляді складеної функції:

$$\delta(G(\lambda_s)) \xrightarrow{\lambda_s} \min, \quad (2.4)$$

$$m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\}, \lambda_s \in \Lambda_{mcs}$$

де mcs – номер ітерації реалізації методу структурної ідентифікації.

На рис. 2.2 показано приклад простору розв'язків задачі структурної ідентифікації, де множина структурних елементів F складається з 10 елементів $\{f_1(\bullet), \dots, f_{10}(\bullet)\}$. Усі вузли сітки, утвореної вісями $f_1^s(\bullet)$ та $f_2^s(\bullet)$, визначають поточні структури ІРО λ_s , де значення дискретних координат на цих вісях у поточному вузлі сітки задають елементи із набору $\{f_1(\bullet), \dots, f_{10}(\bullet)\}$, які входять у поточну структуру ІРО.

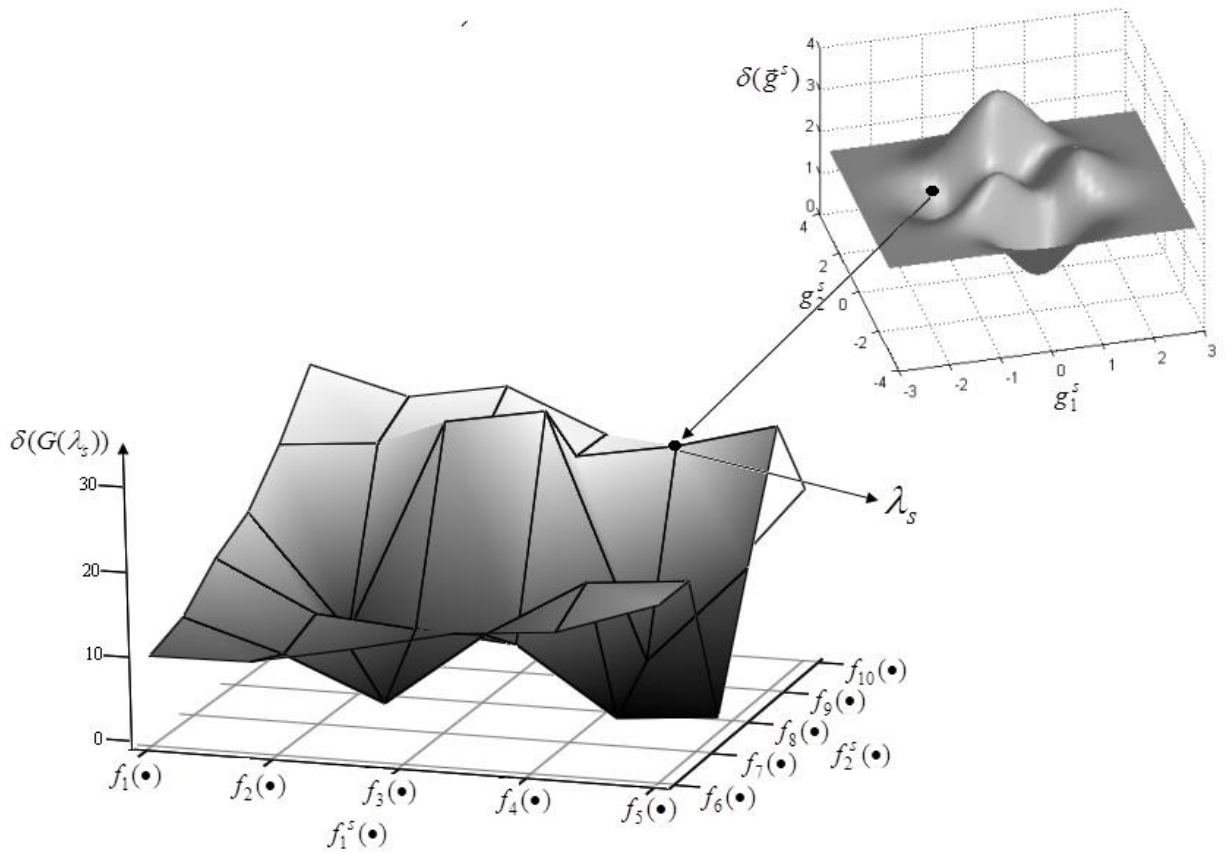


Рис. 2.2. Простір розв'язків задачі структурної ідентифікації ІРО для $L=10, m_s=2$

Наприклад, поточна структура ІРО λ_s , позначена на рис. 2.2, складається з елементів: $f_1^s(\bullet) = f_4(\bullet)$, $f_2^s(\bullet) = f_9(\bullet)$.

Якість поточної структури ІРО λ_s визначаємо по вісі $\delta(G(\lambda_s))$. Зауважимо, що для оцінювання якості структури ІРО необхідно знайти її параметри. Тобто для структури ІРО λ_s , показаної на рис. 2.2, оцінки параметрів \hat{g}_1^s, \hat{g}_2^s отримуємо у вигляді розв'язку задачі параметричної ідентифікації, яка розглянута у працях [62, 70].

Із рис.2.2 видно, що задача структурної ідентифікації у випадку застосування аналізу інтервальних даних зводиться до пошуку глобального мінімуму складеної функції мети $\delta(G(\lambda_s))$, через знаходження глобального мінімуму функції мети задачі параметричної ідентифікації $\delta(\bar{g})$. Для

зручності далі складену функцію мети $\delta(G(\lambda_s))$ позначатимемо $\delta(\lambda_s)$.

Як бачимо з рис. 2.2, функція мети задачі структурної ідентифікації є достатньо складною, дискретною і має велику кількість локальних мінімумів. Функція мети (2.4) є дискретною, оскільки включає набори структурних елементів, крім того, у ній містяться підобласті параметрів, які можуть бути не перервними.

Водночас рис. 2.2 ілюструє надзвичайно високу обчислювальну складність процесу розв'язування задачі структурної ідентифікації навіть для такого простого прикладу, коли кількість структурних елементів є фіксованою та дорівнює двом, а набір усіх структурних елементів складається лише з десяти елементів.

Таким чином, сформульована задача структурної ідентифікації (2.4) забезпечує гарантовані прогностичні властивості математичної моделі об'єкта з розподіленими параметрами у вигляді ІРО. Зважаючи на встановлену складність та дискретність функції мети (2.4), необхідно розробити процедуру розв'язування оптимізаційної задачі (2.4) у такий спосіб, щоб забезпечити перехід від $\delta(\lambda_s)$ до $\delta(\lambda_{s+1})$ при умові $\delta(\lambda_s) > \delta(\lambda_{s+1})$.

У дисертаційній роботі запропоновано поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії для побудови процедур реалізації ітераційної схеми розв'язування оптимізаційної задачі (2.4) за умов збіжності $\delta(\lambda_s) > \delta(\lambda_{s+1})$.

Запропоновано побудову ітераційної схеми мінімізації функції мети (2.4) у спосіб перетворення послідовності структур $\lambda_1, \dots, \lambda_s, \lambda_{s+1}, \dots, \lambda_0$ через застосування операторів: $P(\Lambda_{mcn}, F)$, $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$, $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$, $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$, які є встановленими у попередньому підрозділі аналогами процедур поведінкової моделі бджолоїної колонії.

Зазначені перетворення представимо у вигляді узагальненої схеми послідовності перетворень структур IPO, яка реалізує фази активності усіх груп бджіл із поведінкової моделі.

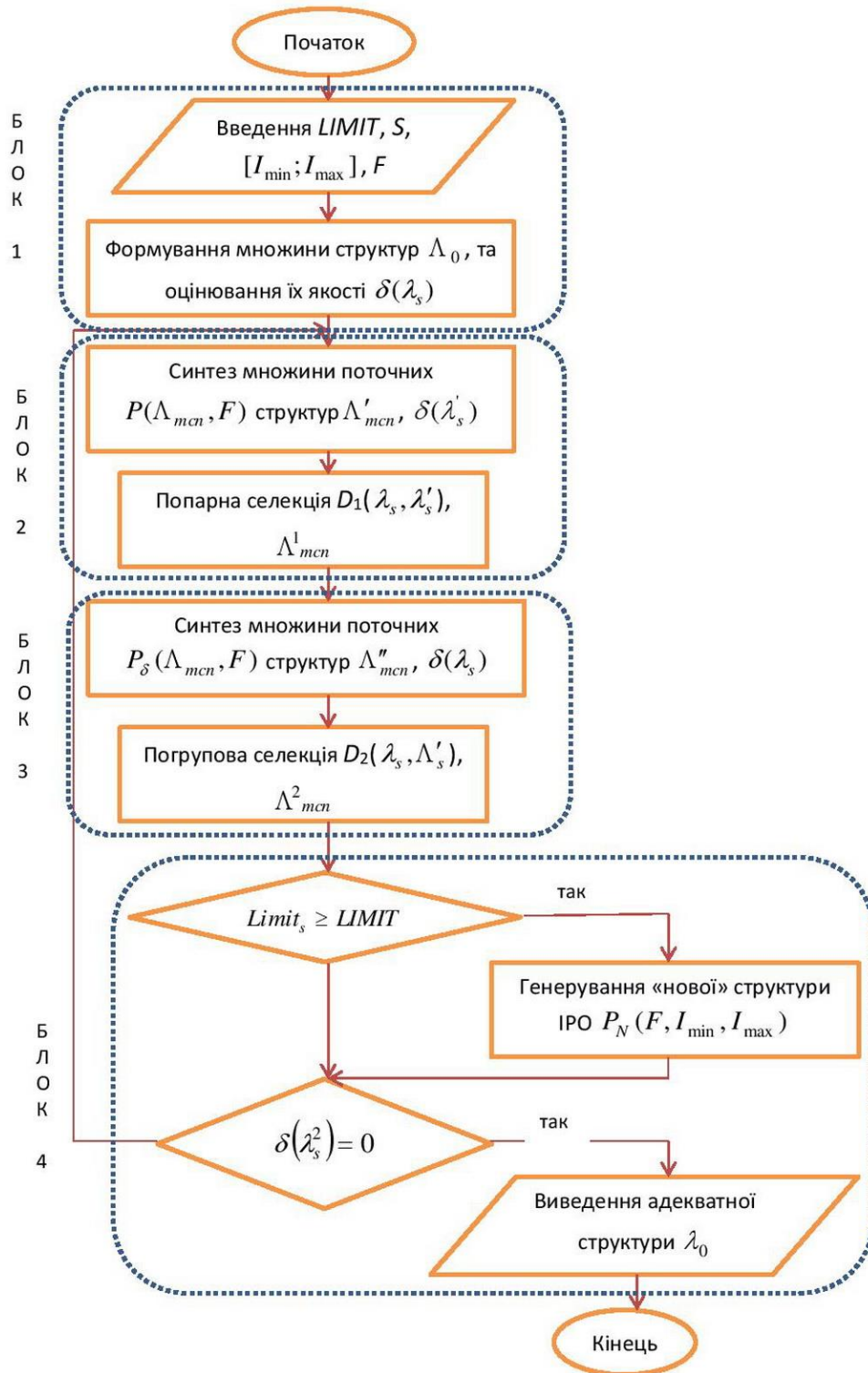


Рис. 2.3. Узагальнена схема послідовності перетворень структур IPO на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

Схема з рис. 2.3 розкриває суть взаємодії та послідовність виконання компонентів поведінкової моделі у контексті розв'язування задачі структурної ідентифікації.

«Блок 1» – ініціалізація початкових параметрів алгоритму. Задаємо значення таких змінних: $LIMIT$, S , $[I_{\min}; I_{\max}]$ та множину структурних елементів F . Далі формуємо початкову множину структур IPO Λ_0 (потужності S). Варто зазначити, що початкову множину структур IPO Λ_0 формуємо випадковим чином із набору структурних елементів F .

«Блок 2», синтез множини поточних структур IPO Λ'_{mcn} , здійснюємо шляхом перетворення множини структур Λ_{mcn} (mcn – номер поточної ітерації) у множину структур IPO Λ'_{mcn} . Таке перетворення здійснюємо за допомогою оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$. Далі проводимо попарну селекцію структур IPO із застосуванням оператора $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ та отримуємо множину найкращих структур Λ^1_{mcn} .

«Блок 3» – перетворення кожної структури λ_s^1 із множини структур Λ^1_{mcn} , у множину структур IPO Λ'_s (де $s=1\dots S$), шляхом заміни випадковим чином елементів кожної структури λ_s^1 елементами із набору F . Тоді позначимо за Λ''_{mcn} таке об'єднання множин $\Lambda''_{mcn} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$, $s=1\dots S$. Таким чином, за допомогою застосування оператора $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ отримуємо множину структур Λ''_{mcn} . Далі проводимо погрупову селекцію поточних структур IPO із застосуванням оператора $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$ та отримуємо множину «найкращих» структур Λ^2_{mcn} із поточних множин Λ^1_{mcn} і Λ''_{mcn} .

«Блок 4» – перевірка «вичерпаності» поточних структур IPO. Усі структури $\lambda_s^2 \in \Lambda^2_{mcn}$, для яких виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$, вважаємо

«вичерпаними». Якщо структура є «вичерпаною», то замінюємо її «новою», яку генеруємо на основі оператора $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$.

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

Подана на рис. 2.2 узагальнена схема реалізує перетворення структур IPO за допомогою операторів $P(\Lambda_{mcn}, F)$, $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$, $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ та шляхом проведення процедур селекції за допомогою операторів $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$, $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$ у такий спосіб, щоб забезпечити зменшення на кожній ітерації значень функції мети (2.4).

Тоді формально виконання таких перетворень на кожній ітерації узагальненої схеми можна записати у вигляді послідовності згенерованих ІСНАР та оцінок показників $\delta(G(\lambda_s))$ для кожної із них:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\widehat{v}_{0,0,0,0}^-; \widehat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]; \\ [\widehat{v}_{i,j,h,k}] = [f_1^{s1}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^{s1} + [f_2^{s1}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^{s1} + \dots + [f_{m_{s1}}^{s1}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_{s1}}^{s1}; \\ z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^{s1}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^{s1} + [f_2^{s1}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^{s1} + \dots + [f_{m_{s1}}^{s1}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_{s1}}^{s1} \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K, s1 = 1, \dots, S; \end{array} \right. \quad (2.5)$$

де $s1$ – індекс, який перелічує структури IPO λ'_s із множини Λ'_{mcn} , згенеровані на основі оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$;

$$\left\{ \begin{array}{l} [\widehat{v}_{0,0,0,0}^-; \widehat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]; \\ [\widehat{v}_{i,j,h,k}] = [f_1^{s2}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^{s2} + [f_2^{s2}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^{s2} + \dots + [f_{m_{s2}}^{s2}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_{s2}}^{s2}; \\ z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^{s2}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^{s2} + [f_2^{s2}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^{s2} + \dots + [f_{m_{s2}}^{s2}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_{s2}}^{s2} \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K, s2 = 1, \dots, S; \end{array} \right. \quad (2.6)$$

де $s2$ – індекс, який перелічує структури IPO із множини Λ_{mcn}'' , згенеровані на основі оператора $P_{\delta}(\Lambda_{mcn}, F)$.

Крім того, для усіх структур IPO λ_s^2 із множини Λ_{mcn}^2 , таких що $Limit_s \geq LIMIT$, застосовуємо оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ та формуємо ІСНАР:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\widehat{v}_{0,0,0,0}^-; \widehat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \widehat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]; \\ [\widehat{v}_{i,j,h,k}] = [f_1^{s3}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^{s3} + [f_2^{s3}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^{s3} + \dots + [f_{m_{s3}}^{s3}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_{s3}}^{s3}; \quad (2.7) \\ z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^{s3}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_1^{s3} + [f_2^{s3}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_2^{s3} + \dots + [f_{m_{s3}}^{s3}(\bullet)] \cdot \widehat{g}_{m_{s3}}^{s3} \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ \quad i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K; \end{array} \right.$$

де $s3$ – індекс, який перелічує ті структури IPO λ_s^2 із множини Λ_{mcn}^2 , для яких виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$.

Таким чином, запропоновано здійснювати перетворення набору ІСНАР (2.5) у набір (2.6), а (2.6) у випадку виконання умови $Limit_s \geq LIMIT$ у певний набір (2.7). Послідовність таких перетворень необхідно здійснювати доки серед набору не отримаємо хоча б однієї сумісної ІСНАР. Така ІСНАР відповідає набору структурних елементів для побудови адекватної математичної моделі з гарантованими прогностичними властивостями.

Застосування такої послідовності перетворень забезпечує ряд переваг у порівнянні з генетичними алгоритмами. Зокрема множина всіх структурних елементів F є доступною протягом усього процесу перетворень структур IPO. Це забезпечує наступне: потужність початкової множини структур IPO не залежить від потужності множини структурних елементів, що дозволяє нівелювати залежність обчислювальної складності реалізації методу від потужності множини структурних елементів; крім того, це дозволяє знизити

ризик втрати значущих елементів математичної моделі під час попарної чи погрупової селекції.

Формування «нових» варіантів структур IPO на основі однієї структури шляхом часткової заміни її компонентів дозволяє нівелювати необхідність розробки нестандартних операторів для схрещування двох структур математичних моделей, що суттєво спрощує процес розробки методу структурної ідентифікації.

Пропорційний розподіл кількості «нових» структур, на фазі активності бджіл-дослідників означає, що в ділянках області значень функції мети, які характеризуються нижчими значеннями (тобто існує ймовірність, що вона знаходиться в околі точки мінімуму функції мети), дослідження проводяться інтенсивніше. Це дозволяє швидше знайти розв'язок задачі чи визначити, що ця ділянка містить локальний мінімум функції мети.

Застосування критерію «вичерпаності» дозволяє уникати локальних мінімумів складної багатоекстремальної функції мети. Адже якщо структура ідентифікована як вичерпана (її модифікації не призводять до зниження значень функції мети), то в просторі пошуку розв'язків задачі вона є точкою в ділянці з локальним мінімумом функції мети. У цьому випадку така структура відкидається та формується «якісно» нова, що, з одного боку, дозволяє уникати локальних мінімумів, а з іншого – забезпечує розширення простору пошуку розв'язків задачі без підвищення обчислювальної складності застосування методу структурної ідентифікації.

Порівняння наведених формальних перетворень структур IPO з перетвореннями, які використовують в генетичних алгоритмах, показує, що застосування аналогій з поведінковими моделями бджолоїної колонії під час розв'язування задачі структурної ідентифікації IPO націлене на більш «глибоке» перетворення структур моделей з одночасним зменшенням кількості оцінювань значень функції мети, що дає можливість уникнути



складних обчислювальних процедур оцінювання розв'язків значної кількості ІСНАР.

2.3 Розширення простору пошуку оптимальних структур у задачі структурної ідентифікації математичних моделей

Послідовність перетворень структур ІРО, запропонована у попередньому підрозділі, на відміну від послідовності таких перетворень у методах на основі генетичних алгоритмів, орієнтована на більш «глибоке» перетворення структур моделей. Це забезпечує можливість швидкого виявлення ділянок з локальними мінімумами функції мети та пошуку серед них ділянки з глобальним екстремумом функції мети. Через це, побудова методу структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО на основі зазначеної послідовності перетворень дозволить знизити обчислювальну складність пошуку розв'язку оптимізаційної задачі (2.4) у порівнянні з генетичними алгоритмами.

Розглянемо детальніше теоретичні особливості покриття простору розв'язків задачі відомими методами на основі генетичних алгоритмів та методом, який запропоновано побудувати із використання узагальненої схеми перетворень на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (далі, метод на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії).

У всіх евристичних алгоритмах початкову популяцію особин генерують випадковим чином. На рис. 2.2 схематично показано область значень функції мети задачі структурної ідентифікації та згенеровану початкову популяцію потенційних розв'язків.

На рис. 2.4 елемент  позначає глобальний мінімум функції мети $\delta(\lambda_s)$, а елемент  - згенерований потенційний розв'язок задачі, що у

випадку задачі структурної ідентифікації математичної моделі у вигляді ІРО означає поточну структуру λ_s .

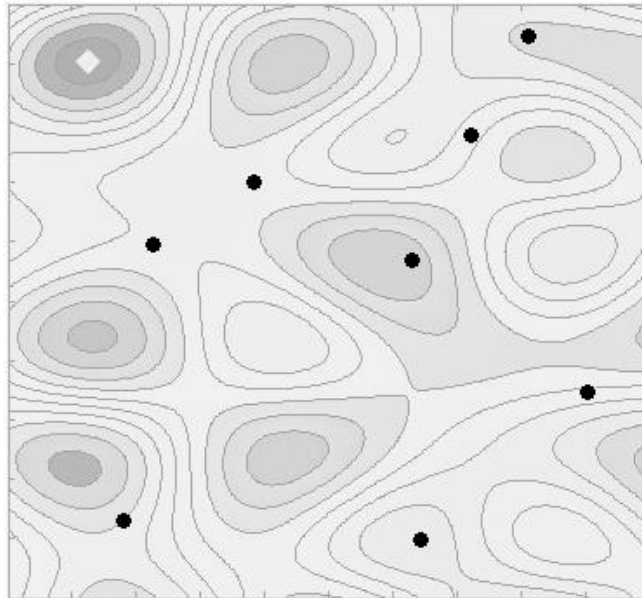


Рис. 2.4. Схематичне зображення покриття простору розв'язків задачі на початковій ітерації

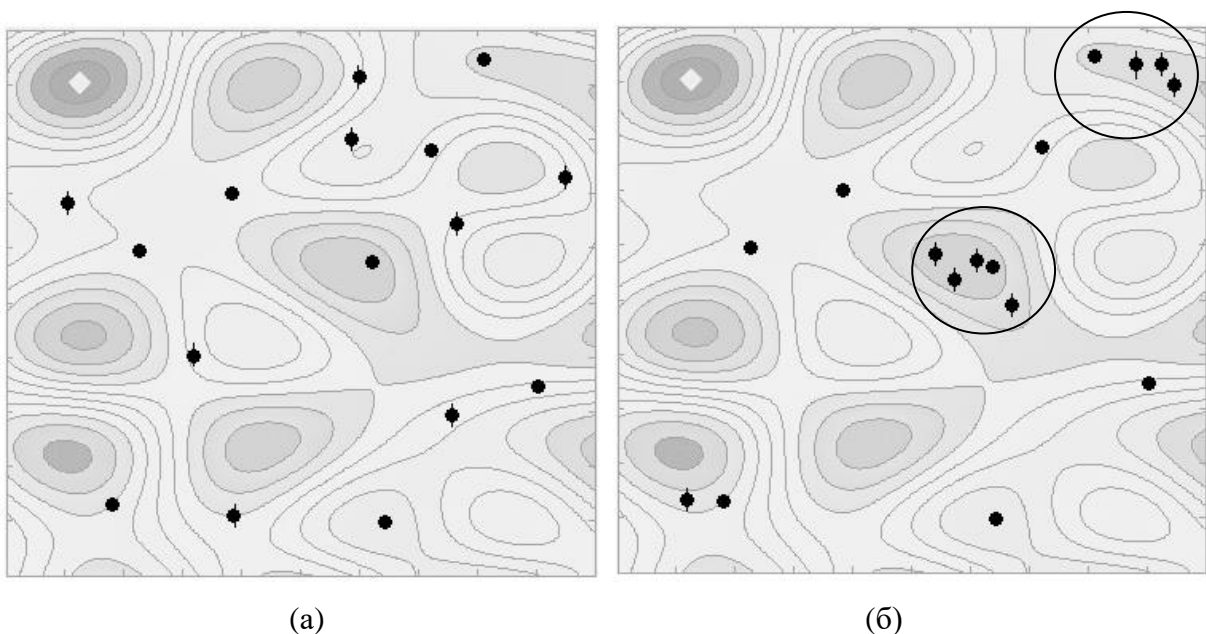




Рис. 2.5. Схематичне зображення покриття простору розв'язків задачі після генерування «нових» потенційних розв'язків відомим методом на основі генетичних алгоритмів (а), методом на основі поведінкових моделей бджолої колонії (б)

Зміна значень функції мети на рис. 2.4 показана за допомогою кольорових градацій, де, наприклад, колір  позначає найменші значення, а колір  - найбільші.

На рис. 2.5 показано розподіл згенерованих на основі початкової популяції «нових» потенційних розв'язків.

Саме такий розподіл потенційних розв'язків, отриманих на основі генетичних алгоритмів, на області розв'язків задачі відбувається через застосування генетичних операторів схрещування, де основою для формування «нових» структур є дві «структури-предки». Схематично процес генерування «нових» структур математичних моделей із застосуванням генетичних операторів проілюстровано на рис. 2.6.

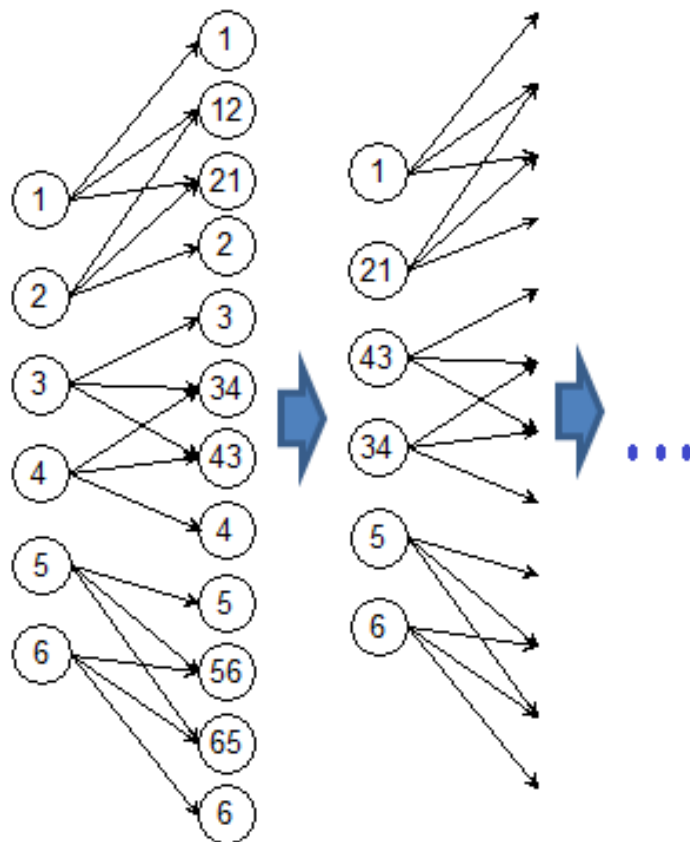


Рис. 2.6. Схема процедури генерування структур IPO в методі на основі генетичних алгоритмів

На рис. 2.6 елементами «1»–«6» позначено «структури-предки». У межах цього підходу генерування структур нащадків відбувається без урахування значень функції мети, якими характеризуються «структури-предки». На основі кожної пари «структур-предків» генерують відповідно пару «структур-нащадків» [41].

Наприклад, на рис. 2.6 для поточних структур «1» та «2» згенеровано дві «структури-нащадки»: «12», «21». У межах такого підходу «структури-предки» для схрещування обирають випадковим чином.

Застосування такого підходу до синтезу математичних моделей означає рівномірне дослідження всіх ділянок області розв'язків задачі незалежно від значень функції мети, якими вони характеризуються. Як уже зазначалося, у розглянутому методі структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів відсутній оператор мутації, який у класичному формулюванні генетичного алгоритму є механізмом для «виходу» з локальних мінімумів функції мети. Тому застосування цього методу структурної ідентифікації передбачає поступове рівномірне дослідження простору розв'язків задачі із низькою ймовірністю заміни досліджуваних ділянок.

Водночас застосування розроблених у цьому підрозділі дисертаційної роботи теоретичних основ для побудови методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії забезпечує розширення покриття простору пошуку розв'язків задачі без підвищення обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами. Таке розширення покриття забезпечуємо шляхом його неоднорідності, що схематично показано на рис. 2.5.

Неоднорідне та ширше покриття простору розв'язків задачі реалізуємо за рахунок використання аналогій з фазою активності бджіл-дослідників. Це означає, що ділянки простору пошуку розв'язків, які характеризуються меншими значеннями функції мети, будуть досліджуватися інтенсивніше,

ніж інші. Для цього проводимо процедуру генерування «нових» структур IPO на основі лише однієї «структури-предка» за допомогою оператора $P_{\delta}(\Lambda_{mcn}, F)$. Водночас кількість згенерованих на основі поточної структури IPO «структур-нащадків» прямо пропорційно залежить від значення функції мети $\delta(\lambda_s)$, яке обчислене для «структури-предка» та визначається значенням показника R_s . Тобто чим гірша «структура-предок», тим менше для неї генеруємо «структур-нащадків», а в іншому випадку – навпаки. Схематично процес генерування «структур-нащадків» проілюстровано на рис. 2.7.

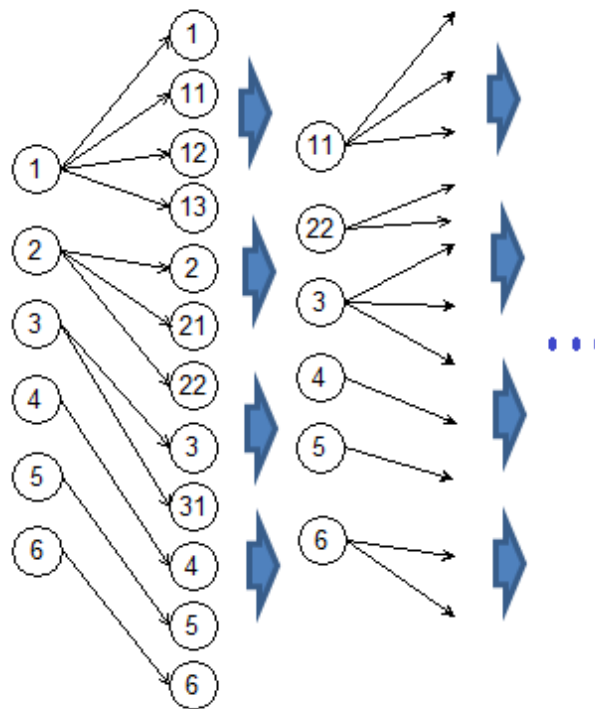
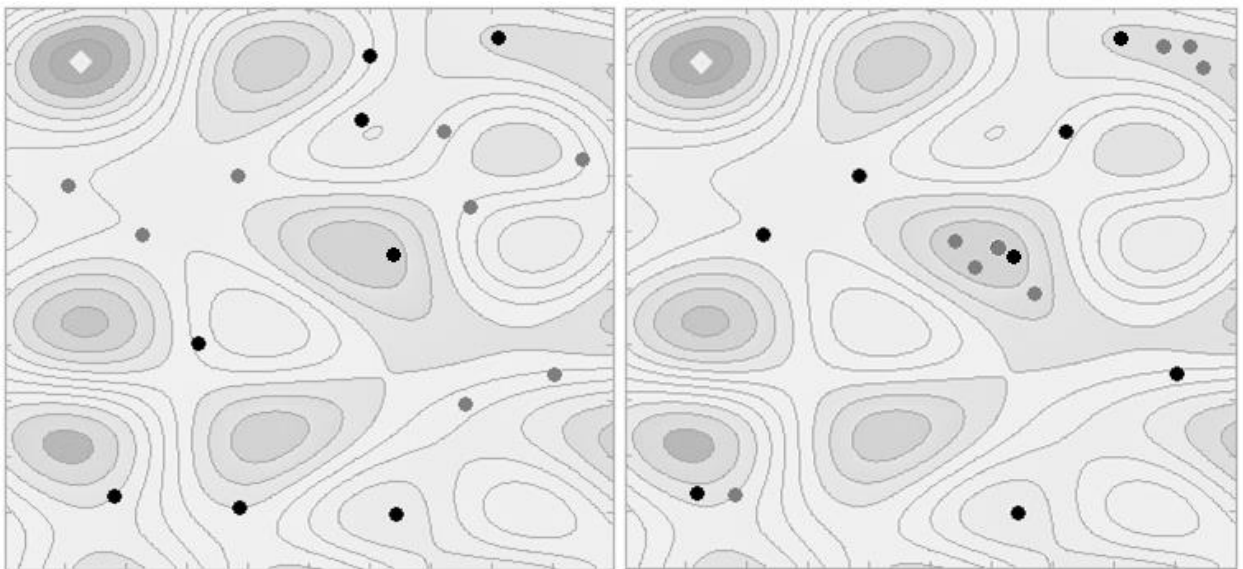


Рис. 2.7. Схема процедури генерування структур IPO в методі на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

На рис. 2.7 елементами «1»–«6» позначено «структури-предки», упорядковані за спаданням значення функції мети. Структура «1» краща за структуру «2», і відповідно на її основі буде згенеровано три «структури

нащадки» – «11», «12», «13»; тоді як для структури «2» лише дві – «21», «22». Водночас структури «4», «5» та «6» є гіршими у популяції, тому на їх основі не буде згенеровано жодної «структури-нащадка».

Далі проводимо селекцію кращих особин популяції, результати якої схематично показано на рис. 2.8. Селекцію проводимо на основі значень функції мети.



(a)

(б)

Рис. 2.8. Схематичне зображення покриття простору розв'язків задачі після проведення селекції у відомому методі на основі генетичних алгоритмів (а), у методі на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (б)

Як уже зазначалося у підрозділі 2.2, узагальнена схема перетворення структур IPO на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії реалізує механізм дослідження вичерпності джерел нектару (на фазі активності бджіл-розвідників).

Тобто наприкінці кожної ітерації узагальненої схеми перетворень структур IPO проводимо перевірку отриманої внаслідок селекції популяції кращих особин на їх вичерпаність за допомогою критерію $Limit_s \geq LIMIT$.

На рис. 2.9 схематично показано, що два потенційні розв'язки (структури IPO позначені елементами \circ) є вичерпаними. Тобто на їх основі було згенеровано кілька «нових» структур IPO, які характеризувалися не кращими значеннями функції мети, тобто не були обраними у результаті проведення процедури селекції. Це дало можливість виявити два локальних мінімуми функції мети із використанням оператора $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$. Натомість випадковим чином згенеровано дві «нові» структури IPO, позначені елементами \bullet на рис. 2.9.

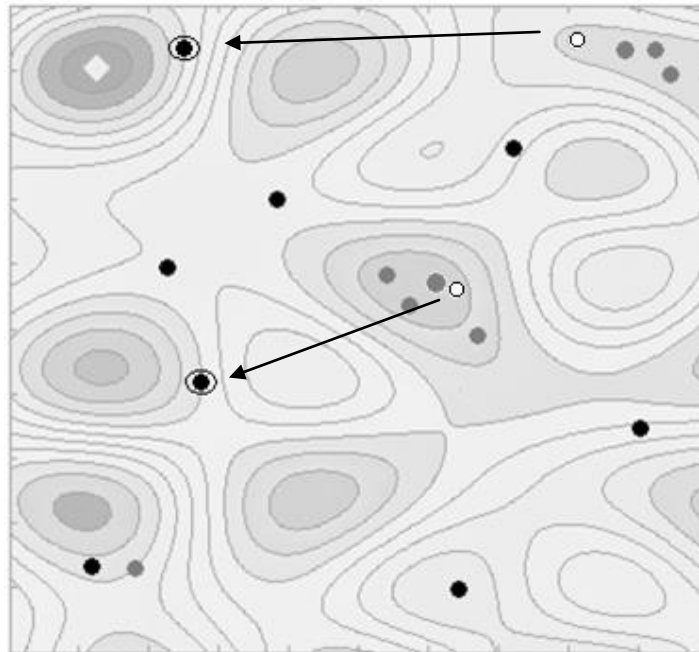



Рис. 2.9. Схематичне зображення покриття області розв'язків задачі після виявлення ділянок із локальними мінімумами методом на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

Реалізація фази активності бджіл-розвідників створює ефективний механізм для виявлення та уникнення локальних мінімумів функції мети за рахунок припинення дослідження тих ділянок області розв'язків, у якій не простежується зниження значення функції мети. Одночасно припинення дослідження відбуватиметься не залежно від значення функції мети, яким

характеризується поточна структура IPO. Тобто навіть якщо структура моделі у вигляді IPO характеризується низьким значенням функції мети, але така, що не забезпечує можливість генерування структур IPO із нижчими значеннями функції мети, то вона вважається вичерпаною.

На наступній ітерації знову відбувається генерування «нових» потенційних розв'язків, тобто структур IPO.

На рис. 2.10 елементи  означають згенеровані на поточній ітерації застосування методів структурної ідентифікації «структури-нащадки».

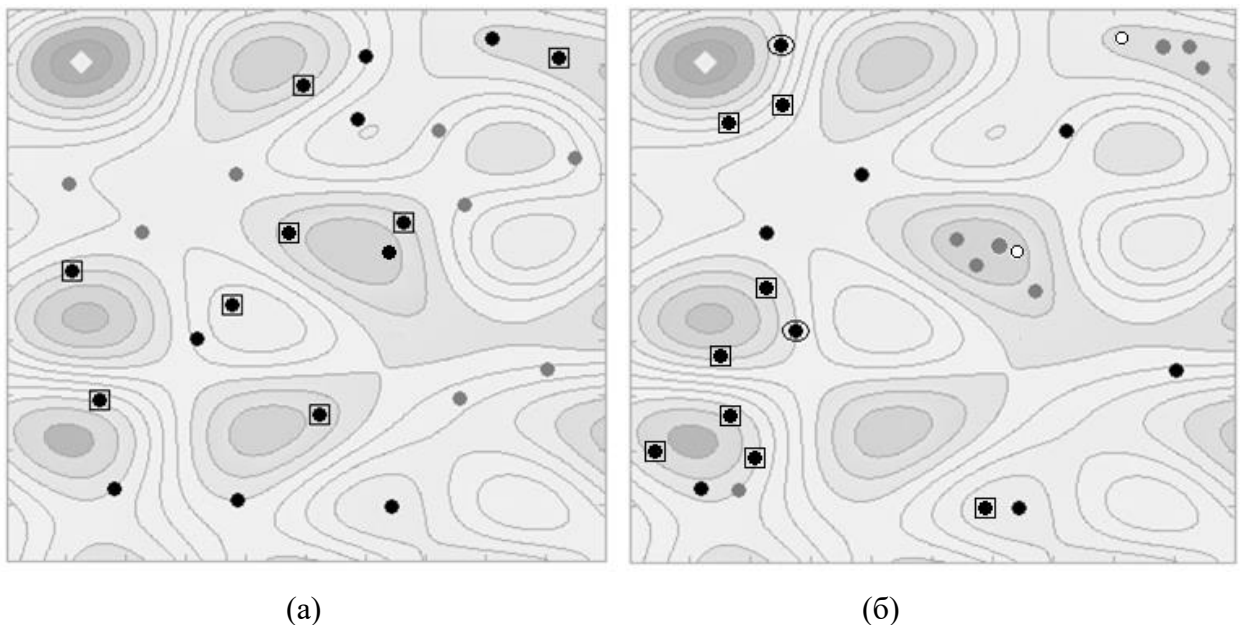


Рис. 2.10. Схематичне зображення покриття області розв'язків задачі на наступній ітерації відомого методу на основі генетичних алгоритмів (а), методу на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (б)

Отже, застосування поведінкових моделей бджолоїної колонії для побудови методу структурної ідентифікації IPO забезпечить розширення покриття області розв'язків задачі структурної ідентифікації та ефективний механізм для виявлення локальних мінімумів функції мети. У підсумку це пришвидшить процес пошуку глобального мінімуму функції мети, як видно з рис. 2.10.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Досліджено біологічні особливості поведінки бджолоїної колонії у процесі пошуку їжі (нектару). Визначено основні компоненти поведінкової моделі бджолоїної колонії та встановлено зв'язки між ними. Встановлено основні аналогії між поведінковою моделлю і основними процедурами методу структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді IPO.

2. Розроблено теоретичні основи застосування принципів ройового інтелекту для розв'язування задачі структурної ідентифікації IPO. Зокрема проведено поєднання методів інтервального аналізу даних та компонентів поведінкової моделі бджолоїної колонії, що забезпечило можливість сформулювати узагальнену схему послідовності перетворень IPO для знаходження глобального екстремуму складеної функції мети задачі структурної ідентифікації.

3. Теоретично доведено, що застосування узагальненої схеми послідовності перетворень IPO на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії для побудови методу структурної ідентифікації забезпечить ширше покриття області розв'язків задачі без підвищення обчислювальної складності та створить ефективний механізм для локалізації локальних мінімумів функції мети.

РОЗДІЛ 3

МЕТОД ТА АЛГОРИТМ СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНОГО РІЗНИЦЕВОГО ОПЕРАТОРА НА ОСНОВІ ПОВЕДІНКОВИХ МОДЕЛЕЙ БДЖОЛИНОЇ КОЛОНІЇ

У попередньому розділі дисертаційної роботи розроблено теоретичні основи побудови методу структурної ідентифікації на основі поєднання поведінкових моделей бджолоїної колонії та аналізу інтервальних даних. Теоретично обґрунтовано, що застосування принципів ройового інтелекту для розв'язування задачі структурної ідентифікації забезпечить зниження обчислювальної складності розв'язування задачі структурної ідентифікації та розширення покриття простору розв'язків.

У цьому розділі дисертаційної роботи розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення методу структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та нейроподібну обчислювальну схему його реалізації. Проведено порівняльний аналіз методів структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів з модифікованими операторами схрещування та селекції та на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Матеріали цього розділу дисертаційної роботи опубліковані автором у працях [21-25, 111, 112, 114].

3.1 Метод структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

Базуючись на розробленій у попередньому розділі узагальнені схемі перетворень, перейдемо безпосередньо до розробки методу структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді

інтервальних різницевих операторів на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Для застосування методу структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії задаємо наступні значення:

- MCN – максимальна кількість ітерацій;
- $LIMIT$ – максимальна можлива кількість ітерацій «незмінності» структури, тобто якщо поточна структура IPO не оновлювалася вже $LIMIT$ разів, то вона вважається «вичерпаною»;
- S – початкова кількість структур IPO;
- $[I_{\min}; I_{\max}]$ – інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне I_{\min} та максимальне I_{\max} значення потенційної кількості структурних елементів у структурі IPO λ_s .
- F – множина всіх структурних елементів.

Варто зазначити, що збіжність методу структурної ідентифікації та швидкість процесу синтезу структури математичної моделі залежать від вибору середовища моделювання [74], саме тому множина F повинна гарантовано включати усі елементи шуканої структури інтервального різницевого оператора. На жаль, навіть із застосуванням принципів теорії самоорганізації не можна стверджувати, що комп'ютерній програмі вдасться коректно сформулювати множину структурних елементів F , тому базисні функції та порядок IPO у методі структурної ідентифікації IPO повинні задаватись дослідником емпірично, із огляду на аналіз природи розв'язуваної задачі. Тому при застосуванні методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії необхідно формувати комбінації із множини елементів $\{v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-d,j-d,h-d,k-d}\}$ у відповідності до степеня IPO, тоді як комбінації з множини елементів $\{\bar{u}_{i,j,h,0}, \dots, \bar{u}_{i,j,h,k}\}$ потрібно генерувати з огляду на фізичний аналіз

модельованого реального процесу, для забезпечення умови зменшення обчислювальної складності розв'язування зазначеної задачі [107].

Виходячи із постановки задачі, унаслідок застосування методу структурної ідентифікації на m_{sp} -ї його ітерації (для якої виконується умова $m_{sp} \leq MCN$) повинна бути знайдена структура різницевого оператора λ_0 у вигляді (1.9), для якої виконується наступна рівність: $\delta(\lambda_0) = 0$.

На рис. 3.1 показано нейроподібну схему реалізації методу структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді IPO, побудованого на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.

У схемі реалізації методу структурної ідентифікації (див. рис. 3.1) блок «Ініціалізація» означає фазу ініціалізації початкових параметрів алгоритму та реалізується наступним чином: задаємо значення параметрів алгоритму MCN , $LIMIT$, S , $[I_{\min}; I_{\max}]$ та множину структурних елементів F . Далі формуємо початкову множину структур IPO Λ_0 (потужності S), що здійснюємо в такій послідовності, яку подано нижче.

1. Випадковим чином генеруємо кількість структурних елементів m_s для кожної структури IPO $\lambda_s \in \Lambda_0$:

$$m_s = rand([I_{\min}; I_{\max}]), s = 1 \dots S. \quad (3.1)$$

2. За допомогою оператора $P_{init}(\bullet)$, для кожної структури IPO λ_s формуємо вектор базисних функцій $\vec{f}^s(\bullet)$:

$$\vec{f}^s(\bullet) = P_{init}(m_s, F), s = 1 \dots S. \quad (3.2)$$

Кількість елементів вектора базисних функцій поточної структури IPO дорівнює m_s .

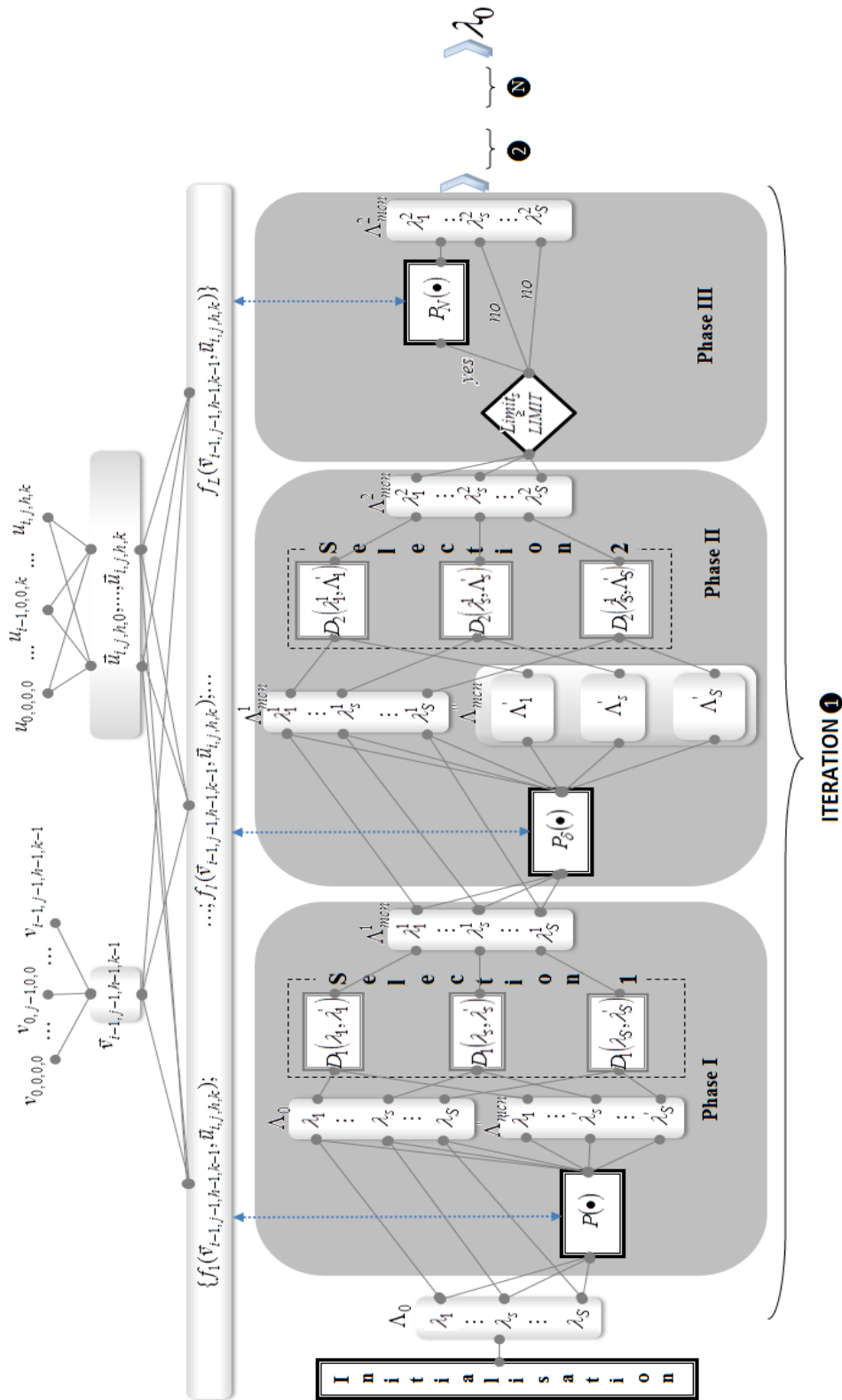


Рис. 3.1. Нейроподібна схема реалізації методу структурної ідентифікації

Варто зазначити, що оператор $P_{init}(\bullet)$ є процедурою випадкового вибору структурних елементів із множини F у кількості m_s .

3. Для кожної структури IPO λ_s (заданої множиною базисних функцій $\vec{f}^s(\bullet)$) проводимо процедуру налаштування вектора невідомих параметрів \vec{g}^s на основі методів параметричної ідентифікації, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку [70]. Унаслідок проведення етапу параметричної ідентифікації IPO для кожної поточної структури IPO λ_s отримуємо відомий вектор параметрів \hat{g}^s та значення показника якості структури λ_s – значення функції мети $\delta(\lambda_s)$.

4. Ініціалізація лічильника «критерію вичерпаності» структури IPO $limit_s=0$, де $\lambda_s \in \Lambda_{mcs}$, $s = 1 \dots S$ та ініціалізація лічильника ітерацій алгоритму $mcs=0$.

Тобто внаслідок проведення фази ініціалізації повинно бути задано значення всіх початкових параметрів алгоритму реалізації методу структурної ідентифікації IPO та повинна бути згенерована початкова множина структур IPO Λ_0 , де для кожної структури IPO $\lambda_s \in \Lambda_0$ можемо поставити у відповідність значення функції мети – $\delta(\lambda_s)$.

У схемі реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолої колонії «Фаза І» означає фазу активності робочих бджіл та реалізується у спосіб формування множини поточних структур IPO Λ'_{mcs} за такою формулою:

$$\Lambda'_{mcs} = P(\Lambda_{mcs}, F), \quad (3.3)$$

де оператор $P(\Lambda_{mcs}, F)$ здійснює перетворення множини структур Λ_{mcs} , згенерованих на ітерації алгоритму mcs , у множину структур IPO Λ'_{mcs} способом заміни випадковим чином n_s елементів кожної структури елементами із множини структурних елементів F . Кількість елементів, що потрібно замінити, обчислюємо за такою формулою:

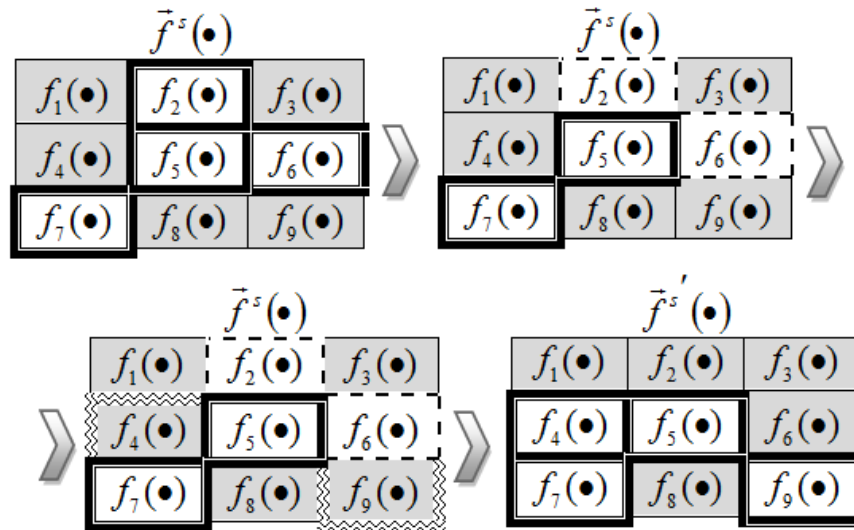
$$n_s = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \delta(\lambda_s) = \min \{\delta(\lambda_s) | s = 1 \dots S\} \text{ або } n_s = 0; \\ \text{int} \left(\left(1 - \frac{\min \{\delta(\lambda_s) | s = 1 \dots S\}}{\delta(\lambda_s)} \right) \cdot m_s \right), & \\ \text{якщо } \delta(\lambda_s) \neq \min \{\delta(\lambda_s) | s = 1 \dots S\} \text{ і } n_s \neq 0. \end{cases} \quad (3.4)$$

Для обчислення значення змінної n_s використовуємо вираз (3.4), що не враховує кількості елементів у поточній структурі IPO, а опирається лише на значення функції мети $\delta(\lambda_s)$, обчислене для поточної структури IPO λ_s . Показник n_s визначає кількість структурних елементів, що потрібно замінити у поточній структурі IPO, за таким принципом: чим нижча «якість» структури IPO, тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Водночас для найкращої структури IPO потрібно замінити мінімальну кількість елементів, тобто – 1. Необхідність заміни елементів навіть у «кращій» структурі IPO в поточній множині структур Λ_{mcn} обґрунтована потребою в перевірці критерію «вичерпаності» для кожної зі сформованих структур IPO.

Варто зазначити, що $|\Lambda_{mcn}| = |\Lambda'_{mcn}| = S$.

Схематично приклад процедури реалізації оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$ у виразі (3.3) показано на рис. 3.2.

На рис. 3.2 показано механізм трансформації поточної структури IPO λ_s із множини Λ_{mcn} , яку задано вектором базисних функцій із структурних елементів $\{f_2(\bullet), f_5(\bullet), f_6(\bullet), f_7(\bullet)\}$ та для якої обчислено значення показника $n_s=2$, у структуру λ'_s із множини Λ'_{mcn} шляхом заміни обраних випадковим чином структурних елементів $\{f_2(\bullet), f_6(\bullet)\}$ елементами, обраними з множини F аналогічним чином – $\{f_4(\bullet), f_9(\bullet)\}$. Унаслідок такого перетворення отримуємо вектор базисних $\vec{f}^{s'}$ (\bullet), що складається з множини структурних елементів $\{f_4(\bullet), f_5(\bullet), f_7(\bullet), f_4(\bullet)\}$ та однозначно визначає структуру IPO λ'_s .



- — структурні елементи з множини F , які не входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO;
- ▬ — структурні елементи з множини F , які входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO;
- - - — структурні елементи з множини F , які входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO та обрані для заміни;
- ⋈ — структурні елементи з множини F , які не входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO та обрані для заміни.

Рис. 3.2. Приклад виконання оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$ для s -ї структури IPO

$$\lambda_s \in \Lambda_{mcn}, \text{ де } |F|=9, m_s=4, n_s=2$$

Далі проводимо попарну селекцію структур IPO та формування множини найкращих структур. На рис. 3.1 попарна селекція структур IPO означає блок “Selection 1”. У блоці “Selection 1” оператор $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ реалізує процес синтезу множини «кращих» структур IPO Λ^1_{mcn} із поточних множин. Оператор $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ реалізує селекцію «кращих» структур для кожної пари структур на основі такого виразу:

$$\lambda_s^1 = \begin{cases} \lambda_s, & \text{якщо } (\delta(\lambda_s) \leq \delta(\lambda'_s)); \\ \lambda'_s, & \text{якщо } (\delta(\lambda_s) > \delta(\lambda'_s)); \end{cases} \quad (3.5)$$

де $\lambda_s \in \Lambda_{mcn}$, $\lambda'_s \in \Lambda'_{mcn}$, $\lambda_s^1 \in \Lambda^1_{mcn}$ $s = 1 \dots S$.

Крім того, у випадку виконання умови $\delta(\lambda_s) \leq \delta(\lambda'_s)$ інкрементуємо лічильник: $Limit_s = Limit_s + 1$, де $s = 1 \dots S$; а у випадку виконання умови $\delta(\lambda_s) > \delta(\lambda'_s)$ обнуляємо значення лічильника $Limit_s = 0$.

Таким чином, отримуємо множину структур IPO Λ^1_{mcn} першого ряду формування *mcn*-ої ітерації алгоритму.

У схемі реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (див. рис. 3.1) «Фаза II» означає фазу активності бджіл-дослідників, її реалізуємо способом формування множини поточних структур IPO Λ''_{mcn} з урахуванням «якості» структур:

$$\Lambda''_{mcn} = P_{\delta}(\Lambda^1_{mcn}, F), \quad (3.6)$$

де оператор $P_{\delta}(\Lambda_{mcn}, F)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 з множини структур Λ^1_{mcn} першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму *mcn*, у множини структур IPO Λ'_s (де $s = 1 \dots S$) способом заміни випадковим чином n_s елементів кожної структури λ_s^1 (використовуємо формулу (3.4)) елементами із множини структурних елементів F . Однак, на відміну від дії оператора $P(\Lambda_{mcn}, F)$ у формулі (3.3), оператор $P_{\delta}(\Lambda_{mcn}, F)$ у формулі (3.6) здійснює заміну лише для тих структур $\lambda_s^1 \in \Lambda^1_{mcn}$, для яких $R_s > 0$. Значення показника R_s для кожної структури обчислюємо за такою формулою:

$$R_s = ToInt \left(\frac{S \cdot (2 \cdot \max\{\delta(\lambda_1^1) | s = 1 \dots S\} - \delta(\lambda_s^1) - \delta(\lambda_{s-1}^1))}{\sum_{s=1}^S (\max\{\delta(\lambda_1^1) | s = 1 \dots S\} - \delta(\lambda_s^1))} - R_{s-1} \right), \quad s = 2 \dots S \quad (3.7)$$

та $R_1 = 0$, де операція $ToInt(\bullet)$ означає заокруглення до найближчого цілого значення. Зауважимо, що R_s означає кількість структур, які будуть згенеровані на базі s -ї структури із множини Λ_{mcs}^1 , де елементи множини Λ_{mcs}^1 повинні попередньо бути упорядкованими відповідно до спадання значення показника якості $\delta(\lambda_s^1)$.

Таким чином для кожної структури $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcs}^1$ буде сформовано множину структур Λ'_s , де $|\Lambda'_s| = R_s$, тобто якщо $R_s \neq 0$, то $\Lambda'_s = \{\lambda_1 \dots \lambda_r \dots \lambda_{R_s}\}$. Зауважимо, що Λ'_s може бути порожньою множиною. Позначимо за Λ''_{mcs} таке об'єднання множин:

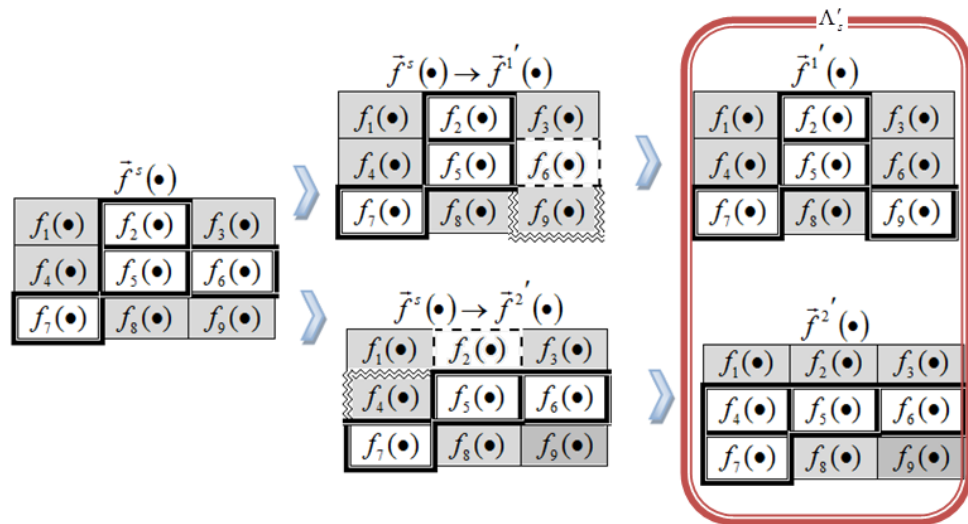
$$\Lambda''_{mcs} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}, s=1 \dots S. \quad (3.8)$$

Загальна кількість структур згенерованих оператором $P_\delta(\Lambda_{mcs}^1, F)$, дорівнюватиме S , тобто $|\Lambda_{mcs}^1| = |\Lambda''_{mcs}| = S$.

Ілюстрація прикладу виконання оператора $P_\delta(\Lambda_{mcs}^1, F)$ схематично показана на рис. 3.3.

На рис. 3.3 показано механізм формування множини Λ'_s для поточної структури IPO λ_s^1 із множини Λ_{mcs}^1 , яку задано вектором базисних функцій із таких структурних елементів: $\{f_2(\bullet), f_5(\bullet), f_6(\bullet), f_7(\bullet)\}$ та для якої обчислено значення величин $n_s = 1$, $R_s = 2$. Таким чином, на основі поточної структури IPO λ_s^1 генеруємо множину структур IPO Λ'_s (потужність множини $R_s = 2$) у вигляді $\Lambda'_s = \{\lambda_1, \lambda_2\}$.

Структури IPO λ_1 та λ_2 на рис. 3.3 задано відповідними наборами базисних функцій $\{f_2(\bullet), f_5(\bullet), f_7(\bullet), f_9(\bullet)\}$ та $\{f_4(\bullet), f_5(\bullet), f_6(\bullet), f_7(\bullet)\}$. Зауважимо, що ці набори сформовані шляхом часткової заміни елементів поточної структури IPO λ_s^1 у кількості $n_s = 1$.



— — структурні елементи з множини F , які не входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO;

— — структурні елементи з множини F , які входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO;

- - - — структурні елементи з множини F , які входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO та обрані для заміни;

~~~~~ — структурні елементи з множини  $F$ , які не входять у вектор базисних функцій поточної структури IPO та обрані для заміни.

Рис. 3.3. Приклад виконання оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcn}^1, F)$  для  $s$ -ї структури IPO

$$\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1, \text{ де } |F|=9, m_s=4, n_s=1, R_s=2$$

Таким чином, після виконання оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$  для усіх структур IPO  $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1, R_s \neq 0$  поточної ітерації методу, згенеровано непорожні множини  $\Lambda'_s$ , такі що  $\Lambda''_{mcn} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$ .

Далі, відповідно до нейроподібної схеми реалізації методу структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, переходимо на «Фазу II», де проводимо погрупову селекцію поточних структур IPO та формуємо множину «найкращих» структур  $\Lambda^2_{mcn}$ . У блоці “Selection 2” (див. рис. 3.1) оператор  $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$  реалізує процес синтезу множини структур IPO  $\Lambda^2_{mcn}$  із



поточних множин  $\Lambda_{mcp}^1$  та  $\Lambda_{mcp}''$  способом селекції структур IPO  $\lambda_s^2$  за значеннями функції мети:

$$\lambda_s^2 = \begin{cases} \lambda_s^1, & \text{якщо } (R_s = 0); \\ \lambda_s^1, & \text{якщо } ((\delta(\lambda_s^1) \leq \delta(\lambda_r)) \wedge (R_s \neq 0)), \\ & \forall \lambda_r \in \Lambda'_s, r = 1 \dots R_s; \\ \lambda_r^s, & \text{якщо } ((\delta(\lambda_s^1) > \delta(\lambda_r)) \wedge (R_s \neq 0)), \\ & \exists \lambda_r \in \Lambda'_s, r = 1 \dots R_s. \end{cases} \quad (3.9)$$

Крім того, у випадку виконання умови:  $R_s = 0$  або  $((\delta(\lambda_s^1) \leq \delta(\lambda_r)) \wedge (R_s \neq 0))$ , – інкрементуємо лічильник  $Limit_s = Limit_s + 1$ , де  $s = 1 \dots S$ . У випадку ж виконання умови  $((\delta(\lambda_s^1) > \delta(\lambda_r)) \wedge (R_s \neq 0))$  обнуляємо значення лічильника  $Limit_s = 0$ .

Таким чином, отримуємо множину структур IPO  $\Lambda_{mcp}^2$  другого ряду формування *mcp*-ої ітерації алгоритму.

У схемі реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолої колонії (див. рис. 3.1) «Фаза III» означає фазу активності бджіл-розвідників, тобто перевірку «критерію відмови» (бджоли покидають вичерпані джерела нектару).

На «Фазі III», для усіх поточних структур IPO  $\lambda_s^2 \in \Lambda_{mcp}^2$ , перевіряємо умову  $Limit_s \geq LIMIT$ , якщо ця нерівність справджується, тоді  $\lambda_s^2 = P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  і одночасно  $Limit_s = 0$ ,  $s = 1 \dots S$ .

Оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  означає генерування випадковим чином структури  $\lambda_s^2$  із множини всіх структурних елементів  $F$ , де кількість структурних елементів –  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ . Варто зазначити, що при формуванні «нової» структури IPO оператором  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ , йому доступні всі структурні елементи із множини  $F$ . Для кожної із сформованих

структур  $\lambda_s^2$  обчислюємо значення функції мети  $\delta(\lambda_s^2)$ . Якщо знайдено структуру, для якої  $\delta(\lambda_s^2) = 0$ , то переходимо на *крок «STOP»*, в іншому випадку переходимо на «Фазу II».

**Крок «STOP».** Виведення структури IPO, для якої  $\delta(\lambda_s^2) = 0$ .

### **3.2 Приклад застосування методу структурної ідентифікації інтервальних моделей на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії для моделювання процесу розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії сушіння**

Розглянемо особливості організації технологічного процесу виробництва гіпсокартону та контролю якості готової продукції. На рис. 3.4 проілюстровано загальний вигляді лінії з виробництва листів гіпсокартону стандартних розмірів, де товщина – 9,5мм, довжина – 2500мм та ширина – 1200мм.



Рис. 3.4. Лінія з виробництва листів гіпсокартону

Технологія виготовлення гіпсокартону містить такі етапи: підготовка водно-гіпсової суміші, формування та затвердіння полотна гіпсу в процесі переміщення на стрічковому конвеєрі, порізка полотна на листи, розподіл листів за допомогою консольного конвеєра, сушіння листів у сушарці з подальшим вивантаженням, контролем якості та складуванням.

Одною із основних характеристик, на основі якої можна встановити якість гіпсокартону, є розподіл вологості на кінцевій стадії виготовлення листа, процесі сушіння [70]. Прилади для вимірювання вологості на поверхні листа відзначаються точністю в межах 5%. Тому в процесі ідентифікації моделі необхідним є виконання умови, за якої інтервальні оцінки прогнозованого значення відносної вологості були в межах цієї похибки.

Крім того, значення відносної вологості на поверхні листів для забезпечення виробництва якісної продукції повинні належати інтервалу від 0,6% до 0,9%, бо в іншому випадку продукцію вважають бракованою. У таблиці 3.1 [70] подано вимірні значення вологості на поверхні листів гіпсокартону для заданих технологічних чинників.

Таблиця 3.1

Вимірні значення відносної вологості  $z_{i,j,k}$  на листі гіпсокартону для заданих технологічних чинників

| $u_{1,0} = 120^\circ, u_{2,0} = 0.25 \text{ м/хв.}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $I \backslash j$                                    | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| 0                                                   | 0,6  | 0,63 | 0,66 | 0,66 | 0,68 | 0,65 | 0,62 | 0,61 |
| 1                                                   | 0,68 | 0,74 | 0,78 | 0,82 | 0,85 | 0,83 | 0,79 | 0,71 |
| 2                                                   | 0,72 | 0,78 | 0,82 | 0,85 | 0,86 | 0,82 | 0,78 | 0,73 |
| 3                                                   | 0,62 | 0,63 | 0,68 | 0,7  | 0,71 | 0,67 | 0,66 | 0,65 |
| $u_{1,1} = 125^\circ, u_{2,1} = 0.28 \text{ м/хв.}$ |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $i \backslash j$                                    | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
| 0                                                   | 0,71 | 0,75 | 0,76 | 0,79 | 0,79 | 0,75 | 0,73 | 0,69 |
| 1                                                   | 0,76 | 0,8  | 0,87 | 0,91 | 0,96 | 0,94 | 0,89 | 0,82 |
| 2                                                   | 0,78 | 0,89 | 0,93 | 0,97 | 0,98 | 0,96 | 0,88 | 0,82 |
| 3                                                   | 0,73 | 0,75 | 0,78 | 0,79 | 0,8  | 0,77 | 0,76 | 0,71 |

У таблиці 3.1 наведено результати вимірювань вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння для заданих технологічних чинників (температури у сушильній камері:  $u_{1,0}=120^\circ$ ,  $u_{1,k=1}=125^\circ$  та швидкості переміщення у сушильній камері  $u_{2,0}=0.25$  м/хв.,  $u_{2,k=1}=0.28$  тм/хв.), де  $i, j$  – координати точки на поверхні листа.

Проведемо процедуру структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння, використовуючи ці результати вимірювань. Для синтезу структури математичної моделі у вигляді ІРО за допомогою методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колоній згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L=80$ . Згенеровану множину структурних елементів  $F$  подано у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Множина структурних елементів  $F$  моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння

| №  | Структурний елемент                                                                   | №  | Структурний елемент                                       |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------|
| 1  | $v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$                     | 41 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$     |
| 2  | $v_{i,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$                     | 42 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$     |
| 3  | $v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$                   | 43 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$   |
| 4  | $v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$                     | 44 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$   |
| 5  | $v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$                   | 45 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$     |
| 6  | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$     | 46 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$   |
| 7  | $v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$     | 47 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$   |
| 8  | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   | 48 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$   |
| 9  | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   | 49 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$ |
| 10 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$     | 50 | $v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$   |
| 11 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   | 51 | $v_{i-1,j} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                     |
| 12 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   | 52 | $v_{i,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                     |
| 13 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   | 53 | $v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                   |
| 14 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$ | 54 | $v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                     |

## Продовження таблиці 3.2

| №  | Структурний елемент                                                                 | №  | Структурний елемент                                             |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------|----|-----------------------------------------------------------------|
| 15 | $v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$ | 55 | $v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                         |
| 16 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j}$                                                         | 56 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$           |
| 17 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2}$                                                         | 57 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$           |
| 18 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1}$                                                       | 58 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$         |
| 19 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2}$                                                       | 59 | $v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$         |
| 20 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2}$                                                         | 60 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$           |
| 21 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1}$                                                       | 61 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$         |
| 22 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2}$                                                       | 62 | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$         |
| 23 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2}$                                                       | 63 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$         |
| 24 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2}$                                                     | 64 | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$       |
| 25 | $v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2}$                                                       | 65 | $v_{i,j-2} \cdot v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$         |
| 26 | $v_{i-1,j}^2$                                                                       | 66 | $v_{i-1,j}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   |
| 27 | $v_{i,j-1}^2$                                                                       | 67 | $v_{i,j-1}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   |
| 28 | $v_{i-1,j-1}^2$                                                                     | 68 | $v_{i-1,j-1}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$ |
| 29 | $v_{i,j-2}^2$                                                                       | 69 | $v_{i,j-2}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$   |
| 30 | $v_{i-1,j-2}^2$                                                                     | 70 | $v_{i-1,j-2}^2 (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k})$ |
| 31 | $v_{i-1,j}^2$                                                                       | 71 | $v_{i-1,j}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                         |
| 32 | $v_{i,j-1}^2$                                                                       | 72 | $v_{i,j-1}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                         |
| 33 | $v_{i-1,j-1}^2$                                                                     | 73 | $v_{i-1,j-1}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                       |
| 34 | $v_{i,j-2}^2$                                                                       | 74 | $v_{i,j-2}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                         |
| 35 | $v_{i-1,j-2}^2$                                                                     | 75 | $v_{i-1,j-2}^2 \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                       |
| 36 | $v_{i-1,j} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                                               | 76 | $v_{i-1,j}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                         |
| 37 | $v_{i,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                                               | 77 | $v_{i,j-1}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                         |
| 38 | $v_{i-1,j-1} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                                             | 78 | $v_{i-1,j-1}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                       |
| 39 | $v_{i,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                                               | 79 | $v_{i,j-2}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                         |
| 40 | $v_{i-1,j-2} \cdot (u_{1,0} / u_{2,0})$                                             | 80 | $v_{i-1,j-2}^2 \cdot (u_{1,k} / u_{2,k})$                       |

Початкові параметри методу задаємо наступним чином:  $MCN=100$ ,  $LIMIT=4$ ,  $S=10$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 8]$ . Далі, згідно з обчислювальною схемою

реалізації методу структурної ідентифікації моделі на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (див. рис. 3.1), випадковим чином генеруємо початкову множину структур IPO  $\Lambda_0$  та обчислюємо для кожної з них значення показника якості, тобто значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . Крім того, для усіх структур IPO  $\lambda_s \in \Lambda_0$  обчислюємо за формулою (3.4) кількість елементів, що потрібно замінити  $n_s$  та ініціалізуємо лічильник  $Limit_s$ . Таким чином, отримуємо початкову множину структур IPO  $\Lambda_0$  та обчислені для них значення  $\delta(\lambda_s)$ ,  $m_s$ ,  $n_s$ ,  $Limit_s$ , які подано в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Початкова множина структур IPO  $\Lambda_0$ 

| № пп | Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s$ , $s = 1 \dots S$ . | $\delta(\lambda_s)$ | $m_s$ | $n_s$ | $Limit_s$ |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-------|-----------|
| 1    | 2, 40, 27, 29, 24, 30                                                                                        | 0,1307              | 6     | 1     | 0         |
| 2    | 11, 25, 31, 64, 3, 51, 36,                                                                                   | 0,1518              | 8     | 3     | 0         |
| 3    | 61, 48, 31, 37                                                                                               | 0,2049              | 4     | 2     | 0         |
| 4    | 10, 29, 16, 38                                                                                               | 0,1175              | 4     | 1     | 0         |
| 5    | 10, 39, 41, 37                                                                                               | 0,0935              | 4     | 1     | 0         |
| 6    | 7, 39, 20, 37                                                                                                | 0,3217              | 4     | 2     | 0         |
| 7    | 7, 40, 26, 6, 53                                                                                             | 0,1587              | 5     | 2     | 0         |
| 8    | 7, 40, 25, 6, 27                                                                                             | 0,1565              | 5     | 2     | 0         |
| 9    | 7, 40, 25, 6, 27, 28, 29                                                                                     | 0,1272              | 7     | 1     | 0         |
| 10   | 2, 40, 25, 1, 27, 29                                                                                         | 0,1170              | 6     | 1     | 0         |

Далі реалізуємо «Фазу І» активності робочих бджіл. Для цього формуємо множину структур ІРО  $\Lambda'_{mcn=1}$  за допомогою оператора  $P(\Lambda_{mcn=1}, F)$ , для усіх структур  $\lambda'_s \in \Lambda'_1$  обчислюємо значення функції мети  $\delta(\lambda'_s)$ . Результати виконання вказаних операцій подано в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Множина структур ІРО  $\Lambda'_{mcn=1}$ 

| № пп | Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda'_s$ ,<br>$s = 1 \dots S$ . | $\delta(\lambda'_s)$ | $m'_s$ |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------|
| 1    | 2, 26, 27, 29, 24, 30                                                                                            | 0.7383               | 6      |
| 2    | 11, 29, 31, 26, 3, 51, 36, 53                                                                                    | 0.1260               | 8      |
| 3    | 1, 48, 31, 19                                                                                                    | 0.1616               | 4      |
| 4    | 10, 2, 16, 38                                                                                                    | 0.1145               | 4      |
| 5    | 10, 39, 41, 29                                                                                                   | 0.0649               | 4      |
| 6    | 7, 39, 52, 63                                                                                                    | 0.1420               | 4      |
| 7    | 7, 40, 26, 27, 58                                                                                                | 0.1650               | 5      |
| 8    | 7, 50, 25, 6, 19                                                                                                 | 0.1094               | 5      |
| 9    | 7, 40, 35, 6, 27, 28, 29                                                                                         | 0.1176               | 7      |
| 10   | 2, 40, 79, 1, 27, 29                                                                                             | 0.3250               | 6      |

Далі згідно з нейроподібною обчислювальною схемою реалізації методу структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді ІРО на основі поведінкових моделей бджолої колонії (див. рис. 3.1), проводимо процедуру попарної селекції із множин  $\Lambda_0$  та  $\Lambda'_{mcn=1}$ . Для цього використовуємо дані з таблиць 3.3 та 3.4 та оператор попарної селекції  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  із виразу (3.5), який формує множину кращих структур ІРО  $\Lambda^1_{mcn=1}$  на основі значень функції мети структур із множин  $\Lambda_0$  та  $\Lambda'_{mcn=1}$ .

Після проведення процедури попарної селекції отримуємо множину структур ІРО першого ряду формування  $\Lambda_{mcn=1}^1$ . Результати реалізації цього етапу «Фази І» подано в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5

Множина структур ІРО першого ряду формування  $\Lambda_{mcn=1}^1$

| № пп | Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s^1$ ,<br>$s = 1 \dots S$ . | $\delta(\lambda_s^1)$ | $Limit_s$ |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
| 3    | 1, 48, 31, 19                                                                                                     | 0,1616                | 0         |
| 7    | 7, 40, 26, 6, 53                                                                                                  | 0,1587                | 1         |
| 6    | 7, 39, 52, 63                                                                                                     | 0,1420                | 0         |
| 1    | 2, 40, 27, 29, 24, 30                                                                                             | 0,1307                | 1         |
| 2    | 11, 29, 31, 26, 3, 51, 36, 53                                                                                     | 0,1260                | 0         |
| 9    | 7, 40, 35, 6, 27, 28, 29                                                                                          | 0,1176                | 0         |
| 10   | 2, 40, 25, 1, 27, 29                                                                                              | 0,1170                | 1         |
| 4    | 10, 2, 16, 38                                                                                                     | 0,1145                | 0         |
| 8    | 7, 50, 25, 6, 19                                                                                                  | 0,1094                | 0         |
| 5    | 10, 39, 41, 29                                                                                                    | 0,0649                | 0         |

Далі реалізуємо «Фазу ІІ» активності бджіл-дослідників. Для цього формуємо множину структур ІРО  $\Lambda_{mcn=1}''$  на основі оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ , де попередньо для кожної структури  $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn=1}^1$  обчислюємо потужність множини  $\Lambda'_s$ , як значення показника  $R_s$ , за формулою (3.7), таку що  $\Lambda_{mcn=1}'' = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$ .

Після цього для усіх структур інтервального різницевого оператора  $\lambda_r'$ ,  $r = 1 \dots R_s$  із множин  $\Lambda'_s$ ,  $s = 1 \dots S$  обчислюємо значення функції мети  $\delta(\lambda_r')$ . Результати реалізації зазначеного етапу «Фази ІІ», тобто структури ІРО із



множини  $\Lambda''_{mcn=1}$  та обчислені для них значення функції мети подано у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Множина структур IPO  $\Lambda''_{mcn=1}$  та оцінені для них значення функції мети

| № пп | Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s^1 \in \Lambda''_{mcn=1}$ | $R_s$ | Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_r \in \Lambda'_s$ , $r = 1 \dots R_s$ . | $\delta(\lambda_r)$ |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|
| 3    | 1, 48, 31, 19                                                                                                    | 0     | $\emptyset$                                                                                                                   | -                   |
| 7    | 7, 40, 26, 6, 53                                                                                                 | 0     | $\emptyset$                                                                                                                   | -                   |
| 6    | 7, 39, 52, 63                                                                                                    | 1     | 7, 66, 77, 63                                                                                                                 | 0.1687              |
| 1    | 2, 40, 27, 29, 24, 30                                                                                            | 1     | 3, 40, 27, 16, 53, 30                                                                                                         | 0.1403              |
| 2    | 11, 29, 31, 26, 3, 51, 36, 53                                                                                    | 1     | 11, 27, 31, 26, 60, 51, 36, 70                                                                                                | 0.0787              |
| 9    | 7, 40, 35, 6, 27, 28, 29                                                                                         | 1     | 7, 66, 35, 25, 27, 2, 29                                                                                                      | 0.2769              |
| 10   | 2, 40, 25, 1, 27, 29                                                                                             | 1     | 2, 36, 25, 67, 27, 29                                                                                                         | 0.0870              |
| 4    | 10, 2, 16, 38                                                                                                    | 1     | 10, 2, 16, 29                                                                                                                 | 0.051               |
| 8    | 7, 50, 25, 6, 19                                                                                                 | 1     | 7, 80, 25, 6, 32                                                                                                              | 0.0472              |
| 5    | 10, 39, 41, 29                                                                                                   | 3     | 10, 45, 41, 29                                                                                                                | 0.0816              |
|      |                                                                                                                  |       | 10, 39, 41, 27                                                                                                                | 0.0854              |
|      |                                                                                                                  |       | 10, 3, 41, 29                                                                                                                 | 0.0439              |

На основі оператора  $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$  із формули (3.9) проводимо погрупову селекцію структур IPO із множин  $\Lambda''_{mcn=1}$  та  $\Lambda^1_{mcn=1}$  на основі значень функції мети і отримуємо множину структур IPO другого ряду формування  $\Lambda^2_{mcn=1}$ . Результати реалізації цього етапу «Фази II» подано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Множина структур IPO  $\Lambda_{mcn=1}^2$  та оцінені для них значення функції мети  $\delta(\lambda_s^2)$

| №<br>пп | Порядкові номери структурних елементів із множини $F$ , що задають структури $\lambda_s^2$ , $s = 1 \dots S$ . | $\delta(\lambda_s^2)$ | $Limit_s$ |
|---------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------|
| 3       | 1, 48, 31, 19                                                                                                  | 0.1616                | 1         |
| 7       | 7, 40, 26, 6, 53                                                                                               | 0.1582                | 2         |
| 6       | 7, 39, 52, 63                                                                                                  | 0.1420                | 1         |
| 1       | 2, 40, 27, 29, 24, 30                                                                                          | 0.1307                | 2         |
| 2       | 11, 27, 31, 26, 60, 51, 36, 70                                                                                 | 0.0787                | 0         |
| 9       | 7, 40, 35, 6, 27, 28, 29                                                                                       | 0.1176                | 1         |
| 10      | 2, 36, 25, 67, 27, 29                                                                                          | 0.0870                | 0         |
| 4       | 10, 2, 16, 29                                                                                                  | 0.051                 | 0         |
| 8       | 7, 80, 25, 6, 32                                                                                               | 0.0472                | 0         |
| 5       | 10, 3, 41, 29                                                                                                  | 0.0439                | 0         |

Далі реалізуємо «Фазу III» активності бджіл-розвідників, що означає наступне: перевіряємо «критерій відмови» (бджоли покидають вичерпані джерела нектару). Однак, як видно із таблиці 3.7 для жодної із структур IPO другого ряду формування не виконується умова  $Limit_s \geq LIMIT$  ( $LIMIT = 4$ ), а отже, оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  на першій ітерації методу не застосовуємо жодного разу. Таким чином, таблиця 3.7 задає множину поточних структур IPO  $\Lambda_{mcn=2}$  для проведення другої ітерації реалізації методу структурної ідентифікації.

У процесі досліджень із застосуванням методу структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді IPO на основі

поведінкових моделей бджолиної колонії для процесу розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії сушіння отримано ІРО в такому вигляді:

$$\begin{aligned} [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] &= 0.2269 - 0.0553 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - \\ &0.3643 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.1214 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] + \\ &1.0005 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+], \quad i=1 \dots 3, j=2 \dots 7, \end{aligned} \quad (3.10)$$

де  $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j,k=0}^-; \widehat{v}_{i,j,k=0}^+] \subset [z_{i,j,k=0}^-; z_{i,j,k=0}^+] = [z_{i,j,k=0}^- - z_{i,j,k=0}^- \cdot 0,01; z_{i,j,k=0}^- + z_{i,j,k=0}^- \cdot 0,01]$ ,  $\{i=0, j=0, \dots, 7\} \vee \{i=0, \dots, 3, j=0, \dots, 1\}$  – задані початкові умови;  $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+]$  – інтервальні значення відносної вологості в точці з дискретними координатами  $i, j$  на поверхні листа гіпсокартону для  $k$ -х умов технологічного процесу;  $u_{1,0}, u_{1,k}$  – температури в сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення відповідно;  $u_{2,0}, u_{2,k}$  – швидкості переміщення листа в сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення відповідно.

Водночас у праці [70] для розв’язування аналогічної задачі застосовано математичну модель у вигляді ІРО, структуру якої обрано з огляду на фізичні міркування, у такому вигляді:

$$\begin{aligned} [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] &= 0.35 + 0.079 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] + \\ &1.082 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] + 0.189 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - \\ &0.447 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] - 0.496 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + \\ &0.156 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] \quad i=1, \dots, 3, j=2, \dots, 7, \end{aligned} \quad (3.11)$$

де  $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j,k=0}^-; \widehat{v}_{i,j,k=0}^+] \subset [z_{i,j,k=0}^-; z_{i,j,k=0}^+] = [z_{i,j,k=0} - z_{i,j,k=0} \cdot 0,01; z_{i,j,k=0} + z_{i,j,k=0} \cdot 0,01]$ ,  $\{i=0, j=0, \dots, 7\} \vee \{i=0, \dots, 3, j=0, \dots, 1\}$  – задані початкові умови.

Порівнюючи математичні моделі у вигляді (3.10) та (3.11), бачимо, що отримана структура за допомогою формального підходу є простішою. Крім того, результати комп'ютерного моделювання показали, що ІРО отриманий як розв'язок задачі структурної ідентифікації, на відміну від ІРО (3.11), дає можливість досліджувати процес сушіння гіпсокартону при більшому діапазоні зміни чинників технологічного процесу.

### **3.3 Порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолиного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора**

У попередньому підрозділі детально розглянуто приклад застосування методу структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО на основі поведінкових моделей бджолиної колонії для побудови моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону. Показано, що застосування цього методу для синтезу математичних моделей має ряд переваг у порівнянні з вибором вигляду математичних моделей з огляду на лише фізичні міркування. Водночас метою цього підрозділу дисертаційної роботи є проведення порівняльного аналізу застосування запропонованого методу на основі поведінкових моделей бджолиної колонії та відомого методу на основі генетичних алгоритмів з модифікованими операторами схрещування та селекції. Порівняльний аналіз будемо проводити на прикладі розв'язування задачі структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону, розглянутої у попередньому підрозділі.

Із постановки задачі поданої у першому розділі дисертаційної роботи

видно, що найскладнішою процедурою в обох методах структурної ідентифікації є процедура обчислення значення функції мети для поточної структури IPO –  $\delta(\lambda_s)$ . У праці [68] наведено результати досліджень, які показують, що ефективність алгоритмів структурної ідентифікації можна визначити за кількістю обчислень значень показника  $\delta(\lambda_s)$ , який визначає функцію мети в задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора. У процесі досліджень було проведено 50 обчислювальних експериментів. Для порівняння враховано два показники: простоту моделі та обчислювальну складність застосування методу.

Для побудови моделей розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії сушіння із застосуванням обох методів структурної ідентифікації IPO, згенеровано упорядковану множину структурних елементів  $F$  у кількості  $L=160$ .

Варто зазначити, що кількість структурних елементів у множині  $F$  змінювалася в ході експериментів, тобто в 1 експерименті  $L=160$ , в 20 експерименті  $L=140$ , тоді як у 40 –  $L=80$  (див. таблицю 3.2). Множину структурних елементів, яка була використана під час експериментів №40-50, поподано у таблиці 3.2. Для множини  $F$  генерували структурні елементи, які містять поліноміальні функції не вищі від другого степеня для різницевого оператора не вищого від другого порядку.

Для кожного з обчислювальних експериментів було задано однакові початкові умови для реалізації обох методів структурної ідентифікації IPO:  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 8]$  (інтервал  $[I_{\min}; I_{\max}]$ , що включає число  $m_s$ , яке задає кількість структурних елементів для поточної структури IPO); та початкова множина структур IPO у кількості  $S=10$ . Крім того, для реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолиної колонії:  $MCN=100$ ,  $LIMIT=4$ . Далі для кожного експерименту, випадковим чином генерували початкову множину структур IPO  $\Lambda_0$ , яка є однаковою для обох методів структурної ідентифікації у ході поточного експерименту.

Як уже зазначалося, задачу структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону у вигляді ІРО кожним із методів структурної ідентифікації розв'язували по 50 разів (за заданих аналогічних початкових умов). Обчислювальна складність застосування методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (ПМБК) та відповідно на основі генетичних алгоритмів (ГА) для 1, 20, 30, 40 та 50 проведених експериментів подана на рис. 3.5.

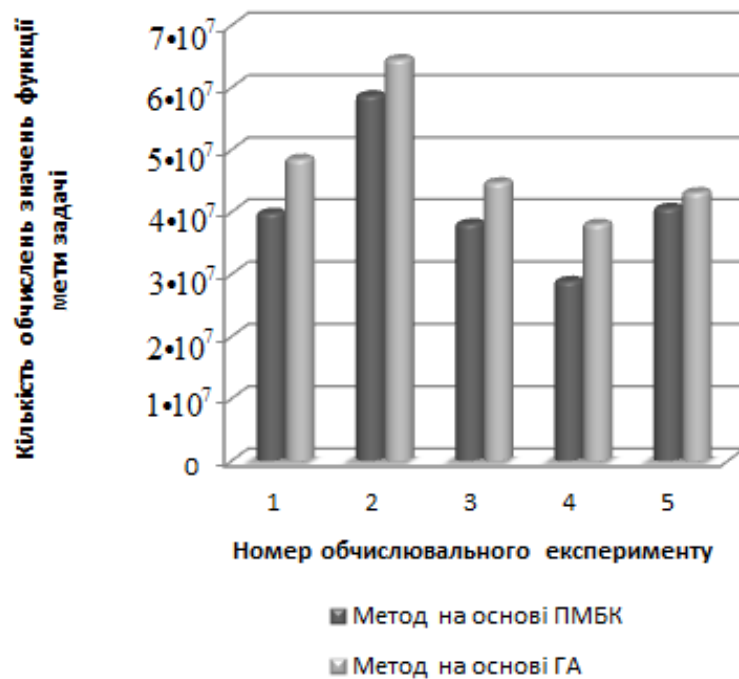


Рис. 3.5. Обчислювальна складність методів

Унаслідок проведення порівняльного аналізу встановлено, що обчислювальна складність застосування методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії щонайменше на 6% нижча, ніж на основі генетичних алгоритмів. Варто зазначити, що для переважної більшості експериментів обчислювальна складність застосування запропонованого методу нижча на 20%. У результаті проведених експериментів отримали структури ІРО, частину з яких подано у таблиці 3.8.

Таблиця 3.8

## Отримані структури ІРО

| № експерименту | Структура ІРО (метод на основі ПМБК)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Структура ІРО (метод на основі ГА)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1              | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.1923 - 0.2903 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - 0.4599 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.8333 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] + 0.6309 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+]$                                                                                                                                                                                     | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.4778 + 0.6946 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.1567 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - 0.3141 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.5684 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.3003 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+]$               |
| 20             | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.5173 - 0.2211 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] - 0.3606 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] + 0.6034 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.4728 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] + 0.8523 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.49 - 0.2202 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - 0.2726 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.6014 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.3622 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] + 0.6785 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$                 |
| 30             | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.1867 - 0.2779 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] - 0.4362 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.6187 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] + 0.8337 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.02 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$                                                        | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = -0.1482 + 0.0017 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] + 0.6253 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] + 0.9577 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.1629 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+] - 0.7161 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.2662 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+]$ |

Продовження таблиці 3.8

| № експерименту | Структура ІРО (метод на основі ПМБК)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Структура ІРО (метод на основі ГА)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 40             | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.49 -$ $0.1625 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $- 0.3164 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $+ 0.6008 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ $+ 0.6969 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ $- 0.4010 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+]$ | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.2072$ $- 0.0054 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ $- 0.4483 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+]$ $+ 0.6075 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+]$ $+ 0.8325 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ $- 0.2574 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $- 0.0366 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $- 0.0084 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+]$ |
| 50             | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.2031 -$ $0.2996 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $- 0.0299 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ $- 0.4483 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+]$ $+ 0.619 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+]$ $+ 0.8522 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$                                                             | $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = 0.2024 -$ $0.4503 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+]$ $+ 0.6084 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+]$ $+ 0.8286 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+]$ $- 0.2613 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $- 0.0331 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot$ $\cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+]$ $- 0.0006 \cdot [\widehat{v}_{i,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i,j-2,k}^+]$                                                                                                                                      |

Варто зазначити, що початкові умови для реалізації обох методів структурної ідентифікації моделей у вигляді ІРО бздавали таким чином:

$$[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] = (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i,j,k=0}^-; \widehat{v}_{i,j,k=0}^+] \subset [z_{i,j,k=0}^-; z_{i,j,k=0}^+] =$$

$$[z_{i,j,k=0}^- - z_{i,j,k=0}^- \cdot 0,01; z_{i,j,k=0}^- + z_{i,j,k=0}^- \cdot 0,01], \{i=0, \dots, 3, j=0, 1\} \{i=0, 1, j=0, \dots, 7\};$$

$u_{1,0}, u_{1,k}$  - температури у сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення відповідно;  $u_{2,0}, u_{2,k}$  -



швидкості переміщення листа у сушильній камері при заданих для тестового набору даних та при прогнозуванні для  $k$ -го її значення відповідно.

Складність отриманих моделей оцінювали як кількістю елементів, так і складністю оперування отриманою моделлю, яку визначали за кількістю операцій множення, щоб отримати прогнозоване значення модельованої характеристики.

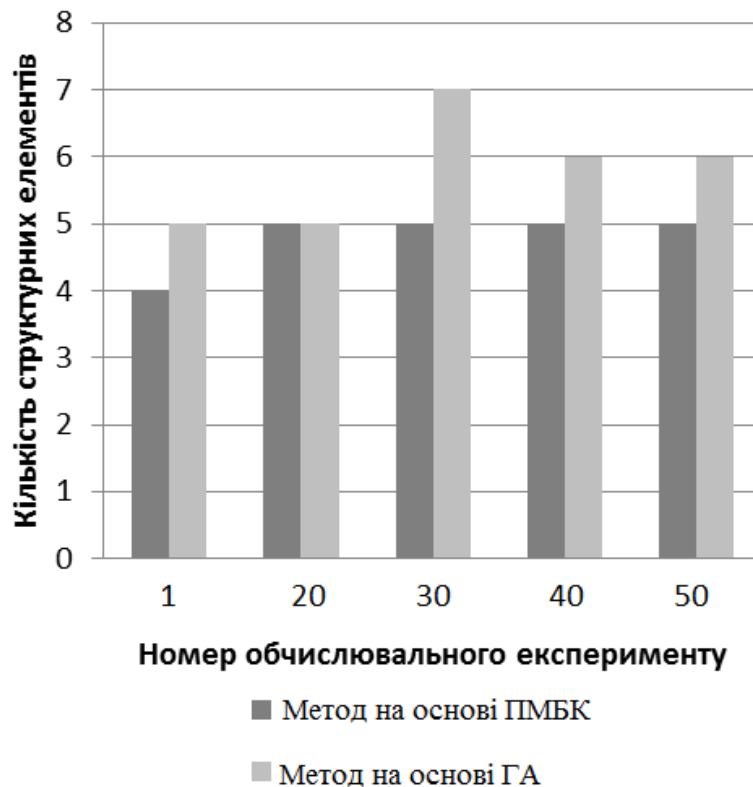


Рис. 3.6. Кількість структурних елементів у отриманих структурах моделей у вигляді IPO

Результати проведеного порівняння складності отриманих структур моделей у вигляді IPO проілюстровано на рис. 3.6 та рис. 3.7. Як бачимо з цих рисунків, структури IPO отримані внаслідок застосування методу структурної ідентифікації, який ґрунтується на поведінкових моделях бджолої колонії, є простішими, ніж структури IPO, отримані на основі методу, який ґрунтується на генетичних алгоритмах.

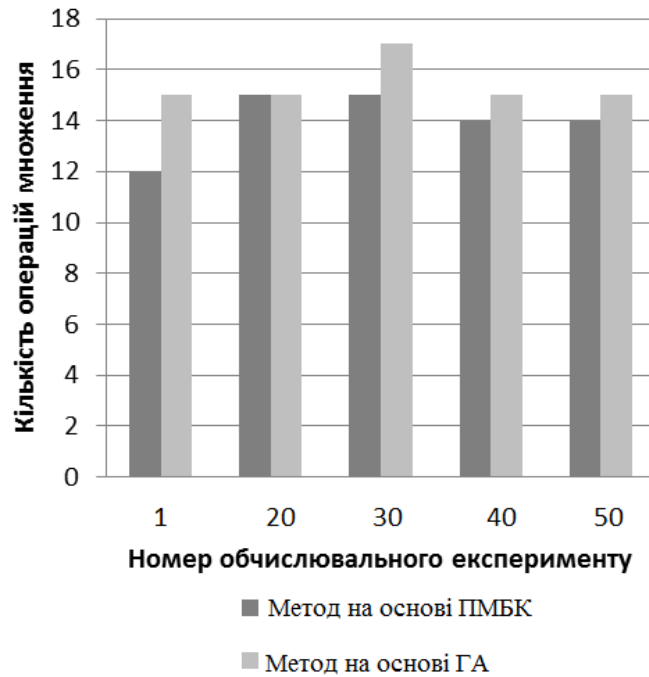


Рис. 3.7. Кількість операцій множення, які необхідно виконати для прогнозування значення вологості на поверхні листа гіпсокартону для однієї точки

Крім того, знайдені за допомогою методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії моделі розподілу вологості є простішими у порівнянні з відомими, які застосовані для моделювання аналогічного технологічного процесу, і одночасно враховують більший діапазон зміни значень чинників технологічного процесу.

Варто зазначити, що такий вигляд структур IPO, отриманих унаслідок застосування методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, досягаємо внаслідок ширшого покриття простору пошуку розв'язків задачі у процесі застосування методу в порівнянні з відомим методом на основі генетичних алгоритмів. Водночас, запропонований метод відзначається на 6%-24% нижчою обчислювальною складністю (для переважної більшості експериментів обчислювальна складність застосування запропонованого методу нижча на 20%) у порівнянні з відомим.

### ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Із використанням розроблених теоретичних основ створено новий метод структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Запропоновано та обґрунтовано нейроподібну обчислювальну схему реалізації методу структурної ідентифікації ІРО, яка забезпечує збіжність застосування методу структурної ідентифікації.

2. Детально розглянуто приклад застосування запропонованого методу та його обчислювальної схеми для побудови моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння. Показано, що знайдені за допомогою запропонованого методу структурної ідентифікації моделі розподілу вологості є простішими у порівнянні з відомими, які застосовані для моделювання аналогічного технологічного процесу, і одночасно враховують більший діапазон зміни значень чинників технологічного процесу.

3. Проведено порівняльний аналіз методів структурної ідентифікації ІРО. Показано, що застосування запропонованого в порівнянні із застосуванням відомого методу на основі генетичних алгоритмів із модифікованими операторами схрещування та селекції забезпечує знаходження простих структур моделей без погіршення їх прогностичних властивостей. Встановлено, що обчислювальна складність застосування методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії щонайменше на 6% нижча, ніж на основі генетичних алгоритмів. Водночас, для переважної більшості експериментів обчислювальна складність застосування запропонованого методу нижча на 20%.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДУ ТА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ У ВИГЛЯДІ ІРО ДЛЯ ЗАДАЧІ ВИЯВЛЕННЯ ЗВОРОТНОГО ГОРТАННОГО НЕРВА**

У попередньому розділі дисертаційної роботи розроблено метод структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та показано переваги його застосування у порівнянні з відомими методами. Тому метою цього розділу дисертаційної роботи є апробація розробленого програмного комплексу, у якому реалізовано запропонований метод структурної ідентифікації ІРО, для побудови математичної моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі пацієнта.

Матеріали цього розділу дисертаційної роботи опубліковані автором у працях [22, 110, 113].

#### **4.1 Опис об'єктної моделі та алгоритмічної реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів**

Розроблений програмний комплекс реалізує метод структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Цей програмний комплекс є інструментальним засобом для математичного моделювання процесів та об'єктів з розподіленими параметрами у випадку, коли вихідні дані для побудови моделі представлені в інтервальному вигляді. При його створенні було використано нейроподібну обчислювальну схему запропоновану у попередньому розділі дисертаційної роботи.

Розглянемо детальніше функціональні можливості зазначеного програмного комплексу. На рис. 4.1 подано діаграму варіантів використання, яка візуалізує основні функції програмного продукту.



Рис. 4.1. Діаграма варіантів використання

Як показано на рис. 4.1, програмна система надає користувачу можливість введення експериментальних даних та початкових параметрів реалізації методу структурної ідентифікації IPO на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Крім того, реалізовано функцію «Формування набору структурних елементів», яка на основі введених початкових параметрів реалізації методу автоматично генерує множину всіх структурних елементів  $F$ .

Функція «Пошук структури моделі» реалізує послідовність перетворень структур IPO  $\lambda_s$  запропонованим методом структурної ідентифікації. Функція «Збереження проміжних результатів» забезпечує можливість зупинки процесу структурної ідентифікації, тобто функції пошуку структури моделі, та збереження проміжних результатів.

Програмний комплекс для автоматизації процесу пошуку структури математичної моделі у вигляді IPO розроблено із використанням об'єктно-орієнтованого підходу.

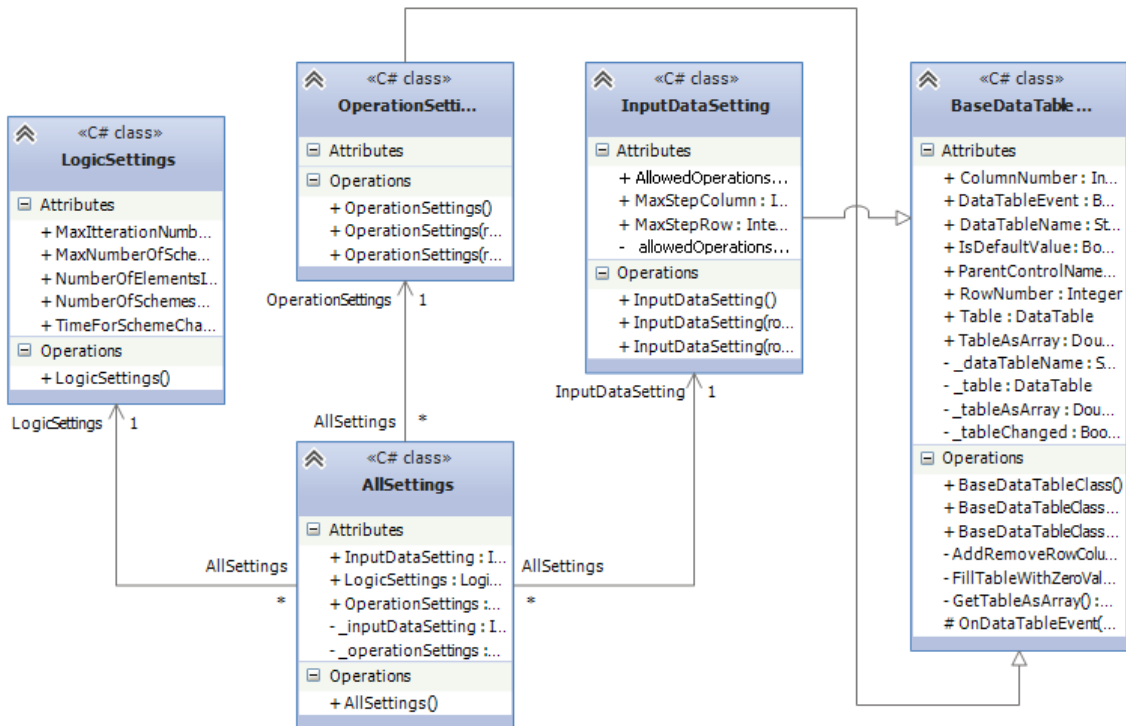


Рис. 4.2. Даграма класів програмної реалізації методу структурної ідентифікації IPO

Для реалізації програмного комплексу було застосовано технологію .NET, мову програмування C# та використано інтегроване середовище розробки програмних продуктів Microsoft Visual Studio. На рис. 4.2 показано об'єктно-орієнтовану модель програмного комплексу для структурної ідентифікації IPO на основі поведінкових моделей бджолиної колонії. Варто

зазначити, що програмний комплекс реалізовано у вигляді браузернонезалежного веб-додатку.

Для зручності використання програмної системи було розроблено графічний інтерфейс для введення даних та моніторингу процесу структурної ідентифікації, який представлено на рис. 4.3-4.8. Розглянемо детальніше особливості реалізації інтерфейсу програмної системи на прикладі задачі структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії виготовлення, яку детально описано у третьому розділі дисертаційної роботи.

Home About

## Input Data

Rows: 4 Max Step Rows: 1 Input data deviation: 0.05

Columns: 8 Max Step Columns: 2 Initial condition deviation: 0.01

|      |      |      |      |      |      |      |      |
|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 0.6  | 0.63 | 0.66 | 0.66 | 0.68 | 0.65 | 0.62 | 0.61 |
| 0.68 | 0.74 | 0.78 | 0.82 | 0.85 | 0.83 | 0.79 | 0.71 |
| 0.72 | 0.78 | 0.82 | 0.85 | 0.86 | 0.82 | 0.78 | 0.73 |
| 0.62 | 0.63 | 0.68 | 0.7  | 0.71 | 0.67 | 0.66 | 0.65 |

Next>>

Рис. 4.3. Сторінка для введення експериментальних даних

На рис. 4.3 проілюстровано сторінку програмної системи «Input Data» для введення експериментальних даних. У зазначеній задачі ними є результати вимірювань вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння для заданих технологічних чинників. Спочатку вводимо розмірність таблиці з експериментальними даними (поля: Rows=4,

Columns=8). Далі на сторінці динамічно генерується таблиця заданої розмірності, яку необхідно заповнити експериментальними даними.

Після цього, вводимо наступні значення: Max Step Rows, Max Step Columns, які задають порядок різницевого оператора, тобто визначають початкові умови для реалізації методу структурної ідентифікації IPO; Input data deviation, яке визначає величину похибки вимірювань істинних значень прогнозованої характеристики (значення повинно лежати в межах від 0 до 1); Initial condition deviation, яке визначає величину похибки для задання початкових умов (значення повинно лежати в межах від 0 до 1).

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

Рис. 4.4. Сторінка для введення вхідних змінних (управління)

Із рис. 4.4 видно, що для введення векторів вхідних змінних (управління)  $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$  спочатку необхідно ввести розмірність та їх кількість. У випадку задачі структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на



поверхні листа гіпсокартону є два вектори вхідних змінних, кожен із яких містить два значення технологічних чинників, а саме: температуру у сушильній камері та швидкість переміщення у сушильній камері. Після того як на вкладці динамічно згенерувалася таблиця для введення значень вхідних змінних, заповнюємо її (як показано на рис. 4.4).

Для реалізації функції «Формування набору структурних елементів» необхідно ввести відношення між вхідними змінними, як це рекомендовано у праці [108], тоді як відношення між елементами множини заданих початкових умов формуватимуться автоматично. Для введення відношень між вхідними змінними потрібно перейти на сторінку «Parameters Allowed Operations», загальний вигляд якої проілюстровано на рис. 4.5. Для переходу необхідно натиснути кнопку «Next».

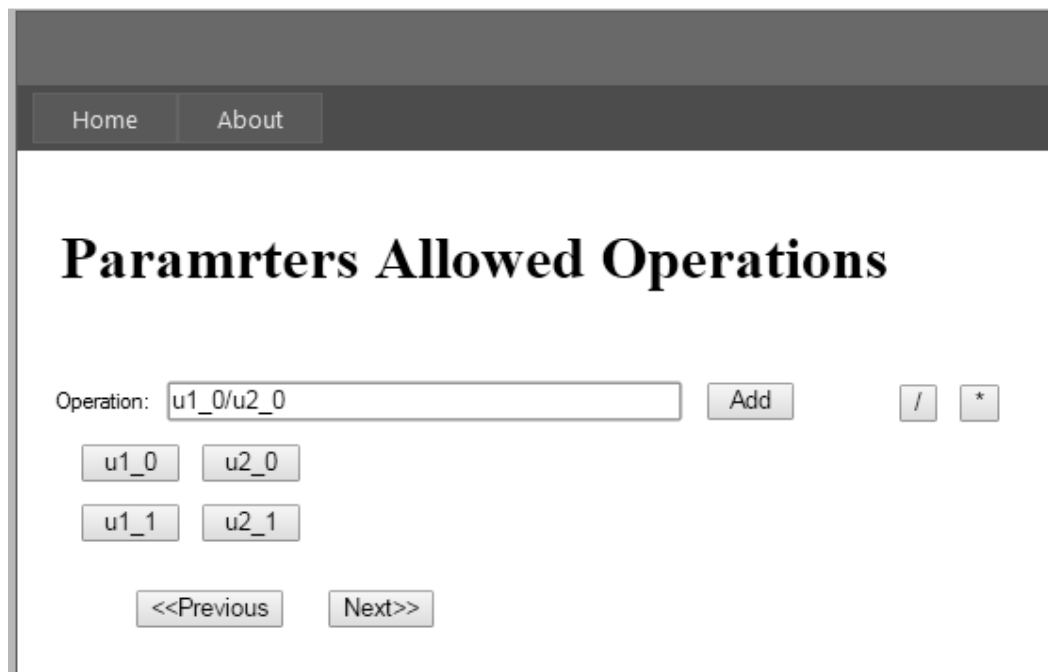


Рис. 4.5. Сторінка для введення комбінацій вхідних змінних (управління)

Важливо зазначити, що при переході на сторінку «Parameters Allowed Operations», на ній уже відображені кнопки, які задають вхідні змінні (управління), що попередньо були введені на сторінці «Experiments». Для формування відношень між вхідними змінними доступні арифметичні

операції: «\*», «/». Далі необхідно почергово ввести усі необхідні відношення між вхідними змінними. Приклад виконання зазначеної операції проілюстровано на рис. 4.5. Варто зазначити, що комбінації з множини елементів (вхідних змінних)  $\{\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}\}$  потрібно генерувати, виходячи з фізичного аналізу модельованого реального процесу для забезпечення умови зменшення обчислювальної складності застосування методу структурної ідентифікації IPO.

Після введення комбінацій вхідних змінних потрібно задати початкові параметри реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, для цього потрібно перейти на сторінку «Logic Settings».

Home About

## Logic Settings

Number of structures for calculation: 10 ▼

Number of elements used in structure:

From: 4 ▼

To: 8 ▼

Max number of iterations: 100 ▼

Max number of unchangeable structure: 4 ▼

Time for structure change: 10 ▼ 0 ▼ 0 ▼

<<Previous Next>>

Рис. 4.6. Сторінка для введення початкових параметрів реалізації методу структурної ідентифікації IPO

На рис. 4.6 проілюстровано загальний вигляд сторінки «Logic Settings». Тут необхідно заповнити усі поля: 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 параметричної ідентифікації поточної структури IPO.

Далі переходимо до етапу структурної ідентифікації IPO, для цього запускаємо функцію “Пошук структури моделі”, натиснувши кнопку «Next», та переходимо на сторінку «Main», де можна прослідкувати перетворення структур IPO.

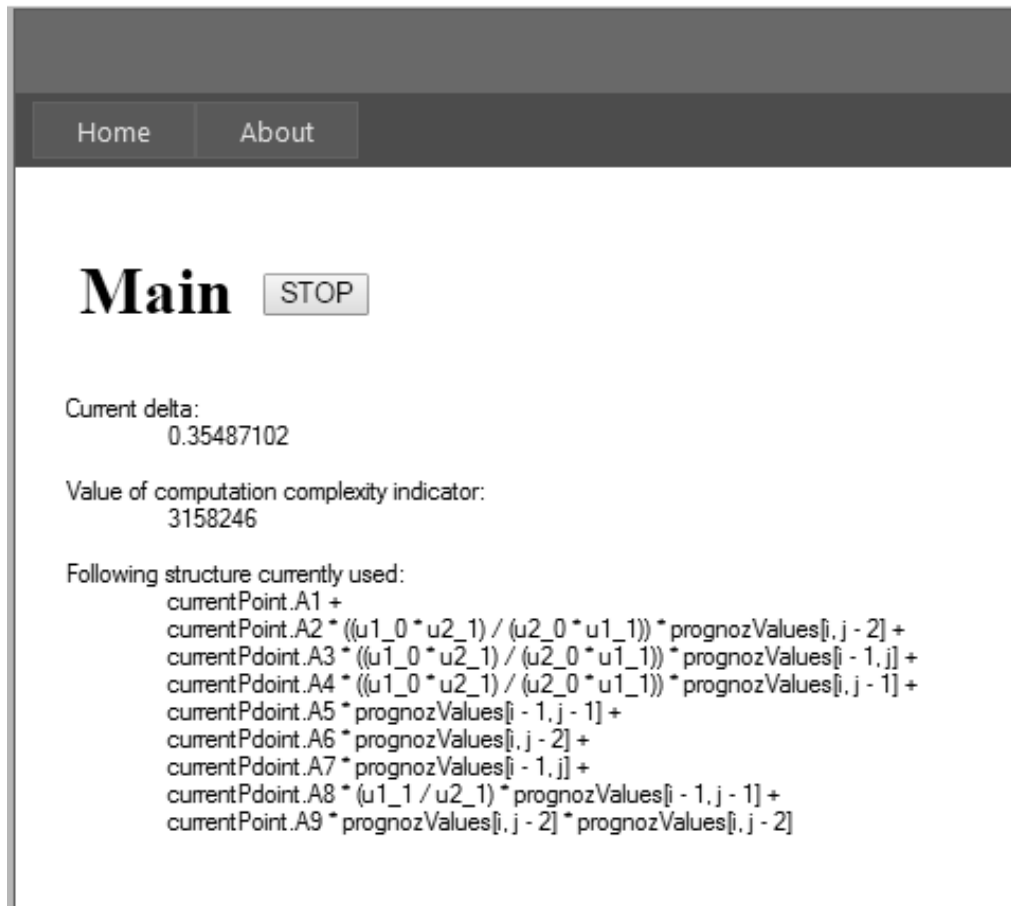


Рис. 4.7 – Сторінка для моніторингу процесу структурної ідентифікації

На сторінці «Main» відображено наступне: поточна структура IPO, поточне значення її показника якості, а також поточне значення показника обчислювальної складності реалізації методу. Варто зазначити, що на цій же

сторінці і буде виведено «оптимальну» структуру IPO (як показано на рис. 4.8).

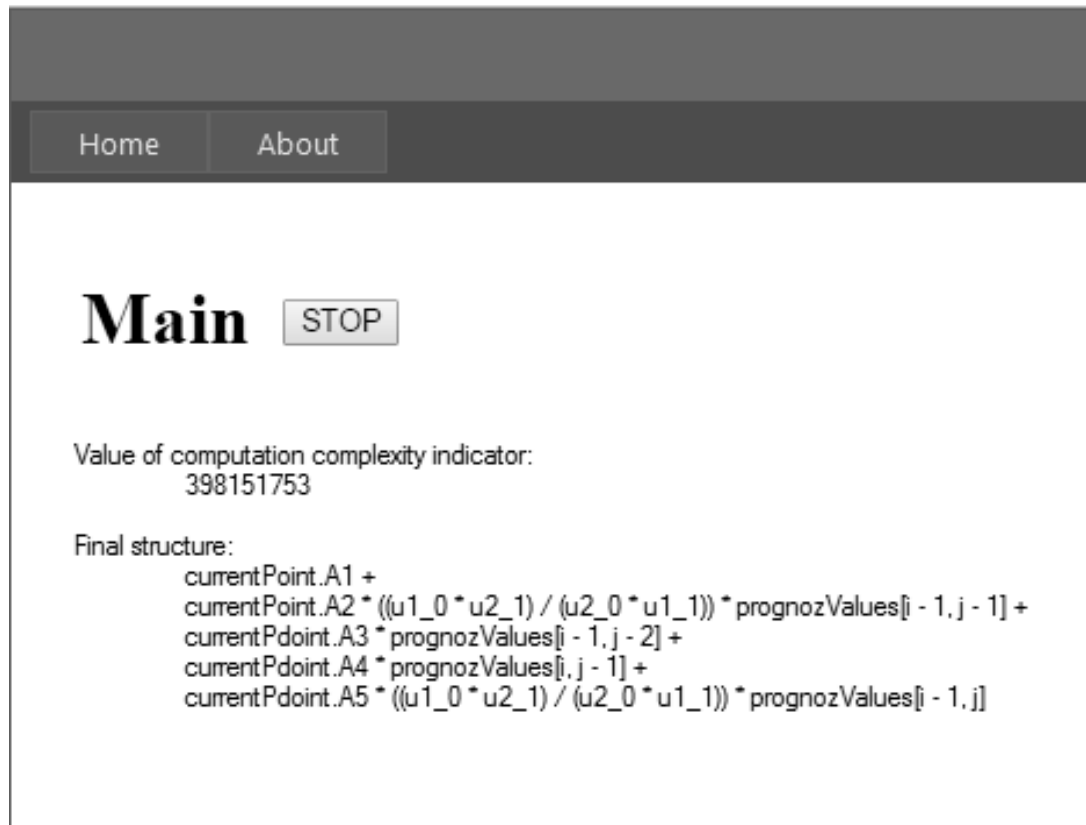


Рис. 4.8. Сторінка «Main» після завершення процедури структурної ідентифікації IPO

У результаті проведення процедури структурної ідентифікації моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону отримали структуру моделі, показану на рис. 4.8. Крім того, було оцінено значення вектора параметрів IPO, а також обчислено прогнозовані значення модельованої характеристики, тобто вологості на поверхні листа гіпсокартону. Після завершення процедури структурної ідентифікації зазначені величини програмна система записує у текстовий файл.

У цьому розділі дисертаційної роботи також проведено апробацію розробленого програмного комплексу для задачі виявлення зворотного гортанного, що є предметом розгляду у наступних підрозділах.

## **4.2 Особливості проведення хірургічної операції на щитоподібній залозі пацієнта**

У процесі проведення хірургічної операції на щитоподібній залозі постає проблема візуалізації зворотного гортанного нерва. Це обумовлено як індивідуальними анатомічними особливостями будови щитоподібної залози у кожного пацієнта, так і місцем її розташування на тілі людини. Зокрема щитоподібна залоза розташована на шиї людини, під гортанню. Ця зона тіла людини містить багато таких важливих анатомічних утворень, як судини, нерви, трахея, стравохід тощо. Звісно ж, пошкодження під час хірургічної операції будь-якого анатомічного утворення на шиї є потенційно небезпечним для людини [5]. Верхні гортанні нерви знаходяться на рівні верхнього полюса доль щитоподібної залози. Важливо зазначити, що їх пошкодження у процесі хірургічної операції на щитоподібній залозі може призвести до порушень роботи шийних відділів трахеї та стравоходу, порушень звуковимови, дихальних розладів, втрати голосу тощо [5]. При таких наслідках профілактика пошкоджень зворотного гортанного нерва є нагальною необхідною і становить актуальну задачу ендокринної хірургії.

У праці [85] розглянуто пристрій, який використовують для ідентифікації зворотного гортанного нерва. Принцип роботи пристрою полягає в наступному: в дихальній трубці ларингеальної маски (над голосовими зв'язками) встановлюють сенсор звукових сигналів, далі тканини хірургічної рани подразнюють змінним струмом. Струм проходить по тканинах хірургічної рани аж до гортанного нерва, який у свою чергу керує натягом голосових зв'язок. Відповідно чим ближче знаходиться подразнена ділянка до гортанного нерва, тим більше скорочуються голосові зв'язки пацієнта. Цей сигнал фіксують сенсором звукових коливань та через підсилювач подається на комп'ютер, де сигнал опрацьовується [86]. Під опрацювання інформаційного сигналу розуміємо визначення його амплітуди

та запису у файл отриманих даних в інтервальному вигляді, на основі врахування похибок вимірювального пристрою.

Таким чином, у результаті подразнення тканин хірургічної рани отримуємо інформаційний сигнал, параметри якого дають можливість визначити розміщення нерва, а також оцінити найкоротшу відстань від точки подразнення до нього [86]. Інформативним параметром вважаємо максимальну амплітуду інформаційного сигналу. Враховуючи важливість визначення місцезнаходження зворотного гортанного нерва на хірургічній рані, доцільно побудувати математичну модель розподілу максимальної амплітуди, яка б відображала інтервальну оцінку максимальної амплітуди інформаційного сигналу залежно від розташування точки подразнення на хірургічній рані.

Тому постає актуальна задача побудови математичної моделі у вигляді інтервального різницевого оператора. Слід зауважити, що конструювати модель треба на основі індуктивного підходу, тобто на основі вимірних значень амплітуди інформаційного сигналу в залежності від координат розміщення точки подразнення на площині поверхні хірургічної рани. Подібну задачу розглянуто у праці [85], проте для опису розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу використано алгебричний вираз, що не забезпечує високої точності моделі, а також кожного разу вимагає проведення великої кількості вимірювань з метою встановлення зазначеного розподілу.

Для розв'язування цієї задачі доцільно використати різницевий оператор (схему), який будемо конструювати на основі результатів спостережень відповідно до точок подразнення зворотного гортанного нерва поданих в інтервальному вигляді.

Однак при застосування такого підходу виникає інша проблема, тобто проблема структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора, для вирішення, якої використаємо запропонований у цій дисертаційній

роботі метод структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевих операторів на основі поведінкових моделях бджолиної колонії.

Побудова математичної моделі розподілу на площині хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу у вигляді ІРО дозволить зменшити кількість вимірювань максимальної амплітуди для налаштування моделі, чим зменшить затрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва.

### **4.3 Ідентифікація моделі у вигляді інтервального різницевого оператора для прогнозування розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу**

У цьому підрозділі дисертаційної роботи розглянуто застосування розробленого програмного комплексу для моніторингу зворотного гортанного нерва у процесі хірургічної операції на щитоподібній залозі.

Суть моніторингу полягає у встановленні місця розташування зворотного гортанного нерва на хірургічній рані. Інформативною ознакою для виявлення місця розташування зворотного гортанного нерва є максимальна амплітуда інформаційного сигналу, отриманого внаслідок подразнення тканин хірургічної рани змінним струмом.

Результати вимірювань амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі, описаним у попередньому підрозділі пристроєм, подано у таблиці 4.1.

Проведемо процедуру структурної ідентифікації моделі розподілу амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі у вигляді ІРО, використовуючи результати вимірювань із таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Виміряні інтервальні значення максимальної амплітуди інформаційного сигналу

| №  | Координати |     | Значення амплітуди       |          | №  | Координати |     | Значення амплітуди       |          |
|----|------------|-----|--------------------------|----------|----|------------|-----|--------------------------|----------|
|    | $i$        | $j$ | $[z_{i,j}^-; z_{i,j}^+]$ |          |    | $i$        | $j$ | $[z_{i,j}^-; z_{i,j}^+]$ |          |
| 1  | 0          | 0   | 11,53263                 | 8,097375 | 19 | 0          | 3   | 18,67663                 | 13,11338 |
| 2  | 1          | 0   | 13,61238                 | 9,557625 | 20 | 1          | 3   | 33,2525                  | 23,3475  |
| 3  | 2          | 0   | 18,57088                 | 13,03913 | 21 | 2          | 3   | 61,45838                 | 43,15163 |
| 4  | 3          | 0   | 21,7845                  | 15,2955  | 22 | 3          | 3   | 67,5625                  | 47,4375  |
| 5  | 4          | 0   | 28,28813                 | 19,86188 | 23 | 4          | 3   | 65,79883                 | 46,19918 |
| 6  | 5          | 0   | 36,53075                 | 25,64925 | 24 | 5          | 3   | 61,6875                  | 43,3125  |
| 7  | 0          | 1   | 12,90738                 | 9,062625 | 25 | 0          | 4   | 18,80118                 | 13,20083 |
| 8  | 1          | 1   | 20,539                   | 14,421   | 26 | 1          | 4   | 45,825                   | 32,175   |
| 9  | 2          | 1   | 30,92013                 | 21,70988 | 27 | 2          | 4   | 61,6875                  | 43,3125  |
| 10 | 3          | 1   | 40,68438                 | 28,56563 | 28 | 3          | 4   | 66,975                   | 47,025   |
| 11 | 4          | 1   | 48,21025                 | 33,84975 | 29 | 4          | 4   | 63,44883                 | 44,54918 |
| 12 | 5          | 1   | 61,288                   | 43,032   | 30 | 5          | 4   | 38,1875                  | 26,8125  |
| 13 | 0          | 2   | 14,45838                 | 10,15163 | 31 | 0          | 5   | 23,49883                 | 16,49918 |
| 14 | 1          | 2   | 25,8265                  | 18,1335  | 32 | 1          | 5   | 53,4625                  | 37,5375  |
| 15 | 2          | 2   | 44,98958                 | 31,58843 | 33 | 2          | 5   | 66,09375                 | 46,40625 |
| 16 | 3          | 2   | 53,93838                 | 37,87163 | 34 | 3          | 5   | 59,925                   | 42,075   |
| 17 | 4          | 2   | 68,20758                 | 47,89043 | 35 | 4          | 5   | 34,6625                  | 24,3375  |
| 18 | 5          | 2   | 72,20963                 | 50,70038 | 36 | 5          | 5   | 24,0875                  | 16,9125  |

У таблиці 4.1  $i$  та  $j$  – координати точки подразнення змінним струмом на площині хірургічної рани;  $[z_{i,j}^-; z_{i,j}^+]$  – виміряні у відповідних точках інтервальні значення максимальної амплітуди інформаційного сигналу.

Для синтезу структури IPO за допомогою методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолої колонії було згенеровано множину структурних елементів  $F$  з потужністю  $L=44$ . Множина



структурних елементів містить поліноміальні функції, не вищі від другого степеня для ІРО, не вищого від другого порядку.

У результаті отримано таблицю 4.2 – упорядковану множину структурних елементів.

Таблиця 4.2

Множина структурних елементів  $F$ 

| №пп | Структурний елемент           | №пп | Структурний елемент             |
|-----|-------------------------------|-----|---------------------------------|
| 1   | $v_{i,j-1}$                   | 23  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i,j-2}$   |
| 2   | $v_{i,j-2}$                   | 24  | $v_{i-1,j} \cdot v_{i-1,j}$     |
| 3   | $v_{i-1,j}$                   | 25  | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j}$   |
| 4   | $v_{i-1,j-1}$                 | 26  | $v_{i-1,j-2} \cdot v_{i-1,j}$   |
| 5   | $v_{i-1,j-2}$                 | 27  | $v_{i-2,j} \cdot v_{i-1,j}$     |
| 6   | $v_{i-2,j}$                   | 28  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i-1,j}$   |
| 7   | $v_{i-2,j-1}$                 | 29  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i-1,j}$   |
| 8   | $v_{i-2,j-2}$                 | 30  | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i-1,j-1}$ |
| 9   | $v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-1}$   | 31  | $v_{i-1,j-2} \cdot v_{i-1,j-1}$ |
| 10  | $v_{i,j-2} \cdot v_{i,j-1}$   | 32  | $v_{i-2,j} \cdot v_{i-1,j-1}$   |
| 11  | $v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-1}$   | 33  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i-1,j-1}$ |
| 12  | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-1}$ | 34  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i-1,j-1}$ |
| 13  | $v_{i-1,j-2} \cdot v_{i,j-1}$ | 35  | $v_{i-1,j-2} \cdot v_{i-1,j-2}$ |
| 14  | $v_{i-2,j} \cdot v_{i,j-1}$   | 36  | $v_{i-2,j} \cdot v_{i-1,j-2}$   |
| 15  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i,j-1}$ | 37  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i-1,j-2}$ |
| 16  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i,j-1}$ | 38  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i-1,j-2}$ |
| 17  | $v_{i,j-2} \cdot v_{i,j-2}$   | 39  | $v_{i-2,j} \cdot v_{i-2,j}$     |
| 18  | $v_{i-1,j} \cdot v_{i,j-2}$   | 40  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i-2,j}$   |
| 19  | $v_{i-1,j-1} \cdot v_{i,j-2}$ | 41  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i-2,j}$   |
| 20  | $v_{i-1,j-2} \cdot v_{i,j-2}$ | 42  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i-2,j-1}$ |
| 21  | $v_{i-2,j} \cdot v_{i,j-2}$   | 43  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i-2,j-1}$ |
| 22  | $v_{i-2,j-1} \cdot v_{i,j-2}$ | 44  | $v_{i-2,j-2} \cdot v_{i-2,j-2}$ |

Вхідні параметри обчислювальної схеми методу задаємо наступним чином:  $MCN=100$ ,  $Limit=4$ ,  $S=10$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}] = [4; 8]$ .

У процесі досліджень, із застосуванням описаного в цьому розділі дисертаційної роботи програмного комплексу, на шостій ітерації застосування запропонованого методу структурної ідентифікації було знайдено адекватну математичну модель розподілу максимальної амплітуди інформаційних у такому вигляді:

$$\begin{aligned}
 [\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] &= 0.2109 + 0.2025 \cdot [\hat{v}_{i,j-2}^-; \hat{v}_{i,j-2}^+] + \\
 &0.8346 \cdot [\hat{v}_{i-1,j}^-; \hat{v}_{i-1,j}^+] + 0.2437 \cdot [\hat{v}_{i-1,j+2}^-; \hat{v}_{i-1,j+2}^+] + \\
 &0.6951 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1}^-; \hat{v}_{i-1,j-1}^+] - 0.0004 \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i-2,j-2}^-; \hat{v}_{i-2,j-2}^+] - \\
 &0.0236 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1}^-; \hat{v}_{i-1,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i-1,j-2}^-; \hat{v}_{i-1,j-2}^+], \\
 &i=2\dots 5, j=2\dots 5,
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

де  $[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] \subset [z_{i,j}^-; z_{i,j}^+] = [z_{i,j} - z_{i,j} \cdot 0,01; z_{i,j} + z_{i,j} \cdot 0,01]$  та  $\{i=0,1, j=0, \dots, 5\} \vee \{i=0, \dots, 5, j=0, \dots, 1\}$  – задані початкові умови.

Отримана математична модель у вигляді ІРО (4.1) дає можливість визначити ризиконебезпечну область хірургічного втручання. Слід зазначити, що перед застосуванням моделі проводилася її верифікація. Верифікацію проводили таким чином: задали початкові умови, тобто значення максимальної амплітуди інформаційного сигналу отримані способом зондування хірургом множини точок на площині поверхні хірургічної рани (точки із координатами:  $\{i=0,1, j=0, \dots, 5\} \vee \{i=0, \dots, 5, j=0, \dots, 1\}$ ); далі на основі отриманої моделі (4.1) обчислили значення максимальної амплітуди інформаційного сигналу в точках на поверхні хірургічної рани (точки із координатами:  $\{i=2\dots 5, j=2, \dots, 5\}$ ). Варто зазначити, що прогнозовані значення максимальної амплітуди, отримані на основі ІРО

(4.1) належать інтервалам вимірних значень, що забезпечує задану точність моделі та підтверджує її адекватність.

Далі для конкретного пацієнта визначаємо область безпечного хірургічного втручання. Для цього задаємо початкові умови, які були встановлені хірургом під час оперативного втручання та з використанням ІРО (4.1) знаходимо прогнозований розподіл максимальної амплітуди інформаційного сигналу.

Зазначений розподіл максимальної амплітуди інформаційних сигналів проілюстровано на рис. 4.9.

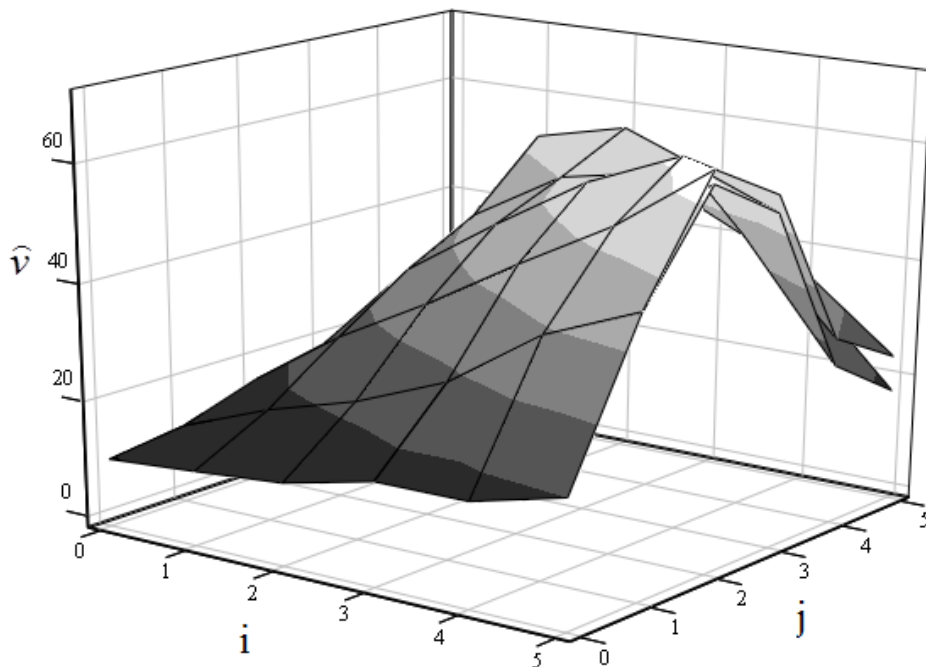


Рис. 4.9. Коридор інтервальних моделей для розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу

У праці [85] розроблено правило визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання, яке враховує похибку вимірювань значень максимальної амплітуди. На його основі, визначаємо ризиконебезпечну ділянку хірургічного втручання на площині поверхні хірургічної рани. Графічна ілюстрація отриманої області хірургічного втручання (виділено сірим кольором) подана на рис. 4.10.

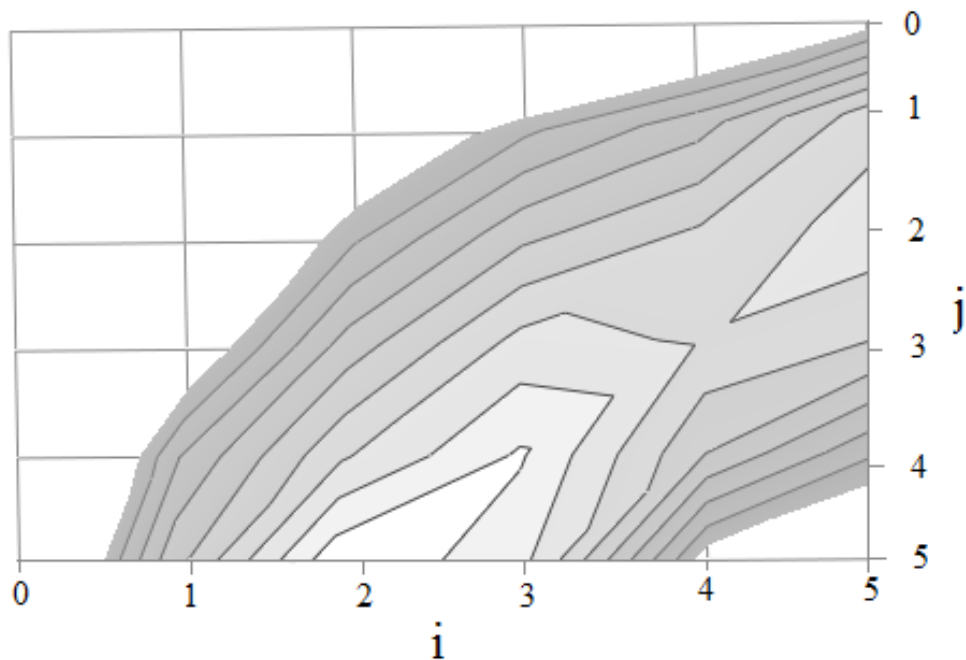


Рис. 4.10. Ілюстрація розміщення фрагменту зворотного гортанного нерва на площині поверхні хірургічної рани

Як бачимо з рис.4.10, область проекції на координати тканин хірургічної рани є деяким коридором, у якому з точністю вимірювань представлено ризиконебезпечну область хірургічного втручання. Як уже зазначалося, подібні дослідження також проводили з використанням алгебричних виразів [85]. На відміну від результатів, наведених у праці [85], різницевий оператор суттєво спрощує процес визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання.

Застосування алгебричного виразу для опису розподілу амплітуди інформаційного сигналу на площині поверхні хірургічної рани кожного разу вимагає проведення вимірювань на хірургічній рані пацієнта не менше:  $O_1(n)=n^2$  точок (де  $n$  – розмірність сітки). Водночас застосування ІРО суттєво зменшує кількість точок для вимірювання та обчислення амплітуди інформаційного сигналу:  $O_2(n)=4(n-1)$ .

На рис. 3 наведено результати графічного зіставлення кількості вимірювань та обчислення параметрів інформаційного сигналу залежно від

розмірності сітки. Як бачимо, у випадку застосування запропонованої моделі для відображення розподілу амплітуди інформаційного сигналу в системі координат площини поверхні хірургічної рани необхідно суттєво менша кількість вимірювань параметрів інформаційного сигналу.

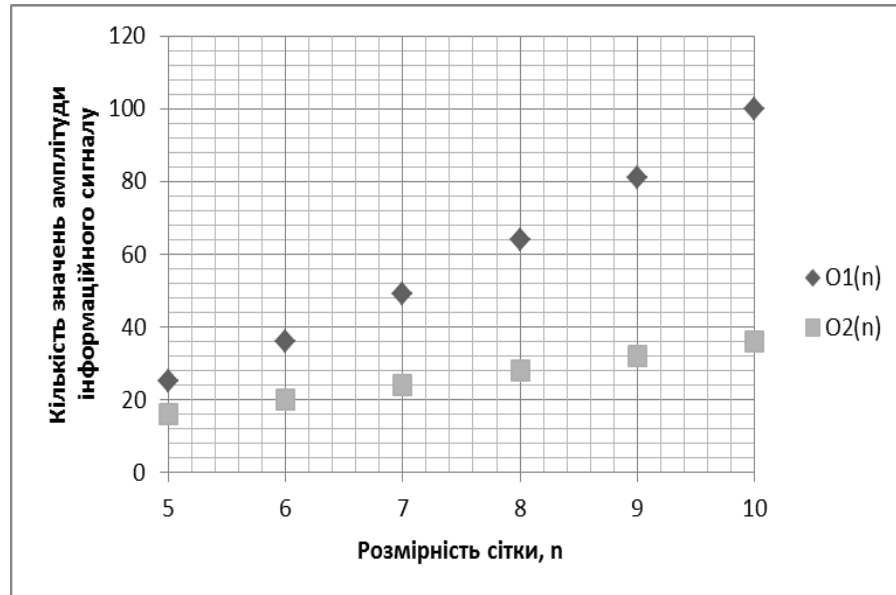


Рис. 4.11. Порівняння складності застосування методів візуалізації зворотного гортанного нерва

До того ж у процесі оперативного втручання важливою є кількість часу, необхідного для встановлення ризиконебезпечної ділянки. Оскільки у випадку застосування IPO необхідна менша кількість точок для встановлення ділянки, то це забезпечує зменшення часових затрат на реалізацію методу візуалізації практично у два рази у випадку розмірності координатної сітки на поверхні хірургічної рани  $n=6$ . Це забезпечило можливість застосування математичної моделі (4.1) в реальному масштабі часу, що є суттєвою перевагою застосування IPO.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Створено UML-моделі програмного забезпечення та описано особливості розробки програмного коду для реалізації алгоритмів структурної ідентифікації IPO на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Розглянуто особливості організації користувацького інтерфейсу розробленого програмного комплексу для автоматизації процесу структурної ідентифікації IPO.

2. Із застосуванням розробленого програмного забезпечення для реалізації методів структурної ідентифікації IPO на основі принципів функціонування бджолоїної колонії створено макромодель прогнозування розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу, а також проведено її верифікацію.

3. Експериментально підтверджено достовірність отриманих наукових результатів на прикладі побудови моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу. Доведено, що отримана математична модель розподілу на площині координат хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, на відміну від існуючих, вимагає меншої кількості вимірювань для ідентифікації і тим самим зменшує затрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва, що забезпечило можливість її застосування в реальному масштабі часу.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання створення методів структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів на основі поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії, які у підсумку забезпечують зниження обчислювальної складності розв'язування задачі структурної ідентифікації та одночасну побудову простих моделей із гарантованими прогностичними властивостями.

Основні наукові результати та висновки дисертаційних досліджень:

1. Встановлено, що існуючі методи структурної ідентифікації математичних моделей характеризуються високою обчислювальною складністю пошуку математичної моделі, яка здебільшого є переускладненою або не забезпечує заданої точності моделювання в межах похибок експериментальних даних. Показано, що подальші дослідження слід проводити у напрямі зниження обчислювальної складності застосування методів структурної ідентифікації моделей з гарантованими прогностичними властивостями. Унаслідок аналізу методів самоорганізації мультиагентних систем запропоновано для розв'язування задачі структурної ідентифікації застосувати принципи ройового інтелекту, зокрема поведінкові моделі бджолоїної колонії.

2. На основі встановлених аналогій між поведінковими моделями бджолоїної колонії та алгоритмами розв'язування задачі структурної ідентифікації розроблено теоретичну основу для побудови методів структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді ІРО. Теоретично обґрунтовано зниження обчислювальної складності застосування таких методів структурної ідентифікації моделей із гарантованими прогностичними властивостями у вигляді ІРО за рахунок наявності ефективного механізму для уникнення локальних мінімумів складної функції мети.

3. Створено новий метод структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на поведінкових моделях бджолоїної колонії, та нейроподібну обчислювальну схему його реалізації.

4. На основі результатів проведених обчислювальних експериментів показано, що створений метод характеризується щонайменше на 6% нижчою обчислювальною складністю, ніж метод на основі генетичних алгоритмів. Однак для переважної більшості проведених експериментів обчислювальна складність застосування запропонованого методу нижча на 20%.

5. Створено низькорівневу архітектуру та UML-моделі програмного комплексу для реалізації методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.

6. Достовірність отриманих наукових результатів підтверджено теоретичними обґрунтуваннями, а також експериментально (на прикладах побудови двох типів моделей). Показано, що отримані моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння є простішими від існуючих та враховують ширший діапазон зміни значень чинників технологічного процесу. Побудована математична модель розподілу на площині координат хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, на відміну від існуючих, вимагає меншої кількості вимірювань для ідентифікації і тим самим зменшує затрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва.



**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. Abraham A. Swarm intelligence in data mining / A. Abraham, G. Grosan. – Berlin: Springer, 2006. – 267 p.
2. Alefeld G. Interval analysis: theory and applications / G. Alefeld, G. Mayer // Journal of Computational and Applied Mathematics. – 2000. – № 121. – P. 421-464.
3. Blum Ch. Hybrid Metaheuristics. An Emerging Approach to Optimization / Ch. Blum, M.J.B. Aguilera, A. Roli. – Berlin: Springer-Verlag, 2008. – 289 p.
4. Camazine S. A model of collective nectar source by honey bees: Self-organization through simple rules / S. Camazine, J. Sneyd // Journal of Theoretical Biology. – 1991. – № 149. – P. 547–571.
5. Cantalamessa L. Thyroid nodules in Graves disease and the risk of thyroid carcinoma / L. Cantalamessa, M. Baldini // Arch intern. Med. – 1999. – № 159(15). – P. 1705–1708.
6. Dyvak M. Application interval methods in static identification of the medical and ecological conditions of on average industrial city / M. Dyvak, G. Hladiy // Ref. IV krajowa konf. “Modelowanie Systemow Biologicznych”. – Krakow : 1995. – P. 95–99.
7. Dyvak M. Features of identification of interval differential operator [Electronic resource] / Mykola Dyvak, Iryna Voytyuk, Iryna Spivak // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science: Proc. of the Xth Intern. Conf. TCSET'2010. – Lviv, 2010. – Section 6, 2.
8. Dyvak M. Identification of Parameters of Interval Discrete Model of the Dynamic System on the Basis of Selection of the Saturated Blocks of ISLAE / M. Dyvak, L. Honchar, Ye. Martsenyuk, I. Matola // The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronics: Proc. of the IXth Intern. Conf. CADSM 2007, 20–24 February 2007. – Lviv, 2007. – P. 362–364.
9. Hadjihassan S. Quality improvement via optimization of tolerance intervals during the design stage / S. Hadjihassan, E. Walter, L. Pronzato // Applications

of Interval Computatons // Kearfott R. B., Kreinovich V., eds. – Dordrecht: Kluwer, 1996. – P.91–131.

10. Kalman R. E. General synthesis procedure for computer control of single and multi-loop linear systems / R. E. Kalman, J. E. Bertram // Trans. AIEEE. – 1959.– 77 II. – P. 602–609.

11. Kalman R. E. Mathematical description of linear dynamic systems / R. E. Kalman // SIAM J. Contr. – 1963. – V. 1. – P. 152–192.

12. Kalman R. E. Realization theory of linear dynamical systems / R.E. Kalman // Control Theory and Topics in Functional Analysis, Vol. II. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1976. – P. 235–236..

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

14. Karaboga D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm / D. Karaboga, B. Basturk // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39. – P. 459–471.

15. Kinghtes C. D. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for Monod biodegradation kinetics using bivariate data / C. D. Kinghtes, C. A. Peters // Biotechnology and Bioengineering. – 2000. – Vol. 69, № 2. – P. 160–170.

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

17. Moore R. E. Interval Analysis / R. E. Moore – Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1966. – 145 p.

18. Moore R. E. Interval methods for nonlinear systems / R. E. Moore // Fundamentals of numerical computation (computer-oriented numerical analysis). Computing Supplement. – Wienn: Spring Verbag, 1980. – P. 113–120.

19. Moore R. E. Methods and Applications of Interval Analysis / R. E. Moore. – Philadelphia: SIAM, 1979. – 190 p.

20. Ocheretnyuk N. Features of structure identification the macromodels for nonstationary fields of air pollutions from vehicles / N. Ocheretnyuk, I. Voytyuk, M. Dyvak, Ye. Martsenyuk // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2012) : Proc. of the XIth Intern. Conf. – Lviv-Slavske, 2012. – P. 444.

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

22. Porplytsya N. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve / N. Porplytsya, M. Dyvak // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 16th International Conference (CPEE' 2015). – Lviv, 2015. – P. 156-158.

23. Porplytsya N. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony / N. Porplytsya, M. Dyvak, I. Spivak, I. Voytyuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2015): Proc. of the XIIIth Intern. Conf. – Lviv, 2015. – P. 196-199.

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

25. Porplytsya N. Structure identification of interval difference operator for control the production process of drywall / N. Porplytsya, M. Dyvak, T. Dyvak, I. Voytyuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013) : Proc. of the XIIth Intern. Conf. – Lviv, 2013. – P. 262-264.

26. Riley J.R., The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance / J. R. Riley , U. Greggers, A. D. Smith, D. R. Reynolds R. Menzel // NATURE: International weekly journal of science– 2005.–Vol. 435. – P. 205-207.
27. Rohn J. Input-output model with interval data / J. Rohn // *Econometrica*. – 1980. – Vol. 48. – P. 767–769.
28. Sean L. Essentials of Metaheuristics (Second edition) / L. Sean. – Raleigh: Lulu, 2013. – 250 p.
29. Shary S. P. Solving the linear interval tolerance problem / S. P. Shary // *Mathematics and Computer in Simulation*. – 1995. – V. 39. – P. 53–85.
30. Yermakova I. Use of mathematical models in assessment of human health / I. Yermakova, K. Lyabakh. // *Med.&Biol. Eng. And Computing*. – 1999. – Vol.39. – P. 860–861.
31. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер – М.: – Мир, 1987. – 360 с.
32. Бакан Г. М. Аналитический синтез алгоритмов гарантированного оценивания состояний динамических процессов / Г. М. Бакан // *Проблемы управления и информатики*. – 2003. – № 3. – С. 38–55.
33. Бакан Г. М. Размытые эллипсоидальные множества в задачах нестохастического оценивания / Г. М. Бакан, Н. Н. Куссуль // *Автоматика*. – 1989. – №5. – С. 11–17.
34. Бакан Г. М. Теоретико-множественная идентификация линейных объектов в классе размытых эллипсоидальных множеств / Г. М. Бакан, Н. Н. Куссуль // *Автоматика*. – 1990. –№4. – С. 72–78.
35. Беллман Р. Динамическое программирование / Р. Беллман – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.
36. Биркгоф Дж. Д. Динамические системы / Дж. Д. Биркгоф – 2002. – 406 с.
37. Большаков В. Д. Теория ошибок наблюдений: Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. / В. Д. Большаков. – М.: Недра, 1983. – 223 с.

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

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

40. Бочков А. Ф. Оценивание параметров модели для объектов с интервальной неопределенностью в выходных параметрах / А. Ф. Бочков, М. В. Милевский. – Москва, 1988. – 23 с. – Деп. в ВИНТИ, № 926 – В88.

41. Войтюк І. Ф., Метод та генетичний алгоритм структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів в задачах екологічного моніторингу / І. Ф. Войтюк, М. П. Дивак, В. М. Неміш// Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету серії „Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка“. – 2011. – Вип. 14 (188). – С. 8-17.

42. Войтюк. І. Ф. Особливості оптимізації структури інтервального різницевого оператора / І. Ф. Войтюк, В. І. Манжула, Т. М. Дивак // Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці. Збірка наукових праць учасників міжнародної науково-практичної конференції „Трансформаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах“. – Вінниця, 2009. – С. 146-154.

43. Волосов В. В. Исследование одного вида нестохастических алгоритмов идентификации с помощью прямого метода Ляпунова / В. В. Волосов, А. С. Калита, Е. А. Нижниченко // Автоматика. – 1989. – № 3. – С. 34–42.

44. Волосов В. В. К задаче восстановления вектора фазового состояния и идентификации параметров линейных стационарных динамических систем / В. В. Волосов, Е. А. Одинцова // Автоматика. – 1986. – № 6. – С. 22–29.

45. Вороновский Г. К. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. Н. Петрашев, С. А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997. – 111 с.
46. Воцинин А. П. Решение задач оптимизации по интервальным оценкам критерия / А. П. Воцинин // Заводская лаборатория. – 1987. – №7. – С. 68–71.
47. Воцинин А. П. Интервальный анализ: развитие и перспективы / А. П. Воцинин // Заводская лаборатория. – 2002. – №1. – С. 118–126.
48. Воцинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности. / А. П. Воцинин, Г. Р. Сотиров – М.: МЭИ – София: Техника, 1989. – 224 с.
49. Воцинин А. П. Планирование оптимального насыщенного эксперимента в задачах построения интервальных моделей / А. П. Воцинин, Н. П. Дывак // Заводская лаборатория. – 1993. – №1. – С. 56–59.
50. Глонь О. В. Моделювання систем керування в умовах невизначеностей / О. В. Глонь, В. М. Дубовой – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2004. – 169 с.
51. Голембо В.А., Бочкаръов О.Ю., Муляревич О.В. Нові підходи до розв'язку задач комбінаторної оптимізації колективом автономних агентів // Матер. 5-ї Міжнар. наук.-техн. конф. ACSN-2011 “Сучасні комп'ютерні системи та мережі: розробка та використання”. – Львів. – 2011. – С. 227-230.
52. Гроп Д. Методы идентификации систем / Д. Гроп. – М.: Мир, 1979. – 302 с.
53. Дивак М. П. Аналіз точності лінійної інтервальної моделі в задачах статичної ідентифікації / М. П. Дивак // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. Автоматика, вимірювання та керування. – 1999. – № 366. – С. 31–35.
54. Дивак М. П. Багатокритеріальний підхід структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем / М. П. Дивак, В. І. Манжула //

Міжнародний науково–технічний журнал “Інформаційні технології та комп’ютерна інженерія”. – 2005. – №2. – С. 37 – 44.

55. Дивак М. П. Допустиме оцінювання множини параметрів статичної системи в класі багатомірних еліпсоїдів / М. П. Дивак // Комп’ютинг. – 2002. – Т. 1. – №1. – С.108 – 114.

56. Дивак М. П. Ідентифікація моделей об’єктів в умовах інтервальної невизначеності на основі методів аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, П. Г. Стахів // 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.

57. Дивак М. П. Інтервальне моделювання динаміки збитків внаслідок забруднення автотранспортом / М.П. Дивак // Інформ аційні технології та комп’ютерна інженерія. – 2008. – № 3 (13) – С. 32–40.

58. Дивак М. П. Критерії оптимальності структури інтервального різницевого оператора / Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк. І. Ф. // Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: Матер. проблем.-наук. міжгалуз. конф. SPIC–2009, 19–22 травня 2009 р. – Бучач, 2009. – Т. 1., № 5. – С. 220–224.

59. Дивак М. П. Критерії структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора / Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк І. Ф. // 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.

60. Дивак М. П. Моделювання лінійних динамічних систем із заданою структурою каналу вимірювання методами аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, Є. О. Марценюк, І. Ф. Войтюк // Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: Матер.

проблем.-наук. міжгалуз. конф. SPIC–2008, 20–24 травня 2008 р. – Бучач, 2008.– Т. 1, № 4. – С. 130–134.

61. Дивак М. П. Обчислювальні аспекти методів локалізації розв'язків задач параметричного оцінювання в умовах обмежених похибок / М. П. Дивак // Відбір та обробка інформації. – 2002. – №16 (92) – С. 43–47.

62. Дивак М. П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора./ М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Зб. Наук. Праць ДонНТУ. Серія інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка – 2009. – Вип. 10(153). – С. 224–229.

63. Дивак М. П. Проблеми ідентифікації динамічних систем в умовах інтервальної невизначеності / М. П. Дивак, В. П. Кобернюк, Ю. П. Франко, І. Р. Пітух, В. П. Цимбалій // Вимірювання та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. праць.– 2001. – Вип. 8 – С. 307–310.

64. Дивак М. П. Проектування інтервальних моделей соціально–екологічних систем на основі нечітких даних / М. П. Дивак, Г. М. Гладій, С. В. Волощук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. праць. – 2002. – Вип. 9. – С. 130 – 135.

65. Дивак М. П. Структурна ідентифікація інтервальних різницевих операторів / М. П. Дивак, І. Ф. Войтюк, В. І. Манжула // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2010. – Т. 15, № 4. – С. 154–160.

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

67. Дивак М. П., Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / Дивак М. П. - Т. : Економічна думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.



68. Дивак М. П. Кількісні характеристики оцінки якості структури моделі у вигляді інтервального різницевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак, І. Ф. Войтюк // Відбір і обробка інформації : міжвід. зб. наук. пр. – Вип. 34 (110). – 2011. – С. 86–94.

69. Дивак М.П. Використання насиченого експерименту для оцінювання параметрів інтервальної моделі при аналізі інтервальних даних / М. П. Дивак // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 1999. – №2(5). – С. 33–36.

70. Дивак Т. М. Параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на прикладі макромоделі розподілу вологості у листі гіпсокартону в процесі його сушіння / Т. М. Дивак // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія : міжнар. наук.–техн. журнал. – 2012. – Вип. 3. – С. 79–85.

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

72. Заде Л. Теория линейных систем. Метод пространства состояний / Л. Заде, Ч. Дезоер – М.: Наука, 1970.

73. Захаров А. В. Синтез систем управления при интервальной неопределённости параметров их математических моделей / А. В. Захаров, Ю.И. Шокин // Докл. АН СССР. – 1988, № 2. – С. 292–295.

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

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

76. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко //– К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.
77. Ивахненко А. Г. Самоорганизация прогнозирующих моделей / А. Г. Ивахненко, Й. А. Мюллер – К.: Техника. – 1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник. – 1984. – 223 с.
78. Ивахненко А.Г. Объективный выбор оптимальной кластеризации выборки данных при компенсации неробастных помех / А. Г. Ивахненко, С. А. Петухова, В. М. Юдин // Автоматика. – 1993. – №3. – С. 46-58.
79. Ивахненко А.Г. Регуляризация решающих функций в методе группового учета аргументов / А. Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа // Автоматика. – 1970. – №2. – С. 19 – 23.
80. Калман Р. Идентификация систем с шумами / Р. Калман // Успехи матем. наук, 1985 – Вып. 4. – С. 27–41.
81. Калмыков С. А. Методы интервального анализа / С. А.Калмыков, Ю. И. Шокин, З. Х. Юлдашев – Новосибирск: Наука, 1986. – 222с.
82. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений / Л. В. Канторович // Сибирский матем. Журнал. – 1962. – Т. 3, №5. – С. 701–709.
83. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 446с.
84. Коддингтон Э. А. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений / Э. А. Коддингтон, Н. Левинсон// Пер. с англ., Изд. 2. – 2007. – 472 с.
85. Козак О.Л. Застосування методів допускового еліпсоїдного оцінювання параметрів інтервальних моделей для задачі візуалізації гортанного нерва / О. Л. Козак, М. П. Дивак, А. В. Пукас// Вісник Національного університету “Львівська політехніка“. Радіоелектроніка та телекомунікації – 2010. – №680. – С. 196-205.

86. Козак О.Л. Опрацювання інформаційного сигналу при застосуванні електро-фізіологічного методу ідентифікації гортанного нерва / О. Л. Козак // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції – Запоріжжя: ЗНТУ. – 2012. – С. 220-222.

87. Крищук В. М. Інтервальні методи оптимізації допусків / В. М. Грищук, Г. М. Шило, М. П. Гапоненко // Вісн. НУ “Львівська політехніка”. Комп’ютерні системи проектування: Теорія і практика. – 1999. – № 373. – С. 196-201.

88. Кунцевич В. М. Активная идентификация и управление при ограниченных шумах / В. М. Кунцевич, А. В. Кунцевич. // Пр. міжн. конф. з управління “АВТОМАТИКА–2000”, Львів 11–15 вересня 2000 : В 7-ми томах.– Львів: Держ. НДІ інформ. інфраструкт., 2000. – Т. 1. – С .7–13.

89. Кунцевич В. М. Об оптимальном и адаптивном управлении динамическими объектами в условиях неопределенности / В. М. Кунцевич, М. М. Лычак // Автоматика и телемеханика. – 1979. – №1. – С. 79 – 88.

90. Кунцевич В. М. Решение одной оптимальной задачи управления в условиях неопределенности / В.М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 2002. – № 3. – С. 85–100.

91. Кунцевич В. М. Управление в условиях неопределенности (синтез адаптивных систем управления) / В. М. Кунцевич, М. М. Лычак // Автоматика.– 1987. – №5. – С. 16–26.

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

93. Куржанский А. Б. Управление и наблюдение в условиях неопределенности / А. Б. Куржанский – М.: Наука, 1977. – 392 с.

94. Лакеев А. В. О множестве решений линейного уравнения с интервально заданными оператором и правой частью / А. В. Лакеев, С. И. Носков // Сиб. математ. журнал. – 1994. – Т. 35 – №5. – С. 1074–1084.

95. Лебедев А. Н. Моделирование в научно-технических исследованиях / Лебедев А. Н. – М: Радио и связь, 1989. – 224с.
96. Лисенков А. Н. О методах идентификации и управления в условиях неопределенности / А. Н. Лисенков // Межд. конф. по интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ – 92: Сб. тр. – Москва, 1992. – Т.1. – С. 92-96.
97. Лычак М. М. Идентификация и оценивание состояния объектов управления на основе множественного подхода / М. М. Лычак // Проблемы управления и информатики. – 1999. – №5. – С. 34–41.
98. Лычак М. М. Синтез дискретных адаптивных систем управления на основе теоретико-множественных моделей неопределенности / М. М. Лычак// Дис. докт. физ.-мат. наук.– Киев : Ин-т киб., 1995.
99. Лычак М.М. Решение задачи линейного программирования на основе множественного подхода / М. М. Лычак, В. Н. Шевченко, Н. П. Царук // Проблемы управления и информатики. – 2005. – №4. – С. 103–111.
100. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователей: Пер. с англ. / Под ред. Я. З. Цыпкина // Л. Льюнг – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432 с.
101. Льюнг Л. О точности модели в идентификации систем / Л. Льюнг // Известия АН. Техническая кибернетика, №6. – М.: Наука, 1992. – С. 55–64.
102. Марков С. М. Некоторые задачи интерполяции, идентификации и оценивания для интервальных данных / С. М. Марков // Межд. конф. по интерв. и стох. методам в науке и технике. ИНТЕРВАЛ – 92: Сб. тр. – Москва, 1992.– Т.1.– С. 103.
103. Матвійчук Я. М. Математичне макромодельювання динамічних систем: теорія і практика/ Я. М. Матвійчук. – Л.: Вид-во ЛНУ, 2000. – 214 с.
104. Мороз О.Г. Огляд гібридних структур МГУА-подібних нейронних мереж та генетичних алгоритмів / О. Г. Мороз, В. С. Степашко// Індуктивне моделювання складних систем. – 2015. – Вип.7. – С. 75-93.

105. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов – М.: Наука, 1971.– 207 с.

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

107. Очеретнюк Н. П. Налаштування різницевої схеми із застосуванням генетичного алгоритму на основі аналізу інтервальних даних // Н. П. Очеретнюк / Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2013) : Матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль : ТНЕУ, 2013. – С. 45-46.

108. Очеретнюк Н. П. Оптимізація параметрів генетичного алгоритму в задачі структурної ідентифікації різницевого оператора / Н. П. Очеретнюк, М. П. Дивак, І. Ф. Войтюк // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2012) : Матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль : ТНЕУ, 2012. – С. 45-47.

109. Першин И. М. Анализ и синтез систем с распределенными параметрами: Монография / И. М. Першин - Пятигорск, 2007. — 245 с.

110. Порплиця Н. П. Особливості програмної реалізації методу структурної ідентифікації інтервалних різницевих операторів на основі алгоритму бджолиної колонії // Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак/ Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2015) : Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль : ТНЕУ, 2015. – С. 32-35.

111. Порплиця Н. П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та "бджолиного" алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора / Н. П. Порплиця // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 1. – С. 55-67.

112. Порплиця Н. П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолиного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора // Н. П. Порплиця, Ю. Я. Моканюк / Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2014): Матеріали ІV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль: ТНЕУ, 2014. – С. 34-36.

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

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

115. Рапопорт Э. Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределёнными параметрами: учебное пособие / Э. Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2005. – 292 с.

116. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами: учебное пособие / Э. Я. Рапопорт. – М.: Высш. шк., 2003. – 299 с.

117. Сейдж А. Идентификация систем / А. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Наука, 1976. – 495с.

118. Степашко В. С. Гібридні алгоритми самоорганізації моделей для прогнозування складних процесів / В. С. Степашко, О. С. Булгакова, В. В. Зосімов // Індуктивне моделювання складних систем. – Вип. 2. – 2010. – С. 236- 246.

119. Степашко В. С. Елементи теорії індуктивного моделювання. – Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія / Кол. авторів. – Київ: Наукова думка, 2010. – С. 481-496.

120. Степашко В.С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов // В. С. Степашко, О. С. Булгакова / Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2. – С. 5-17.

121. Степашко В.С. Комп'ютерний експеримент в індуктивному моделюванні / Степашко В.С., Єфіменко С.М., Савченко Є.А. – Київ: Наукова думка, 2014. – 222 с.

122. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія / Під заг. ред. С.О. Субботіна. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375с.

123. Тихонов А. Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин – М.: Наука, 1979. – 288 с.

124. Тихонов А.Н. Статистическая обработка результатов экспериментов / А. Н. Тихонов, М. В. Уфимцев // Уч. пособие – М.: Изд-во Московского государственного университета, 1988. – 174 с.

125. Томашевський В.М. Моделювання систем / В.М. Томашевський – К: Видавнича група ВНУ, 2005. – 352 с.

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

127. Цой Ю. Р., Спицын В. Г. Генетический алгоритм / В. Г. Спицын, Ю.Р. Цой Представление знаний в информационных системах: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 146 с.

128. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации / Я. З. Цыпкин – М. : Наука, 1995. – 336 с.

129. Черноусько Ф. Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов / Ф. Л. Черноусько – М.: Наука. Гл. ред. физ. - мат. лит., 1988. – 320 с.

130. Шарая И. А. О максимальной внутренней оценке множеств решений интервальных линейных систем / И. А. Шарая // Вычислительные технологии. – 1998. – Т. 3 – № 2. – С. 55–66.

131. Шарый С. П. Алгебраический подход во "внешней задаче" для интервальных линейных систем / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. – 1998. – Т. 3, №2. – С. 67–114.

132. Шарый С. П. Анализ чувствительности интервальных линейных статических систем / С. П. Шарый // Труды XI международной Байкальской школы-семинара "Методы оптимизации и их приложения", Иркутск, Байкал, 5-12 июля 1998 г., секция 4. – Иркутск ИСЭМ, 1998. – С. 187–190.

133. Шарый С. П. Внешнее оценивание обобщенных множеств решений интервальных линейных систем / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии.– 1999. – Т. 4, №4. – С. 82–110.

134. Шарый С. П. Интервальные алгебраические задачи и их численное решение / С. П. Шарый // Дис. доктора физ.-математ. наук. – Новосибирск: Ин-т вычисл. технологий СО РАН, 2000. – 322 с.

135. Шарый С. П. Интервальный анализ: прошлое, настоящее и будущее / С. П. Шарый // Наука в Сибири. – 1997. – №41 (2127). – С. 3-12

136. Шарый С. П. Новый подход к анализу статических систем с интервальной определённой в данных / С. П. Шарый // Вычислительные Технологии. – 1997. – Т. 2. – №1. – С. 84-102.

137. Шокин Ю. И. Интервальный анализ / Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 1981. – 116 с.

138. Яковлев А. Г. Интервальные вычисления – предмет исследований и полезный инструмент / А. Г. Яковлев // Интервальные вычисления. – 1991. – №1. – С. 10–26.



**Додаток А****Акти впровадженнь результатів дисертаційного дослідження**

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
Директор ПП “Кабанський гіпсокартонні системи”

Рибачук В. І.  
2015 р.



### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

**Пориліці Наталії Петрівни**

“Ідентифікація інтервальних моделей об’єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії”

Ми, комісія у складі: Манжула Валентин Іванович, Войтків Ігор Олександрович, склали даний акт про те, що при організації технологічного процесу виробництва гіпсокартону та контролю його якості використано такі результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Пориліці Наталії Петрівни:

1. метод структурної ідентифікації моделей об’єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевого оператора, які прогнозують характеристики об’єктів з похибками, що не перевищують інтервальні похибки експериментальних даних;

2. математичну модель у вигляді інтервального різницевого оператора, для прогнозування розподілу вологості у листах гіпсокартону із заданою точністю. Математична модель, на відміну від існуючих, є простішою і односно ураховує більший діапазон зміни значень управляючих факторів технологічного процесу;

3. результати комп’ютерного моделювання із застосуванням розробленого програмного комплексу, які забезпечили вибір оптимальних параметрів технологічного процесу виробництва гіпсокартону на завершальній стадії.

Використання розробленого у дисертації методу структурної ідентифікації, програмного комплексу та математичної моделі розподілу вологості у листах гіпсокартону для налаштування параметрів технологічного процесу його виробництва на стадії сушіння, дозволило зменшити відсоток бракованої продукції, а також зменшити затрати часу на налаштування цього процесу, та одночасно збільшити продуктивність сушильної камери на 15%.

Заступник директора з виробничих питань



Манжула В. І.

Начальник відділу технічного контролю



Войтків І. О.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
економічного університету  
д.е.н., проф. Задорожний З. М. В.

“29” вересня 2015 р.

АКТ

про використання результатів кандидатської роботи  
Порплиці Наталії Петрівни  
“Ідентифікація інтервальних моделей об’єктів з розподіленими параметрами на основі  
поведінкових моделей бджолиної колонії”

Комісія у складі: голови – декана факультету комп’ютерних інформаційних технологій, керівника науково дослідної роботи, д.т.н., проф. Дивака М.П. та членів: завідувача відділом організації науково-дослідних робіт та маркетингу Письменного В. І., начальника відділу прогнозування і маркетингу Кушніра О. Р. склали цей акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Порплиці Н. П. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп’ютерних наук факультету комп’ютерних інформаційних технологій з безпосередньою участю автора, а саме:

- держбюджетної прикладної розробки на тему: «Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі» (номер державної реєстрації 0112U000078), у якій автором побудовано математичну модель розподілу на площині координат хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, яка на відміну від існуючих, вимагає меншої кількості вимірювань для її ідентифікації, що в свою чергу, зменшує витрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва;

- комплексного держбюджетного прикладного дослідження на тему: «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об’єктів» (номер державної реєстрації 0114U000569), у якому автором розроблено метод та програмне забезпечення для структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі поведінкових моделей бджолиної колонії;

- госпдоговірної науково-дослідної роботи на тему: «Розподілена система контролю технологічного процесу виробництва гіпсокартону» (номер державної реєстрації 0112U003917), у якій автором розроблено математичні моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на завершальній стадії його виготовлення, яка на відміну від існуючих є простішими і одночасно ураховують більший діапазон зміни значень управляючих факторів технологічного процесу;

- кафедральної науково-дослідної роботи на тему «Макромодельовання складних систем та процесів в умовах структурної невизначеності на основі неточних даних» (номер державної реєстрації 0111U010356), у якій автором розроблено математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення для реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних моделей об’єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів.

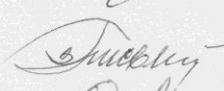
**Голова комісії**

декан факультету комп’ютерних  
інформаційних технологій,  
керівник НДР, д.т.н., проф.

**Члени комісії:**

Зав. відділом науково-дослідних  
робіт та маркетингу НДІ ІРД  
Начальник відділу прогнозування  
і маркетингу

 Дивак М. П.

 Письменний В. І.

 Кушнір О. Р.

“ЗАТВЕРДЖУЮ”  
Перший проректор  
Тернопільського національного  
економічного університету  
Шинкарик М. Ш. ЕКОНОМ. НА



АКТ

про впровадження в навчальний процес Тернопільського національного економічного університету результатів дисертаційної роботи  
**Порплиці Наталії Петрівни**  
«Ідентифікація інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії»

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Порплиці Наталії Петрівни на тему: «Ідентифікація інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії» використані в навчальному процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету для студентів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення».

При викладанні дисциплін «Програмні засоби моделювання динамічних систем», «Технологія .NET» та «Інтервальні обчислення та інтервальний аналіз» надається інформація щодо структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії; у процесі виконання лабораторних робіт використовується розроблене у дисертаційній роботі програмне забезпечення для структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами і вигляді різницевих операторів.

Декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
д.т.н., професор

М. П. Дивак

В. о. завідувача кафедри комп'ютерних наук  
к.т.н., доцент

А. В. Пукас

К.т.н., доцент кафедри комп'ютерних наук

М. Я. Шпінталь

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Головний лікар Тернопільської  
міської комунальної лікарні швидкої  
допомоги

*Навесь*  
Чайківський Я.Ф.

“29” вересня 2015 р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи  
Порплиці Наталії Петрівни

**“Ідентифікація інтервальних моделей об’єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії”**

У процесі проведення хірургічних операцій на щитоподібній залозі використано результати дисертаційної роботи аспірантки кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Порплиці Наталії Петрівни, а саме математичну модель розподілу на площині координат хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, який є реакцією на подразнення тканин хірургічної рани змінним струмом. Зазначена математична модель, на відміну від існуючих, вимагає меншої кількості вимірювань для її ідентифікації, що в свою чергу, зменшує витрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва.

Результатом застосування запропонованої моделі є зниження ризику пошкодження зворотного гортанного нерва та зменшення часу проведення операції на щитоподібній залозі.

Відповідальний за впровадження  
д.м.н., проф. каф. хірургії №1 з урологією  
імені професора Л. Я. Ковальчука  
Тернопільського державного медичного  
університету ім. І. Я. Горбачевського

*Шідловський В. О.*

Шідловський В. О.

## Додаток Б

### 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 prognosValues = 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 prognosWidth = prognosValues[i, j].Up - prognosValues[i, j].Down;
            var listResult = OperationInterval.CrossInterval(prognosValues[i, j],
experimentalValues[i, j]);
            if (listResult.Count == 1)
            {
                var unionInterval = (IntervalValue)listResult[0];
                var secondWidth = unionInterval.Up - unionInterval.Down;

                var centre = Math.Abs(((prognosValues[i, j].Up + prognosValues[i, j].Down) / 2)
- ((experimentalValues[i, j].Up + experimentalValues[i, j].Down) / 2));

                listVidstan.Add(prognosWidth - 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(oneAllowedOperation,
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),
jParam));
    for (var i = 1; i < _allSettings.InputDataSeting.MaxStepRow - 1; i++)
    {
        allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam, iParam,
Expression.Subtract(jParam, Expression.Constant(i))));
    }

    for (var i = 1; i < _allSettings.InputDataSeting.MaxStepColumn; i++)
    {
        allPrognosValues.Add(Expression.ArrayIndex(arrayParam,
Expression.Subtract(iParam, Expression.Constant(i)), jParam));
    }

    for (var i = 0; i <= _allSettings.InputDataSeting.MaxStepRow; i++)
    {
        for (var j = 0; j <= _allSettings.InputDataSeting.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

}
}

```