

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**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

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
**Дивак Микола Петрович**,  
Тернопільський національний економічний  
університет, декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Степашко Володимир Семенович**,  
Міжнародний науково–навчальний центр  
інформаційних технологій та систем НАН та МОН  
України, завідувач відділу інформаційних технологій  
індуктивного моделювання;

кандидат технічних наук, доцент, ст. наук. співр.  
**Юзефович Роман Михайлович**,  
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН  
України, завідувач лабораторії вібродіагностики.

Захист відбудеться «24» березня 2016 р. о 16<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 2, корп. 11, ауд. 218).

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

Автореферат розіслано «22» лютого 2016 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Р. А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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 невідомих 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 вагомі результати 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 бджолої 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 (ІРО).

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 бджолої 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 ІРО на основі поведінкових моделей бджолої 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 яких ґрунтується на генетичних алгоритмах;
- розробити програмний комплекс для структурної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО 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 макромодельовання 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 бджолоїної 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 бджолоїної 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 бджолоїної 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 С# 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».

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автором: [1] – розроблено метод структурної ідентифікації ІРО

на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та аналізу інтервальних даних та нейроподібну обчислювальну схему його реалізації; [2] – запропоновано та обґрунтовано поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії, що дало можливість створити теоретичну основу методів структурної ідентифікації моделей у вигляді ІРО; [4] – 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; [5] – 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; [6] – побудовано математичну модель розподілу на площині координат хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу; [7] – розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії; [8] – проведено апробацію розробленого методу структурної ідентифікації на прикладі побудови моделі розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння; [9] – встановлено основні аналогії функціонування бджолоїної колонії стосовно алгоритму розв’язування задачі структурної ідентифікації ІРО; [10] – проведено порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолоїного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей об’єктів з розподіленими параметрами; [11] – розроблено програмний комплекс для структурної ідентифікації математичних моделей об’єктів з розподіленими параметрами у вигляді ІРО; [12] – проаналізовано особливості моделювання об’єктів з розподіленими параметрами на основі експериментальних даних представлених в інтервальному вигляді; [13] – 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 Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та комп’ютерної інженерії” (TCSET’2012, TCSET’2014) (Львів – Славсько, 2012, 2014); на XII та XIII Міжнародних науково-технічних конференціях “Досвід розробки й застосування САПР в мікроелектроніці” (CADSM’2013, CADSM’2015) (Львів – Поляна, 2013, 2015); на 16-й Міжнародній конференції “Обчислювальні проблеми електротехніки” (СРЕЕ’2015) (Львів, 2015); на II, III, IV, V Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів “Сучасні комп’ютерні інформаційні технології” (АСІТ’2012 – АСІТ’2015) (Тернопіль, 2012-2015); на Міжнародних школах-семінарах для молодих науковців “Індуктивне моделювання: 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 [1-5], 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus [1, 4], 9 публікацій у матеріалах конференцій [6-14], 2 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus [9, 12].

**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.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** зазначено актуальність проблеми, обґрунтовано мету та основні задачі дослідження. Описано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано наукову новизну отриманих результатів дисертаційного дослідження. Зазначено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** проаналізовано особливості моделювання об'єктів з розподіленими параметрами в умовах структурної невизначеності. Водночас досліджено особливості побудови математичних моделей для розв'язання задачі забезпечення якості продукції під час виробництві гіпсокартону та задачі визначення ризиконебезпечної області хірургічного втручання в процесі операції на щитоподібній залозі пацієнта.

Показано, що для обох задач доцільно представляти виміряні значення модельованої характеристики в інтервальному вигляді:

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

де  $z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+$  – відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень модельованої характеристики у точці з дискретно-заданими координатами  $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, h = 1, \dots, H$  та часовою дискретною  $k = 1, \dots, K$ .

Розглянуто два основних підходи до побудови математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами – дедуктивний та індуктивний. На основі дедуктивного підходу математичні моделі зазначеного класу об'єктів будують, з огляду на фізичні міркування та базуючись на фундаментальних законах. У цьому випадку модельований об'єкт описують у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних. Однак застосування дедуктивного підходу вимагає визначення коефіцієнтів дифузії, тепло- та масоперенесення, детального вивчення фізики процесу тощо. Якщо зважати на зазначені недоліки дедуктивного підходу, то для обох задач необхідно побудувати математичні моделі у вигляді «чорної скриньки» із застосуванням методів індуктивного моделювання.

Водночас математичну модель об'єкта запропоновано конструювати у вигляді різницевого оператора (схеми). Різницевий оператор синтезують на основі експериментальних даних у такому загальному вигляді:



$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T (v_{0,0,0,0}, \dots, v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0}, \dots, v_{0,j-1,0,0}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \quad i=1, \dots, I, \quad j=1, \dots, J, \quad h=1, \dots, H, \quad k=1, \dots, K, \quad (2)$$

де  $\vec{f}^T(\bullet)$  – невідомий вектор базисних функцій; символ  $(\bullet)$  означає набір аргументів у виразі (2);  $v_{i,j,h,k}$  – модельована характеристика в точці з дискретно-заданими 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 (управлінь);  $\vec{g}$  – невідомий вектор параметрів різницевого оператора.

Показано, що актуальною є задача структурної ідентифікації різницевого оператора, яка ускладнюється у випадку, якщо експериментальні дані представлено в інтервальному вигляді (1).

Вектор оцінок  $\hat{\vec{g}}$  параметрів  $\vec{g}$  та вектор базисних функцій  $\vec{f}^T(\bullet)$  у різницевому операторі (2) отримуємо за умов забезпечення точності моделі в межах похибок вимірювання модельованої характеристики:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] \in [z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+], \quad i=1, \dots, I, \quad j=1, \dots, J, \quad h=1, \dots, H, \quad k=1, \dots, K. \quad (3)$$

У виразі (3)  $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$  означає інтервальні оцінки прогнозованої характеристики, які обчислюємо на основі такого різницевого оператора:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] = [\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+] = \vec{f}^T ([\hat{v}_{0,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,0,0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j-1,0,0}], \dots, [\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \hat{\vec{g}}, \quad i=1, \dots, I, \quad j=1, \dots, J, \quad h=1, \dots, H, \quad k=1, \dots, K. \quad (4)$$

Узявши до уваги те, що всі обчислення у різницевому операторі (4) необхідно проводити із застосуванням правил інтервальної арифметики, називаємо його інтервальним різницевим оператором.

Складність задачі налаштування ІРО (4) полягає в тому, що невідомими є не лише параметри, а і його загальний вигляд, тобто структура.

Поточну структуру ІРО  $\lambda_s$  подаємо у вигляді такого набору елементів:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \quad (5)$$

де  $\vec{f}^s = \{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$  – набір базисних функцій (структурних елементів), що задає поточну  $s$ -ту структуру ІРО;  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$  – кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина усіх структурних елементів,  $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots, g_{m_s}^s\}$  – вектор невідомих значень параметрів, який для поточної структури ІРО оцінюємо на основі відомих методів параметричної ідентифікації.

Якість поточної структури ІРО визначаємо за значенням функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , яке кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної, тобто такої, що забезпечує умови (3).

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

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{\vec{g}}^s, \vec{f}^s(\bullet)} \min, \quad m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \quad \vec{f}^s(\bullet) \in F. \quad (6)$$

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

Далі у розділі проведено огляд та аналіз існуючих методів структурної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами. Показано, що МГУА є не придатними, коли необхідно забезпечити гарантовані прогностичні властивості моделі, оскільки вони ґрунтуються на критерії мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними. Також у розділі розглянуто відомі методи структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів. Унаслідок проведеного аналізу було виявлено, що ці методи мають ряд недоліків, основними з яких є відсутність механізму уникнення локальних екстремумів складної багатоекстремальної функції мети задачі структурної ідентифікації (6) та надмірна обчислювальна складність. Саме тому застосування таких методів є не прийнятним у випадку розв'язування задачі моніторингу зворотного гортанного нерва в реальному масштабі часу.

Обґрунтовано необхідність застосування принципів ройового інтелекту для розв'язування задачі структурної ідентифікації моделі з гарантованими прогностичними властивостями у вигляді IPO, зокрема поведінкових моделей бджолоїної колонії. У заключній частині цього розділу сформульовано основні задачі дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** запропоновано та обґрунтовано поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії, що забезпечило створення теоретичної основи для нових простіших методів структурної ідентифікації моделей із гарантованими прогностичними властивостями у вигляді IPO.

Поведінкова модель бджолоїної колонії містить такі компоненти: правила прийняття рішень робочими бджолами, бджолами-дослідниками, бджолами-розвідниками; модуль комунікації та мобільності бджолоїної колонії; процедури дослідження околу відомого джерела нектару, виявлення вичерпаних джерел нектару, вибору відомого джерела нектару, випадкового пошуку нового джерела нектару, визначення якості джерела нектару, запам'ятовування координат та якості джерела нектару; область пошуку джерел нектару; джерела нектару.

Встановлено основні аналогії між поведінковими моделями бджолоїної колонії та алгоритмами розв'язування задачі структурної ідентифікації. У контексті задачі структурної ідентифікації IPO *поведінка бджоли* при виборі місцезнаходження джерела нектару безпосередньо реалізує алгоритм синтезу поточної структури IPO; *область пошуку нектару* – множина допустимих розв'язків задачі структурної ідентифікації IPO, тобто множина усіх можливих структур IPO; *окіл джерела нектару* – множина структур IPO, що можуть бути згенеровані на основі поточної структури IPO шляхом часткової заміни її структурних елементів; *координати джерела нектару* – поточна структура IPO

$\lambda_s$ ; *якість джерела нектару* визначаємо обчисленим значенням функції  $\delta(\lambda_s)$ , що задає точність моделі, побудованої на основі поточної структури.

Встановлено, що побудова методу структурної ідентифікації на основі поєднання методів аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії забезпечить розширення покриття простору розв'язків задачі без підвищення обчислювальної складності реалізації методу, що також забезпечить можливість знаходження простіших структур математичних моделей у вигляді IPO.

Розширення покриття простору розв'язків задачі структурної ідентифікації методом на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії забезпечуємо через неоднорідність цього покриття, що схематично показано на рис. 1,б, водночас метод структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів покриває цю область більш рівномірно (див. рис. 1,а).

Неоднорідність покриття простору розв'язків задачі структурної ідентифікації IPO забезпечуємо шляхом реалізації *фази активності бджіл-дослідників*. Це означає швидке виявлення ділянок простору розв'язків із локальними мінімумами функції мети  $\delta(\lambda_s)$ .

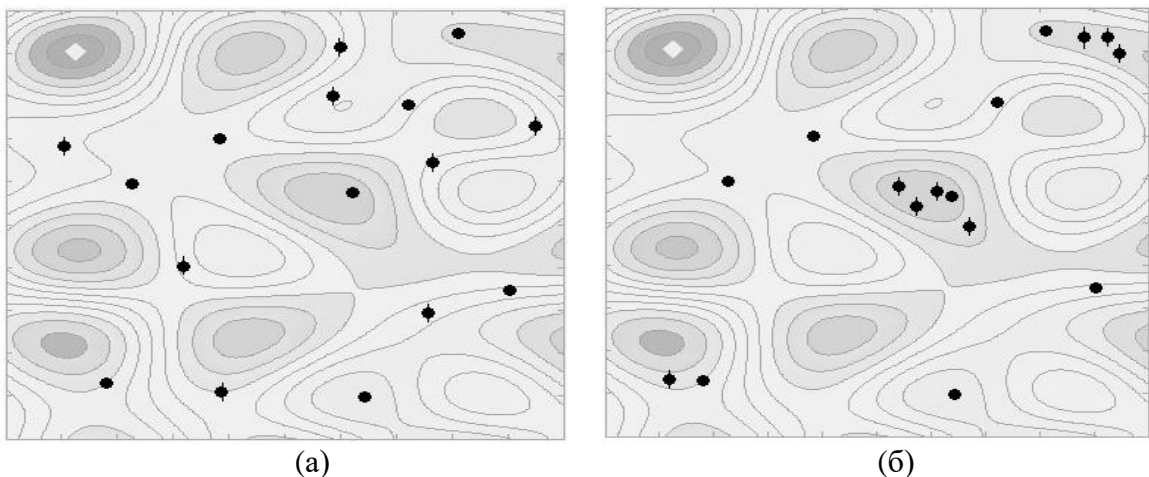


Рис. 1. Схематичне зображення покриття простору розв'язків задачі (а) відомими методами (зокрема на основі генетичних алгоритмів), (б) методом на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

Реалізація фази активності бджіл-розвідників створює ефективний механізм для «виходу» з локальних мінімумів функції мети, а також пришвидшення пошуку «нових» ділянок, які містять точки мінімуму функції мети. Це забезпечує, з одного боку, можливість знаходження простих структур математичних моделей, а з іншого – зниження обчислювальної складності застосування методу.

Ширше покриття простору розв'язків задачі структурної ідентифікації методом на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії реалізовано через генерування «нових» структур IPO на основі лише на однієї «структури-предка». Водночас кількість згенерованих на основі поточної структури IPO «структур-нащадків» прямо пропорційно залежить від значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , яким характеризується «структура-предок».

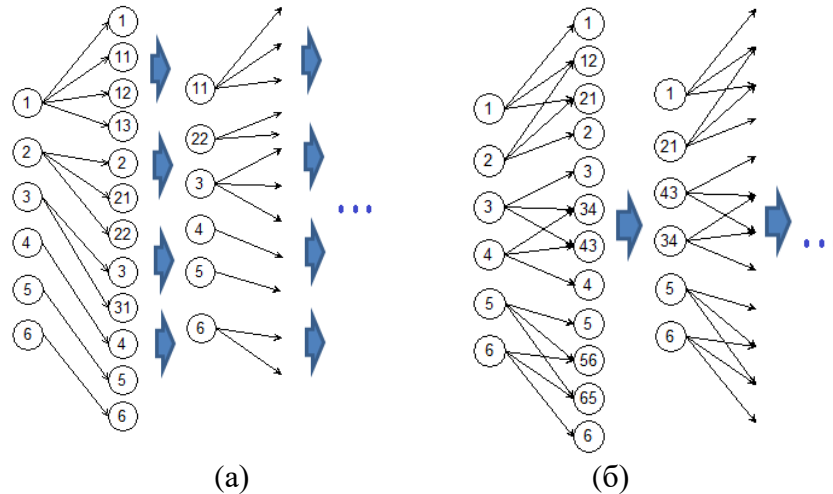


Рис. 2. Схема процедури генерування структур IPO (а) у методі на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії; (б) у методі на основі генетичних алгоритмів

Процес генерування нових структур із застосуванням кожного з методів структурної ідентифікації схематично показано на рис. 2. На рис. 2,б проілюстровано спосіб генерування «структур-нащадків» у методах на основі генетичних алгоритмів, де, наприклад, для поточних структур 1 та 2 генерують дві «структури-нащадки»: 12, 21. У межах такого підходу «структури-предки» для схрещування обираються випадковим чином. А в методі структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії генерування «структур-нащадків» здійснюємо за рахунок однієї «структури предка», як видно з рис. 2,а. Наприклад, на основі «структури-предка» 1 згенеровано нащадків 11, 12, 13. Водночас кількість генерованих «структур-нащадків» визначаємо на основі значення функції мети «структури-предка».

У **третьому розділі** 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 (див. рис. 3).

На рис. 3 фаза ініціалізації означає ініціалізацію початкових параметрів методу. Задаємо значення початкових параметрів налаштування методу:  $MCN$  – максимальна кількість ітерацій;  $LIMIT$  – максимально можлива кількість ітерацій «незмінності» структури, тобто якщо структура IPO не «покращувалась» уже  $LIMIT$  разів, то вона вважається «вичерпаною»;  $[I_{\min}; I_{\max}]$  – інтервал, межі якого задають відповідно найменшу  $I_{\min}$  та найбільшу  $I_{\max}$  кількість структурних елементів у структурі IPO  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина всіх структурних елементів. Далі формуємо початкову множину структур IPO  $\Lambda_0$  потужності  $S$ .

«Фазу I» – синтез множини поточних структур IPO  $\Lambda'_{mcn}$ , який здійснюємо шляхом перетворення поточної множини структур  $\Lambda_{mcn}$  ( $mcn$  – номер поточної ітерації) у множину структур IPO  $\Lambda'_{mcn}$  (за аналогією до поведінкових моделей бджолоїної колонії – «фази активності робочих бджіл»).

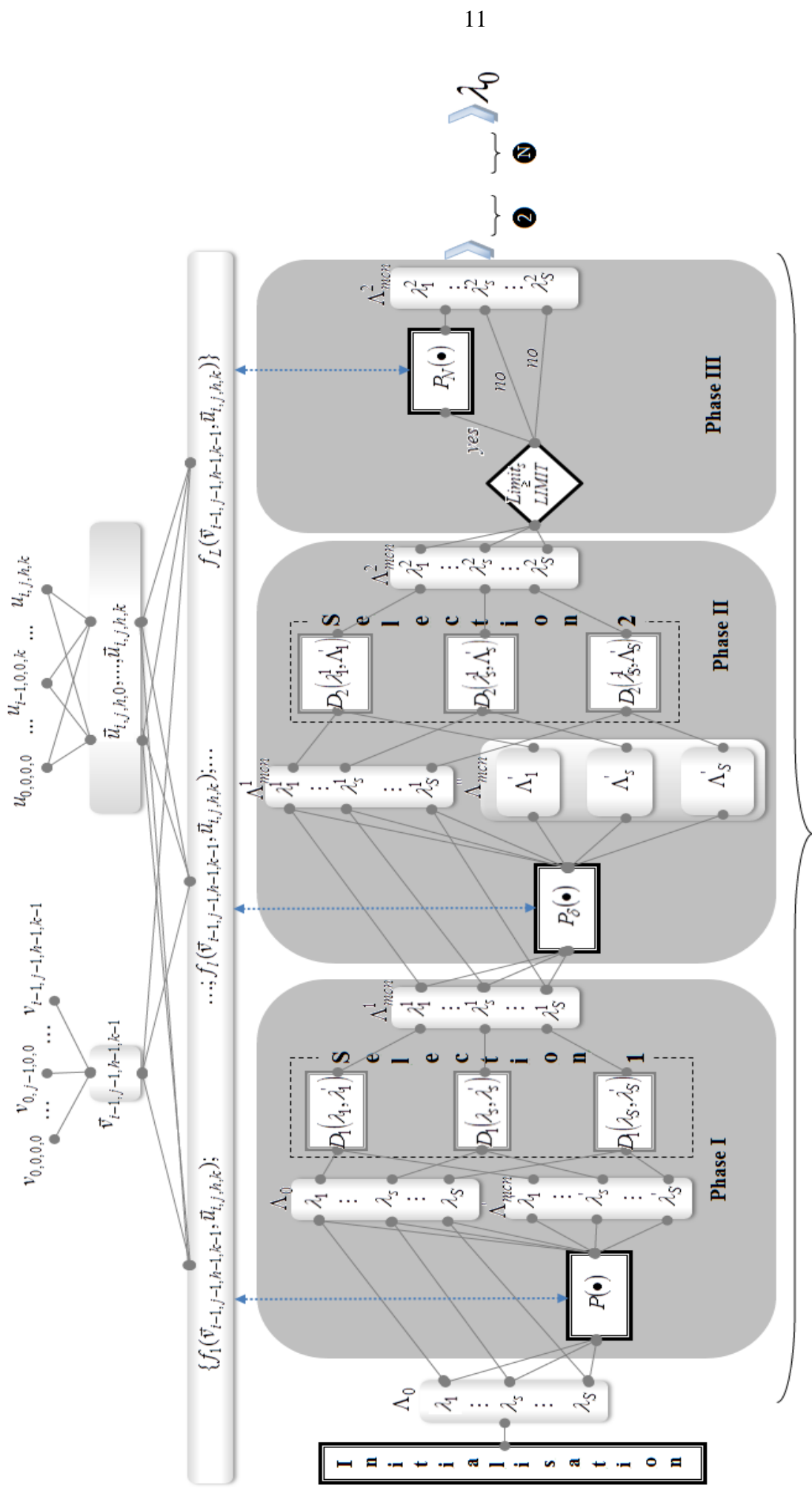


Рис. 3. Нейроподібна обчислювальна схема реалізації методу структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії

Таке перетворення виконуємо шляхом заміни випадковим чином частини елементів кожної структури  $\lambda_s$  елементами із набору  $F$ .

Кількість замінюваних елементів поточної структури визначаємо за таким принципом: чим нижча «якість» структури ІРО, тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Далі проводимо попарну селекцію структур ІРО та формуємо множину найкращих структур  $\Lambda_{mcn}^1$ .

«Фаза II», перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  із множини структур  $\Lambda_{mcn}^1$  у множину структур ІРО  $\Lambda'_s$  (де  $s=1\dots S$ ), яке відбувається шляхом заміни випадковим чином елементів кожної структури  $\lambda_s^1$  елементами із набору  $F$  (за аналогією до поведінкових моделей бджолоїної колонії – «фази активності бджіл-дослідників»). Позначимо за  $\Lambda_{mcn}''$  таке об'єднання множин:

$$\Lambda_{mcn}'' = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}, s=1\dots S. \quad (7)$$

Варто зазначити, що потужність множини  $\Lambda'_s$  визначаємо для кожної структури  $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1$ , на основі якої генеруємо множину  $\Lambda'_s$ , індивідуально за таким принципом: чим «якісніша» структура ІРО  $\lambda_s^1$ , тим більша потужність множини  $\Lambda'_s$ . Далі проводимо погрупову селекцію поточних структур ІРО та формуємо множину найкращих структур  $\Lambda_{mcn}^2$  із поточних множин  $\Lambda_{mcn}^1$  і  $\Lambda_{mcn}''$  способом селекції структур ІРО  $\lambda_s^2$ .

«Фаза III» – перевірка «критерію відмови» (за аналогією до поведінкових моделей бджолоїної колонії – «фази активності бджіл-розвідників»). Усі структури  $\lambda_s^2 \in \Lambda_{mcn}^2$ , для яких виконується умова  $Limit_s \geq LIMIT$ , вважаємо «вичерпаними». Якщо структура є «вичерпаною», то заміняємо її «ною» (генеруємо випадковим чином із набору  $F$ ). Якщо знайдено структуру, для якої  $\delta(\lambda_s^2) = 0$ , то завершуємо процедуру структурної ідентифікації або повертаємося до «Фази 2».

У цьому розділі також розглянуто приклад застосування розробленого методу структурної ідентифікації для побудови моделей розподілу вологості на поверхні листа гіпсокартону на стадії його сушіння. Одна із отриманих моделей має такий вигляд:

$$\begin{aligned} [\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+] &= 0.1867 - 0.2779 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+] \\ &- 0.4362 \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-2,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-2,k}^+] + 0.6187 \cdot (u_{1,0} \cdot u_{2,k} / u_{2,0} \cdot u_{1,k}) \cdot [\widehat{v}_{i-1,j,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j,k}^+] \quad (8) \\ &+ 0.8337 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] - 0.02 \cdot [\widehat{v}_{i,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i,j-1,k}^+] \cdot [\widehat{v}_{i-1,j-1,k}^-; \widehat{v}_{i-1,j-1,k}^+], \end{aligned}$$

де  $[\widehat{v}_{i,j,k}^-; \widehat{v}_{i,j,k}^+]$  – 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 та  $u_{2,0}, u_{2,k}$  – швидкості переміщення листа в сушильній камері.

На прикладі побудови зазначених моделей проведено порівняльний аналіз методів структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів (ГА) та

поведінкових моделей бджолоїної колонії (ПМБК). Для порівняння враховано два показники: простоту моделі та обчислювальну складність застосування методу. У процесі досліджень проведено 50 обчислювальних експериментів.

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%.

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.

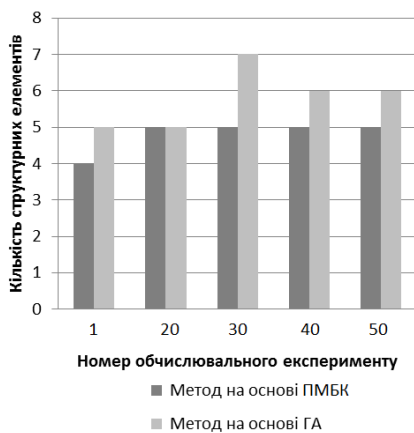


Рис. 4. Кількість структурних елементів в отриманих структурах моделей

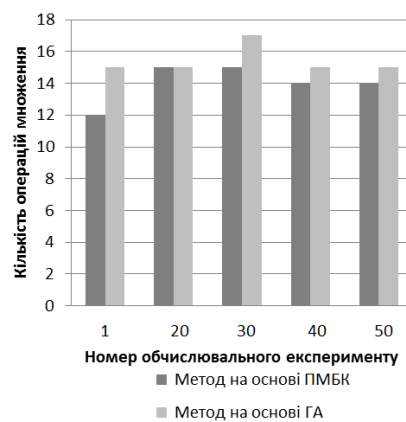


Рис. 5. Кількість операцій множення, які необхідно виконати для прогнозування значення вологості на поверхні листа гіпсокартону для однієї точки

Результати проведеного порівняння складності отриманих структур моделей у вигляді ІРО проілюстровано на рис. 4 та рис. 5. Як бачимо з цих рисунків, структури ІРО отримані внаслідок застосування методу структурної ідентифікації, який ґрунтується на поведінкових моделях бджолоїної колонії, є простішими, ніж структури ІРО, отримані на основі методу, який ґрунтується на генетичних алгоритмах.

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.

У **четвертому розділі** розроблено програмний комплекс для реалізації методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, а також проведено його апробацію для побудови математичної моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі.

Для реалізації програмного комплексу було застосовано технологію .NET, мову програмування C# та використано інтегроване середовище розробки

програмних продуктів Microsoft Visual Studio. Для зручності користування програмним комплексом розроблено графічний веб-інтерфейс.

Далі у цьому розділі 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. Слід зазначити, що пошкодження зворотного гортанного нерва під час хірургічної операції на щитоподібній залозі може призвести до порушень звуковимови, дихальних розладів, втрати голосу тощо, через що профілактика пошкоджень зворотного гортанного нерва є нагальною і становить актуальну задачу ендокринної хірургії. Саме тому доцільно побудувати математичну модель розподілу на площині хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу, яка б відображала інтервальну оцінку максимальної амплітуди інформаційного сигналу залежно від розташування точки подразнення на хірургічній рані.

Зауважимо, що подібні моделі вже застосовують для задач моніторингу зворотного гортанного нерва, проте вони побудовані у вигляді алгебричних виразів, унаслідок чого кожного разу вимагають великої кількості вимірювань, а відповідно й значних затрат часу для їх налаштування під конкретного пацієнта. Однак під час проведення хірургічної операції важливо забезпечити можливість проведення моніторингу зворотного гортанного нерва в реальному масштабі часу, що спонукає до спрощення процесу моніторингу за рахунок спрощення самої моделі та зменшення затрат часу для її налаштування. Тому доцільно побудувати зазначену модель у вигляді інтервального різницевого оператора.

Для проведення процедури структурної ідентифікації моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні хірургічної рани під час операції на щитоподібній залозі у вигляді ІРО було використано результати вимірювань із табл. 1.

Таблиця 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
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
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 табл. 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.

У процесі досліджень із застосуванням методу структурної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії було отримано модель розподілу максимальної амплітуди інформаційних сигналів у такому вигляді:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_{i,j,k}^-; \hat{v}_{i,j,k}^+] = & 0.2109 + 0.2025 \cdot [\hat{v}_{i,j-2}^-; \hat{v}_{i,j-2}^+] + \\ & 0.8346 \cdot [\hat{v}_{i-1,j}^-; \hat{v}_{i-1,j}^+] + 0.2437 \cdot [\hat{v}_{i-1,j+2}^-; \hat{v}_{i-1,j+2}^+] + 0.6951 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1}^-; \hat{v}_{i-1,j-1}^+] - \\ & 0.0004 \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i-2,j-2}^-; \hat{v}_{i-2,j-2}^+] - 0.0236 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1}^-; \hat{v}_{i-1,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i-1,j-2}^-; \hat{v}_{i-1,j-2}^+], \\ & i=2\dots 5, j=2\dots 5, \end{aligned} \quad (9)$$

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  $\{i=0,1, j=0,\dots,5\} \vee \{i=0,\dots,5, j=0,1\}$  – задані початкові умови.

ІРО (9) дає можливість визначити ризиконебезпечну область хірургічного втручання. Розподіл максимальної амплітуди інформаційних сигналів, отриманий на основі ІРО (9), проілюстровано на рис. 6.

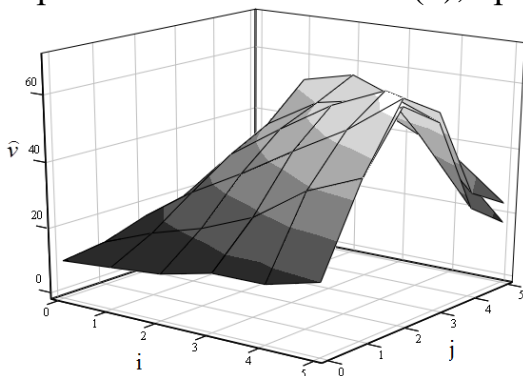


Рис. 6. Коридор інтервальних моделей для розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу

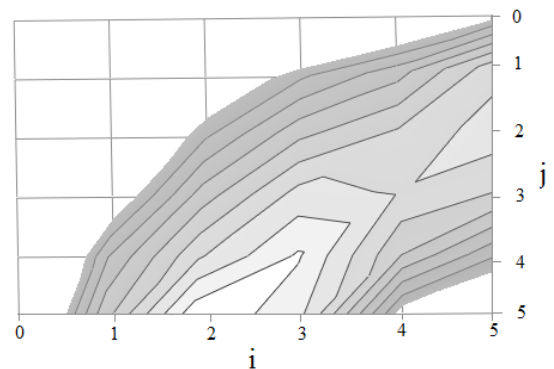


Рис. 7. Ілюстрація розміщення фрагмента зворотного гортанного нерва на площині хірургічної рани

На основі відомого правила було визначено ризиконебезпечну область хірургічного втручання, її проілюстровано на рис. 7 (виділено сірим кольором).

Математична модель розподілу на площині хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу (9), на відміну від існуючих, вимагає меншої кількості вимірювань для ідентифікації, чим зменшує затрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва. Варто значити, що це забезпечило можливість застосування математичної моделі (9) 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 IPO. Теоретично обґрунтовано зниження обчислювальної складності застосування таких методів структурної ідентифікації моделей із гарантованими прогностичними властивостями у вигляді IPO 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 IPO 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. 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.
2. Порплиця Н. П. Синтез структури інтервального різницевого оператора з використанням алгоритму бджолоїної колонії / Н. П. Порплиця, М. П. Дивак // *Індуктивне моделювання складних систем*. – 2013. – Вип. 5. – С. 256-269.
3. Порплиця Н. П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та "бджолоїного" алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора / Н. П. Порплиця // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – 2015. – № 1. – С. 55-67.
4. Порплиця Н. П. Реалізація методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі алгоритму поведінки бджолоїної колонії / Н. П. Порплиця, М. П. Дивак // *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. – 2015. – Вип. 4(93). – С. 34-40.
5. Очеретнюк Н. П.<sup>1</sup> 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Порплиця Н. П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолоїного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора // Н. П. Порплиця, Ю. Я. Моканюк / *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2014): Матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів*. – Тернопіль: ТНЕУ, 2014. – С. 34-36.

<sup>1</sup> Прізвище Очеретнюк змінено на Порплиця згідно зі свідоцтвом про одруження (Серія І-ІД №098090)

11. Порплиця Н. П. Особливості програмної реалізації методу структурної ідентифікації інтервал них різницевих операторів на основі алгоритму бджолоїної 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

## АНОТАЦІЇ

**Порплиця Н. П. Ідентифікація інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуального наукового завдання структурної ідентифікації різницевих операторів (ІРО) на основі аналізу інтервальних даних, отриманих унаслідок спостережень за реальними процесами з похибками, обмеженими за амплітудою.

Проаналізовано особливості задач моделювання об'єктів з розподіленими параметрами в умовах структурної невизначеності та методів їх розв'язування. Обґрунтовано необхідність застосування принципів ройового інтелекту для розв'язування задачі структурної ідентифікації математичної моделі. Сформульовано теоретичні основи застосування принципів ройового інтелекту для розв'язування задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевих операторів та обґрунтовано переваги її застосування.

Розроблено новий метод структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та нейроподібну обчислювальну схему його реалізації. Проведено їх апробацію для побудови моделей розподілу вологості на поверхні

листа гіпсокартону. Проведено порівняльний аналіз ефективності методів структурної ідентифікації на основі генетичних алгоритмів та на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії.

Розроблено програмне забезпечення та з його використанням проведено апробацію розробленого методу структурної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді різницевого оператора на прикладі побудови математичної моделі розподілу на площині хірургічної рани максимальної амплітуди інформаційного сигналу.

*Ключові слова:* різницевий оператор, структурна ідентифікація, інтервальні дані, алгоритм бджолоїної колонії, математична модель.

**Порплица Н. П. Идентификация интервальных моделей объектов с распределенными параметрами на основе поведенческих моделей пчелиной колонии.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению актуального научного задания структурной идентификации разностных операторов с помощью анализа интервальных данных, полученных в результате наблюдений за реальными процессами с погрешностями, ограниченными по амплитуде.

Проанализированы особенности задач моделирования объектов с распределенными параметрами в условиях структурной неопределенности и методов их решения. Проведены обзор и анализ существующих методов структурной идентификации моделей объектов с распределенными параметрами. Обоснована необходимость применения принципов роевого интеллекта для решения задачи структурной идентификации математической модели. Сформулированы теоретические основы применения принципов роевого интеллекта к задаче структурной идентификации интервальных моделей объектов с распределенными параметрами в виде разностных операторов и обоснованы преимущества их применения.

Разработаны новый метод структурной идентификации интервальных моделей объектов с распределенными параметрами с использованием поведенческих моделей пчелиной колонии и нейроподобная вычислительная схема его реализации. Проведено их апробацию для построения модели распределения влажности на поверхности листа гипсокартона. Проведен сравнительный анализ эффективности методов структурной идентификации с применением генетических алгоритмов и с применением поведенческих моделей пчелиной колонии.

Разработано программное обеспечение, с использованием которого было проведено апробацию разработанного метода структурной идентификации интервальных моделей объектов с распределенными параметрами в виде разностных операторов на примере построения математической модели распределения максимальной амплитуды информационного сигнала на плоскости хирургической раны.

*Ключевые слова:* разностный оператор, структурная идентификация, интервальные данные, алгоритм пчелиной колонии, математическая модель.

**Porplytsya N. Identification of interval models for distributed parameters objects based on the behavioral models of the bee colony.** – *On the right of manuscript.*

Thesis for a Ph.D degree in Technical Sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

Dissertation is devoted to the actual scientific task of structure identification of difference operators based on analysis the interval data obtained in the observations of real processes with errors, bounded by the amplitude.

The features of modeling the distributed parameters objects in terms of structure uncertainty was analyzed. The review and analyses of the known methods for identification the models of the distributed parameters objects were provided. It was shown that some of these methods is characterized by a high computational complexity of searching mathematical model, which is not usually optimal, overly is complicated, and others, in particular the group method of data handling, does not provide specified accuracy of the simulation within the error of the experimental data. The necessity of applying the swarm intelligence principles for solving tasks of structure identification of the mathematical model was shown.

The main components of the behavioral model of the bee colony and the relationships between them was analyzed. The basic analogy between behavioral model of the bee colony and the main procedures of the method for structure identification of mathematical models of distributed parameters objects in the form of interval difference operators were formulated.

The theoretical basis for using of the swarm intelligence principles to the building the method of solving the problem of structure identification of mathematical models of distributed parameters objects in the form of interval difference operators were formulated.

The new method for structure identification of the mathematical models of distributed parameters objects in the form of interval difference operators based on the behavioral models of the bee colony was created. Also the neural-like computation scheme of implementation the method was created.

The developed method for structure identification and his neural-like computation scheme was tested for building the model of the humidity distribution on the drywall sheet surface. The comparative analysis of the effectiveness of the methods for structure identification based on the genetic algorithms and based on the behavioral models of the bee colony was held.

Software for implementation of developed method for the structure identification of the interval difference operators was created. Developed software was used for building the interval model of the information signal maximum amplitude distribution on the plane surface of the surgical wound, which determines the location of the recurrent laryngeal nerve among the muscle tissue.

Advantages of the using the obtained interval model for the problem of the recurrent laryngeal nerve visualization, in comparison to the known analogs, were shown.

*Keywords:* difference operator, structure identification, interval data, artificial bee colony algorithm, mathematical model.

Підписано до друку 19.02.2016 р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Зам. № 3-231  
Умов.-друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 1,0  
Тираж 100 прим.

Віддруковано ФО-П Шпак В. Б.  
Свідоцтво про державну реєстрацію В02 № 924434 від 11.12.2006 р.  
Свідоцтво платника податку: Серія Е № 897220  
м. Тернопіль, вул. Просвіти, 6.  
тел. 8 097 299 38 99  
E-mail: tooums@ukr.net