

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора

Лупенка Сергія Анатолійовича

на дисертаційну роботу Пукаса Андрія Васильовича

на тему: «Методи та засоби побудови математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності»

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Актуальність теми дисертаційного дослідження. Використання інтелектуалізованих інформаційних систем, орієнтованих на дані (data-driven), які спрощують процеси прийняття рішень в різних галузях, зокрема економіки, охорони здоров'я та навколишнього середовища, промисловості є однією із головних тенденцій розвитку інформаційних технологій. Математичні моделі та методи опрацювання даних на їх основі становлять серцевину математичного забезпечення цих інтелектуалізованих систем та суттєво визначають якість (точність, достовірність, інформативність та обчислювальну складність) їх функціонування.

Більшість таких інтелектуалізованих систем функціонують в умовах інтервальної, стохастичної чи нечіткої невизначеності. Врахування інтервальної невизначеності у таких системах здійснюється шляхом застосування теоретико-множинного інтервального підходу, який враховує межові значення похибок, із якими отримано дані, та дає можливість побудувати інтервальні моделі статичних та динамічних об'єктів з гарантованими прогностичними властивостями.

Розробка ефективних методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності є важливою та, водночас, складною проблемою, оскільки використання методів ідентифікації таких моделей ускладнено тим, що, наразі, не існує єдиної методологічної бази для побудови моделей як статичних, так і динамічних систем та об'єктів. Крім того, застосування цього підходу призводить до суттєвого підвищення обчислювальної складності методів та алгоритмів структурної та параметричної ідентифікації моделей.

У цьому контексті, дисертаційна робота Пукаса Андрія Васильовича, у якій розв'язано важливу науково-прикладну проблему зниження трудомісткості та обчислювальної складності процесів побудови математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності з одночасним забезпеченням гарантованої точності цих моделей в межах необхідних для розв'язування задач прийняття рішень, без сумніву, є актуальною роботою.

Аналіз змісту дисертаційного дослідження. Дисертаційна робота складається зі вступу шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 292 сторінки, із них 205 сторінок основного тексту, 48 рисунків, 21 таблиця. Список використаних джерел із 269 найменувань.

У *вступі* автором обґрунтовано актуальність дисертаційного дослідження, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, зазначено особистий внесок дисертанта, публікації та апробацію запропонованих наукових розробок.

У *першому розділі* автором здійснено аналіз методів та засобів побудови інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів, також розглянуто методи аналізу інтервальних даних та їх застосування до задач структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей. Автором встановлено недоліки існуючих методів та алгоритмів структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів з умовами забезпечення точності моделі в межах точності експериментальних даних і на цій основі сформульовано науково-прикладну проблему та задачі дисертаційного дослідження.

У *другому розділі* розглянуто та вдосконалено метод ідентифікації інтервальних моделей статичних об'єктів на основі локалізації області параметрів еліпсоїдом. Автором запропоновано удосконалений метод еліпсоїдного оцінювання множини значень параметрів інтервальних моделей характеристик статичних систем на основі ітераційної обчислювальної схеми оптимального насиченого планування експерименту та розпаралелення обчислювальних процесів, який, на відміну від існуючого, ґрунтується на оптимізації процедури редукції інтервальних рівнянь, що забезпечило зниження обчислювальної складності, розширення функціоналу системи моделювання та спрощення її використання в прикладних задачах.

У *третьому розділі* запропоновано нові методи параметричної ідентифікації характеристик статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який на відміну від існуючих ґрунтується на процедурах самоорганізації та самоадаптації обчислювальних процедур за аналогією з поведінковими моделями бджолиної колонії. Автором показано ефективність запропонованих методів у порівнянні з існуючими на прикладах моделювання процесу поширення концентрацій окису вуглецю на прямолінійній ділянці вулиці внаслідок рівномірного руху транспортного потоку з постійною потужністю викидів та моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках.

У *четвертому розділі* автором сформульовано задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів як задачі багаторазового пошуку розв'язків інтервальних систем нелінійних алгебричних

рівнянь у вигляді оптимізаційних задач з нелінійною, дискретною функцією мети та дискретними і нелінійними обмеженнями. На цій основі запропоновано спільний підхід до побудови методів структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів. Автором запропоновано нові методи структурної ідентифікації моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів. Досліджено їх ефективність та показано переваги у порівнянні з існуючими методами структурної ідентифікації.

У *п'ятому розділі* створено нову програмну систему для побудови інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів. Реалізовано основні етапи розробки сервіс-орієнтовного програмного забезпечення. Автором спроектовано основні сервіси програмної взаємодії інформаційних систем суміжних проблемних галузей для побудови математичних моделей та їх програмно-технічної інтерпретації. Представлений програмний комплекс для моделювання статичних та динамічних систем з використанням сервіс-орієнтовного комунікаційного програмного середовища забезпечує формування інструментарію аналізу широкого спектру прикладних задач зі збереженням простоти та подальшої модифікації бази моделей.

Шостий розділ роботи автором присвячено застосуванню створених методів та розробленої системи моделювання характеристик статичних та динамічних об'єктів до розв'язування прикладних задач, а саме: для виявлення положення зворотного гортанного нерва на області хірургічного втручання при проведенні операції на щитоподібній залозі; моделювання генерованої електроенергії малою гідроелектростанцією; моделювання процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках; моделювання ефективності функціонування інформаційних веб-ресурсів.

У *висновках* до розділів та дисертації узагальнено основні теоретичні та практичні результати та рекомендації до їх використання.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій. Аналіз змісту дисертації дає підставу зробити висновок, що всі наукові положення наведені автором є *обґрунтованими*, оскільки базуються на теорії систем, на теорії ідентифікації, теорії математичного моделювання та інтервальної математики, на теорії ймовірності та математичної статистики, на оптимізаційних та чисельних методах. Автором коректно використано експериментальне підтвердження сформульованих положень.

Обґрунтованість висновків та рекомендацій дисертаційного дослідження засвідчує коректне використання математичного апарату, методів об'єктно-орієнтованого аналізу, проектування та програмування, функціонального та комплексного тестування систем, а також адекватність побудованих моделей та їх практичне впровадження.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційного дослідження.

Дисертантом одержано такі основні наукові результати:

- *уперше* встановлено, що математичні задачі побудови інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних систем, на відміну від детермінованого випадку, є подібними, оскільки сформульовані у вигляді задач знаходження хоча б одного розв'язку інтервальних систем алгебричних рівнянь, які, своєю чергою, є задачами оптимізації з дискретною та нелінійною цільовою функцією і лінійними обмеженнями, що дало змогу розробити єдиний теоретико-методологічний підхід до ідентифікації інтервальних моделей як статичних, так і динамічних систем;
- *уперше* запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який на відміну від існуючих ґрунтується на процедурах самоорганізації та самоадаптації обчислювальних процедур за аналогією з поведінковими моделями бджолоїної колонії;
- *уперше* запропоновано та обґрунтовано метод структурної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на процедурах самоорганізації структур моделей з модифікованим оператором визначення найімовірніших структур моделей, ґрунтується на принципах функціонування колонії медоносних бджіл та не вимагає процесів редукції незначущих елементів структур моделей, що в сукупності уможливило: створити цілісний підхід до побудови таких моделей з гарантованими прогностичними властивостями; знизити трудомісткість та часову складність процедур побудови цих моделей;
- *уперше* розроблено архітектуру та алгоритмічну організацію програмної системи для інтервального моделювання характеристик статичних та динамічних об'єктів, яка, на відміну від існуючих, об'єднує методи структурної та параметричної ідентифікації, реалізовані на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, що забезпечило уніфікований підхід до побудови моделей з гарантованою точністю в умовах інтервальної невизначеності;
- *удосконалено* метод еліпсоїдного оцінювання множини значень параметрів інтервальних моделей характеристик статичних систем на основі ітераційної обчислювальної схеми оптимального насиченого планування експерименту та розпаралелення обчислювальних процесів, який, на відміну від існуючого, ґрунтується на оптимізації процедури редукції інтервальних рівнянь, що забезпечило зниження обчислювальної складності, розширення функціоналу системи моделювання та спрощення її використання в прикладних задачах;
- *набули подальшого розвитку* інтервальні дискретні моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту, які, на відміну від існуючих,

мають простішу структуру, та придатні для використання в прикладних системах підтримки прийняття рішень у залежності від умов середовища їх застосування;

– *набули подальшого розвитку* інтервальні моделі характеристик сигналів–реакцій на подразнення тканин на хірургічній рані, які, на відміну від існуючих, за рахунок застосування удосконаленого методу параметричної ідентифікації потребують менше часу на їх ідентифікацію, що, відповідно, зменшує витрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції;

– *набули подальшого розвитку* інтервальні моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках, які, на відміну від існуючих, отримали простіше представлення і можливість застосування в системах комп'ютерного моделювання для прийняття рішень та управління зазначеним процесом.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення одержаних результатів дисертаційного дослідження засвідчують:

– побудовані інтервальні дискретні моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту, які придатні для використання в прикладних системах підтримки прийняття рішень у залежності від умов середовища їх застосування;

– побудовані інтервальні моделі характеристик сигналів–реакцій на подразнення тканин на хірургічній рані, які зменшують витрати часу на моніторинг області локалізації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції;

– побудовані інтервальні моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках для застосування в системах комп'ютерного моделювання для прийняття рішень та управління зазначеним процесом.

– створення багатофункціонального програмного комплексу, який реалізує методи побудови інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів, а саме методи їх структурної та параметричної ідентифікації на основі аналізу інтервальних даних, реалізовані на основі поведінкових моделей бджолої колонії та удосконаленого методу еліпсоїдного оцінювання множини значень параметрів інтервальних моделей статичних об'єктів на основі ітераційної обчислювальної схеми оптимального насиченого планування експерименту. Програмний комплекс використано при побудові широкого класу моделей в екології, медицині, промисловості, інженерії програмного забезпечення.

Практичне впровадження одержаних автором нових наукових результатів дисертаційної роботи засвідчено актами впровадження, які додаються до дисертації.

Повнота викладу наукових положень, висновків та рекомендацій в опублікованих працях. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 78 наукових праць, зокрема 21 стаття у наукових фахових

періодичних виданнях, у тому числі 13 статей у наукових фахових виданнях України та 8 статей у закордонних періодичних виданнях (з них 7 статей включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science), та 56 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій (з них 27 публікацій включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science), 1 патент на корисну модель. Загалом 35 публікацій включено до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science. Наведені публікації автора достатньо відображають зміст усіх розділів дисертаційної роботи.

Дискусійні положення та зауваження до дисертаційного дослідження.

1. У першому розділі дисертації розглянуто системи, які орієнтовані на знання та дані. Однак, слабо прослідковується взаємозв'язок між цими класами систем та методами та моделями розробленими в дисертаційній роботі. Зокрема, бажано було б навести більш конкретні відомості про ці класи систем, зокрема, надати їх узагальнені архітектури, де було б видно місце розроблених методів та моделей в їх структурі.
2. В основу методів структурної та параметричної ідентифікації, розроблених в межах дисертаційного дослідження, закладено основні принципи поведінкових моделей бджолиної колонії. Однак, із роботи не зрозуміло яким саме чином вибираються та як співвідносяться між собою кількість бджіл з різних груп колонії (робочих, дослідників та розвідників), що ускладнює розуміння впливу цих показників та їх співвідношення на загальну обчислювальну складність реалізації зазначених методів.
3. У третьому розділі роботи проведено порівняльний аналіз застосування запропонованого методу параметричної ідентифікації інтервальних моделей із відомими методами, які побудовані із використанням методів випадкового пошуку. Однак, незрозуміло, чому під час проведення порівняння не було також враховано інші відомі алгоритми ройового інтелекту (мурашиний, рою часток тощо).
4. Також у продовження третього зауваження, в третьому розділі роботи при порівнянні розробленого та відомих методів параметричної ідентифікації не зазначено кількості проведених експериментів для кожної досліджуваної моделі та спосіб задання початкових умов застосування зазначених методів, що ускладнює процес їх порівняльного аналізу.
5. У роботі подекуди зустрічаються граматичні, синтаксичні помилки та описки.

Наведені зауваження не знижують наукову та практичну цінність дисертаційної роботи, не ставлять під сумнів основні наукові положення та результати дослідження.

Загальний висновок

За всіма основними атрибутами докторського дисертаційного дослідження дисертаційна робота Пукаса Андрія Васильовича «Методи та засоби побудови математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності» є завершеною науковою працею. Робота виконана із використанням сучасних методів досліджень, містить нові наукові теоретичні та практичні результати, що у своїй сукупності вирішують важливу науково-прикладну проблему зниження трудомісткості та обчислювальної складності процесів побудови математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності із забезпеченням гарантованої точності цих моделей. Робота за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Дисертаційна робота Пукаса А.В. відповідає вимогам Департаменту Атестації кадрів МОН України щодо докторських дисертацій, наведених у пунктах 9, 10 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів» №567 від 24.07.13 (зі змінами), а її автор, Пукас Андрій Васильович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

професор кафедри комп'ютерних систем та мереж
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя,
доктор технічних наук, професор



С.А. Лупенко

Підпис професора Лупенка С.А. засвідчую:

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



П.О. Марущак