

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора **Мороза Бориса Івановича**,
професора кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем
Національного технічного університету "Дніпровська політехніка",

на дисертаційну роботу Пукаса Андрія Васильовича "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 обраної теми досліджень та зв'язок її з науковими програмами, планами і темами

Сьогодення відзначається стрімким розвитком інформаційних технологій, які передбачають використання інтелектуалізованих систем, орієнтованих на дані. Математичне моделювання, дає можливість створити ряд математичних моделей для використання як в процесах прийняття рішень, так і в процесах підготовки рішень в системах, які описують різні сфери людського життя. Моделі індуктивного та дедуктивного підходів моделювання є відносно простими і придатними для використання в інтелектуалізованих системах підтримки прийняття рішень та експертних системах. Разом з тим, використання методів ідентифікації ускладнено тим, що не існує єдиної методологічної бази для побудови як статичних, так і динамічних моделей. В свою чергу застосування теоретико-множинного інтервального підходу при моделюванні систем призводить до суттєвих ускладнень методів структурної та параметричної ідентифікації у порівнянні із детермінованим чи стохастичним підходами. Виникає протиріччя, коли з одного боку необхідна побудова інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів з гарантованими прогностичними властивостями, а з іншого боку, це призводить до ускладнення методів структурної та параметричної ідентифікації цих моделей, що у більшості випадків веде до ускладнення самих моделей. Таким чином, обрана тема дисертаційного дослідження є актуальною, оскільки дозволяє вирішити дане протиріччя шляхом розв'язання науково-прикладної проблеми зниження 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.

Важливість даного напрямку досліджень підкреслює і те, що основні етапи роботи виконувались відповідно з пріоритетним напрямом „Інформаційні та комунікаційні технології”, відповідно до закону України „Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки”, та безпосередньо пов'язані з планами наукових досліджень, які виконувалися за держбюджетною тематикою кафедри, у яких автор був відповідальним виконавцем, наприклад НДР „Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод” (2020-2021); НДР „Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах шиї” (2017-2018); НДР „Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів” (2014-2015) та пов'язані з госпдоговірною тематикою, у яких автор був керівником, наприклад НДР „Реінженерія веб-порталу підприємства та імплементація мобільного додатку до нього” (2020), НДР „Онлайн система „Терногаз” (2019); НДР „Модернізація програмної системи підтримки діяльності Центру надання адміністративних послуг Тернопільської міської ради” (2017) та інші.

З огляду на вищевказане, тематика дисертаційного дослідження Пукаса А.В., яка присвячена вирішенню проблеми зниження 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 є актуальною як в науковому, так і в прикладному плані.

Наукова новизна дослідження й отриманих результатів.

– *вперше* запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який надав можливість: створити цілісний підхід до побудови таких моделей з гарантованими прогностичними властивостями, знизити часову складність процедур побудови цих моделей і у цілому спростити процес їх побудови;

– *вперше* запропоновано та обґрунтовано метод структурної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів на

основі аналізу інтервальних даних, який надав можливість створення цілісного підходу до побудови структур моделей таких об'єктів;

– *вперше* 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, що дало можливість створити цілісний підхід для розв'язування цих задач і в сукупності спростити процес побудови цих моделей;

– *вперше* розроблено архітектуру та алгоритмічну організацію програмної системи для інтервального моделювання характеристик статичних та динамічних об'єктів, яка 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 і дало можливість спростити процес побудови цих моделей за рахунок використання розроблених уніфікованих засобів моделювання;

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

інтервальні моделі характеристик сигналів-реакцій на подразнення тканин на хірургічній рані, які потребують менше часу на їх ідентифікацію;

інтервальні моделі процесу анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках, які отримали простіше представлення і можливість застосування в системах комп'ютерного моделювання для прийняття рішень та управління зазначеним процесом.

Практична значущість результатів дисертаційного дослідження полягає у створенні багатofункціонального програмного комплексу, який реалізує методологію побудови інтервальних моделей статичних та динамічних

об'єктів у складі методів структурної та параметричної ідентифікації цих моделей на основі аналізу інтервальних даних, реалізованих на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії та удосконаленого методу еліпсоїдного оцінювання множини значень параметрів інтервальних моделей статичних систем.

Програмний комплекс використано при побудові широкого класу моделей в екології, медицині, промисловості та інженерії програмного забезпечення.

Загальна характеристика дисертаційної роботи.

Представлена дисертаційна робота складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми виконаної роботи, визначено мету та основні задачі дослідження, сформульовано наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, наведені дані про зв'язок проблеми, яка вирішується, з науковими програмами, планами та темами, надані відомості про впровадження результатів та апробацію основних положень дисертації.

У *першому* розділі проведено аналіз існуючих методів та засобів параметричної та структурної ідентифікації інтервальних математичних моделей характеристик статичних та динамічних складних об'єктів. Показано переваги та недоліки відомих методів ідентифікації. Проведено узагальнення існуючих недоліків, на основі яких сформульовано постановки задач дисертаційного дослідження.

В цілому, матеріал, що викладений в цьому розділі, достатньо повний та відбиває сучасний стан проблем, що розглядаються в роботі.

Другий розділ роботи присвячений опису удосконаленого методу для розв'язування задачі еліпсоїдного оцінювання множини значень параметрів інтервальних моделей статичних систем на основі ітераційної обчислювальної схеми оптимального насиченого планування експерименту та розпаралелення обчислювальних процесів. Вказана задача зводиться до математичної задачі оцінювання розв'язків інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь. Структура моделі статичного об'єкта подається у вигляді лінійного, відносно параметрів рівняння. Для побудови моделі необхідно оцінити параметри, а саме знайти розв'язки інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь, які у просторі параметрів є областю у вигляді многогранника. Для оцінювання такої області параметрів моделі використовується допусковий еліпсоїд, що є досить складною, нелінійною задачею. Для її розв'язування запропоновано схему,

описану в роботі, ефективність реалізації якої в значній мірі залежить від порядку вибору інтервальних рівнянь в схемі редукції інтервальної системи рівнянь. Для розв'язування цієї задачі запропоновано використати метод планування послідовних I_G -оптимальних експериментів.

У *третьому* розділі запропоновано новий метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який ґрунтується на процедурах самоорганізації та самоадаптації обчислювальних процедур за аналогією з поведінковими моделями бджолоїної колонії. Вихідна характеристика статичного об'єкта подається у вигляді нелінійного алгебричного виразу, а результати експерименту - в інтервальному вигляді. Через нелінійність системи, яка складається з нелінійних алгебричних виразів, застосування відомих методів у більшості випадків є неможливим. Тому, запропоновано новий метод оцінювання розв'язків інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР), на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. У роботі зазначено, що у цьому випадку метод параметричної ідентифікації набуває властивостей самоорганізації та самоадаптації. У розділі доведено, що сумісність ІСНАР означатиме належність інтервалів значень прогнозованої характеристики у точках експерименту до інтервалів, отриманих експериментально у тих же точках експерименту. Спираючись на результати аналізу у роботі показано, що поведінкові моделі бджолоїної колонії (ПМБК) є одним із найефективніших інструментів організації розв'язування оптимізаційних задач за рахунок елементів самоорганізації та адаптації, особливо у випадку використання складної та дискретної функції мети. На основі ПМБК розроблено новий метод розв'язування задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичного об'єкта, який складається із декількох фаз: фази ініціалізації, фази робочих бджіл, фази бджіл дослідників та фази бджіл розвідників. Дослідження часової складності запропонованого методу проведено на основі його порівняння із відомими, а результати порівняння показали, що незалежно від розмірності математичної моделі у вигляді нелінійного алгебричного рівняння, чи у вигляді різницевого рівняння та кількості інтервальних даних у наборі для реалізації методу параметричної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів доцільно застосовувати метод на основі ПМБК.

У *четвертому* розділі запропоновано та обґрунтовано новий метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який ґрунтується на процедурах самоорганізації структур моделей. Показано еквівалентність задач структурної

ідентифікації інтервальних моделей для випадку статичних та динамічних об'єктів і на цій основі запропоновано і обґрунтовано спільний метод для їх розв'язування. Як було описано у третьому розділі, ПМБК є одним із найефективніших інструментів організації розв'язування складних оптимізаційних задач за рахунок елементів самоорганізації та адаптації, тому цей підхід використано і детально розписано для побудови методу структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів. Дослідження ефективності запропонованих інновацій щодо методу структурної ідентифікації оцінювалось при застосуванні методу розв'язування прикладних задач.

П'ятий розділ дисертаційної роботи представляє результати програмної реалізації інтервального моделювання статичних та динамічних об'єктів, яка, об'єднує методи структурної та параметричної ідентифікації, реалізовані на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Запропонований програмний продукт є об'єктно-орієнтованою системою, розробленою за допомогою технології .NET на мові програмування С#, загальна архітектура якої представлена в роботі. З архітектури розробленого програмного комплексу можна виділити декілька основних модулів: головний модуль, створення моделі, обробка даних, опрацювання моделі, методи для вирішення задачі структурної та параметричної ідентифікації. Окрім основних компонентів до програмної системи підключено два локальних сховища. Перше призначене для зберігання експериментальних даних, а друге – для збережених структур моделей. Для спрощення використання програмного комплексу було запропоновано реалізувати підсистему взаємодії у вигляді окремого Application Programming Interface (API), використання якого дозволяє реалізувати закладені в роботі принципи реалізації сервіс-орієнтованого програмного забезпечення.

У *шостому* розділі на основі розроблених та описаних у третьому та четвертому розділах методів параметричної та структурної ідентифікації побудовано ряд математичних моделей, які, на відміну від існуючих, є простішими та забезпечують гарантовані прогностичні властивості для характеристик об'єктів. У цьому розділі також наведено прикладні аспекти застосування розроблених моделей. Варто зазначити, що усі представлені математичні моделі відрізняються або простішою структурою порівняно із відомими моделями, або характеризуються зниженням обчислювальної процедури їх побудови (зменшенням часової складності) за рахунок використання розроблених у дисертації методів.

У висновках викладені найбільш важливі наукові і практичні результати, одержані в дисертаційному дослідженні.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації, їх достовірність і новизна

Обґрунтованість представлених у дисертаційній роботі Пукаса А.В. наукових положень, висновків і рекомендацій полягає перш за все у комплексному підході до вирішення поставлених наукових задач, який включає використання експериментальних даних при побудові методів і моделей. Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи ґрунтуються на всебічному аналізі отриманих результатів, які у сукупності вирішують науково-прикладну проблему зниження обчислювальної складності процесів побудови математичних моделей складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності з одночасним забезпеченням гарантованої точності цих моделей у межах необхідних для розв'язування задач прийняття рішень. Враховуючи вищевказане, обґрунтованість викладених в роботі положень не викликає сумніву.

До найвагоміших науково-практичних результатів, отриманих в роботі, слід віднести:

- розроблено метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних, який ґрунтується на процедурах самоорганізації та самоадаптації обчислювальних процедур за аналогією з поведінковими моделями бджолоїної колонії;

- розроблено метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних з процедурами самоорганізації та самоадаптації структур моделей; 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;

- 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

бджолої колонії, що забезпечило цілісний підхід до побудови моделей з гарантованою точністю в умовах інтервальної невизначеності та суттєво спростило використання засобів моделювання для користувача.

Повнота викладу результатів дисертації 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, 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. Зміст автореферату достатньо повно відображає зміст і результати дисертаційної роботи.

- 1) **Зауваження до дисертації** Із тексту роботи незрозумілою є методика визначення значення константи LIMIT як для методу параметричної так і для методу структурної ідентифікації. Чи і як значення цієї константи впливає на обчислювальну складність реалізації методу структурної та параметричної ідентифікації, адже величина цієї константи визначає вичерпаність джерела нектару в поведінкових моделях бджолої колонії, і методика її налаштування суттєво впливає на ефективність застосування цих методів.
- 2) У роботі не достатньо описано методіку формування набору структурних елементів в методі структурної ідентифікації інтервальних моделей.
- 3) У четвертому розділі дисертації описано новий метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів. У цьому методі запропоновано використати імовірнісний підхід до визначення кількості перспективних джерел нектару, на основі якого прямопропорційно обчислюють ймовірність вибору поточного джерела нектару бджолою-дослідницею в залежності від його якості. Однак, залишається недослідженим питання чи дійсно ця залежність є прямопропорційною.
- 4) Ефективність розроблених в дисертаційній роботі методів підтверджено на багаточисельних прикладах побудови математичних моделей статичних та динамічних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності. За показник ефективності обрано кількість обчислень функції мети оптимізаційної задачі ідентифікації. Проте функція мети для різних

моделей відзначатиметься різною обчислювальною складністю що не дає можливості порівняти ефективність запропонованих методів з відомими при зміні розмірності оптимізаційних задач.

Загальний висновок

Представлені в дисертаційній роботі нові, науково підтверджені результати дозволяють зробити висновок, що вони, в сукупності, складають вагомий внесок в розвиток науки математичного моделювання в умовах інтервальної невизначеності та ефективно дозволяють вирішувати науково-прикладну проблему зниження обчислювальної складності процесів моделювання статичних та динамічних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності.

Дисертаційна робота А.В. Пукаса відповідає вимогам, що висуваються до докторських дисертацій "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року №567.

У зв'язку з вищенаведеним вважаю, що дисертація за актуальністю, новизною теоретичних та експериментальних результатів відповідає вимогам до докторських дисертацій, а її автор Пукас Андрій Васильович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор
професор кафедри програмного
забезпечення комп'ютерних систем
Національного технічного університету
"Дніпровська політехніка"

Б.І. Мороз



Підпис: *Б.І. Мороз*
Засвідчую:
вчений секретар
Вченої ради: *Каштанова Т.М.*