

**ВІДГУК
офіційного опонента**

доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри системотехніки
Харківського національного університету радіоелектроніки
Ігоря Валерійовича Гребеніка

на дисертаційну роботу Пукаса Андрія Васильовича на тему: " Методи та засоби побудови математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності ", представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – "Математичне моделювання та обчислювальні методи "

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Математичне моделювання є фундаментальною основою для прийняття адекватних рішень у багатьох сферах функціонування суспільства і держави. Важливим напрямком наукових і прикладних досліджень у галузі моделювання є вивчення проблеми підвищення його ефективності з точки зору як збільшення точності прогнозування при одночасному зменшенні затрат зусиль і ресурсів, так і розширення можливостей перенесення його інструментарію на нові об'єкти і системи.

У процесі таких досліджень важливо враховувати істотні індивідуальні особливості як конкретного об'єкта, так і загалом класу подібних об'єктів, що допомагає уникати переускладнення моделей через внесення неістотних елементів, наслідком якого, як правило, є втрата точності моделювання інших об'єктів. Саме такий підхід, спрямований на одночасне зменшення складності математичних моделей, підвищення їх точності та забезпечення їх універсальності, лежить в основі дисертаційних досліджень Пукаса А.В.

Будь-яка модель стає придатною для прогнозування тільки після розв'язання задачі параметричної ідентифікації на основі даних спостережень за функціонуванням конкретного об'єкта. При належному формуванні методу для певного класу об'єктів можна досягти зменшення обчислювальних затрат і тим самим підвищити ефективність самого процесу моделювання. Розробка методів ідентифікації з широкою сферою застосування, крім того, знижує затрати на їх програмну реалізацію та спрощує процес ідентифікації моделей для нових об'єктів подібного класу.

Забезпечення достатньої для практики точності прогнозів повинно узгоджуватися із характером інформації, яка залучається для налаштування параметрів моделей, а самі моделі та методи їх ідентифікації повинні бути максимально простими та універсальними, що дає можливість розроблювати

узагальнені багатофункціональні універсальні програмно-алгоритмічні засоби та спрощує їх практичне застосування.

Таким чином, в роботі А.В. Пукаса досліджується актуальна науково-прикладна проблема 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.

Про актуальність цієї проблематики додатково свідчить відповідність виконаних досліджень науковим напрямкам. Дисертаційна робота виконувалася згідно з пріоритетним напрямом „Інформаційні та комунікаційні технології”, відповідно до закону України „Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки”, та безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень, які виконувалися за держбюджетною тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету, у яких автор був відповідальним виконавцем: НДР „Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод” (2020-2021, № держреєстрації 0120U102040); НДР „Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах шиї” (2017-2018, № держреєстрації 0117U000410); НДР „Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів” (2014-2015, № держреєстрації 0114U000569); НДР „Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотнього гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі” (2012-2013, № держреєстрації 0112U000078); НДР „Математичні методи, інтервальні моделі та інформаційні технології для контролю забруднення атмосфери автотранспортом” (2010-2011, № держреєстрації 0110U001125); НДР „Методи, апаратні та програмні засоби для дослідження та моделювання нестационарних розподілених об'єктів на основі інтервальних даних” (2006-2008, № держреєстрації 0106U000529). Також робота пов'язана з госпдоговірною тематикою, автор був керівником семи науково-дослідних госпдоговірних робіт за вказаним напрямом наукових досліджень.

Обґрунтованість і достовірність наукових висновків і рекомендацій та їх достовірність.

Наукові положення, винесені на захист, обґрунтовані та доведені на належному науковому рівні. Мета, постановка задач дослідження, а також наведені в кінці роботи основні її результати є логічними, віддзеркалюють отримані автором наукові результати, не суперечать відомим математичним фізичним закономірностям.

Достовірність отриманих теоретичних та практичних результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій ґрунтується на кваліфікованому підході до постановки задач дослідження, логічно правильному обґрунтуванню прийнятих допущень при виборі математичних моделей і коректному використанні математичного апарату. Крім того, достовірність підтверджується доброю збіжністю між результатами теоретичного аналізу та результатами комп'ютерного моделювання і практичною реалізацією алгоритмів опрацювання даних за допомогою розроблених автором прикладних програмних засобів.

Наукова новизна дисертаційної роботи. До найбільш суттєвих наукових результатів дисертаційної роботи слід віднести наступні положення:

1. Вперше 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, що дало 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.

2. Вперше 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 дало можливість: створити цілісний підхід до побудови структур моделей таких об'єктів; забезпечити, з одного боку – спрощення, за рахунок зниження часової складності реалізації методу, а з іншого – гарантовані прогностичні властивості цих моделей; спростити процес їх побудови.

3. Вперше встановлено, що математичні задачі побудови інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних систем, на відміну від

детермінованого випадку, є подібними стосовно їх математичного моделювання та методів розв'язання, оскільки сформульовані у вигляді задач знаходження хоча б одного розв'язку інтервальних систем алгебричних рівнянь, які, своєю чергою, є задачами дискретної оптимізації з нелінійною цільовою функцією і лінійними обмеженнями, що дало можливість створити цілісний підхід для розв'язування цих задач і в сукупності спростити процес побудови цих моделей.

4. Вперше 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 бджолиної 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.

Значущість отриманих результатів для науки і практики математичного моделювання полягає у розвитку теорії та узагальненні методів ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів з гарантованими прогностичними властивостями, які адекватно описують практично важливі процеси різної природи. Прикладне використання теоретичних результатів забезпечується розробленим програмним інструментарієм сервісно-орієнтованого типу, використання якого економить час і затрати користувача на створення відповідних засобів моделювання.

Практична цінність роботи. На основі результатів роботи розроблено програмне забезпечення, яке підтримує процеси моделювання складних об'єктів з достатньою для практики точністю. Розроблений програмний комплекс використано при побудові широкого класу моделей в екології, медицині, промисловості та інженерії програмного забезпечення. Результати дисертаційної роботи впроваджені: у Тернопільському міському відділі державної установи «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України» для підтримки прийняття рішень щодо забруднення атмосферного повітря у м. Тернопіль; у Тернопільській міській комунальній лікарні швидкої допомоги при проведенні операцій на щитоподібній залозі; у відділі «Центр надання адміністративних послуг» Тернопільської міської ради для прогнозування кількості запитів веб-ресурсу та оптимізації процесу надання адміністративних послуг; у ТзОВ «Топольки» (м. Бучач) для оцінювання

потенційних можливостей використання наявних гідроресурсів та для збільшення кількості генерованої електроенергії малою гідроелектро-станцією.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на 31 міжнародній науково-технічній конференції.

Повнота викладення здобувачем основних результатів дисертаційної роботи в публікаціях. 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 до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science) та 56 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій (з них 27 публікацій включено до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science), 1 патент на корисну модель. Загалом 34 публікації включено до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science.

В опублікованих працях викладено всі винесені на захист положення дисертаційної роботи. Рівень і загальна кількість публікацій та рівень апробації результатів відповідають вимогам, що ставляться до докторських дисертацій.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота включає умовні скорочення, вступ, шість розділів, висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг роботи складає 292 сторінки, із них 205 сторінок основного тексту, 48 рисунків, 21 таблиця, список використаних джерел із 269 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та задачі дисертаційних досліджень, визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про їхню апробацію та особистий внесок автора.

У **першому** розділі проведено аналіз існуючих методів та засобів параметричної та структурної ідентифікації математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності, зокрема для розв'язування таких задач: виявлення положення воротного гортанного нерва на області хірургічного втручання при проведенні операції на щитоподібній залозі; генерування електроенергії малою гідроелектростанцією; анаеробного мікробіологічного бродіння в біогазових установках; ефективності функціонування інформаційних веб-

ресурсів та моніторингу динаміки концентрацій забруднюючих речовин автотранспорту.

У **другому** розділі роботи удосконалено метод 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.

Третій розділ присвячений питанням розробки метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей 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.

Проведено дослідження відносно оцінки розмірності математичної моделі у вигляді нелінійного алгебраїчного 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. Підтверджено доцільність застосовування методу на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії.

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.

Запропонований у четвертому розділі новий метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних з обчислювальними процедурами самоорганізації та самоадаптації за аналогією з поведінковими моделями бджолоїної колонії, дає можливість: створити єдиний підхід до побудови таких моделей з гарантованими прогностичними властивостями; знизити обчислювальну складність процедур побудови цих моделей, а також отримувати моделі простіші, у порівнянні з використанням відомого методу.

У **п'ятому** розділі дисертаційної роботи представлено програмну

систему для інтервального моделювання статичних та динамічних об'єктів, яка, на відміну від існуючих, об'єднує методи структурної та параметричної ідентифікації, реалізовані на основі поведінкових моделей бджолиної колонії, що забезпечило уніфікований підхід до побудови моделей з гарантованою точністю в умовах інтервальної невизначеності.

У шостому розділі на підставі результатів, отриманих у попередніх розділах, зокрема на основі розроблених 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.

У висновках сформульовано основні наукові результати дисертаційного дослідження.

У додатках наведено відомості щодо впровадження результатів роботи, дані що додатково ілюструють результати проведених досліджень, зокрема, опис основних інформаційних структур збереження результатів моделювання, а також список публікацій здобувача за темою дисертації.

Автореферат загалом відображає суть основних наукових положень і результатів, практичну значущість та висновки.

Дисертація і автореферат оформлені згідно з чинними вимогами до докторських дисертацій.

Результати кандидатської дисертації автора не використовуються як наукові результати докторської роботи і не виносяться на захист.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Для покращення сприйняття отриманих в дисертаційній роботі результатів щодо математичних моделей складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності в оглядовій частині дисертації слід було б навести огляд та порівняльний аналіз найбільш відомих робіт та класичних результатів інтервального аналізу (інтервальні арифметики, інтервальні відображення, інтервальні рівняння тощо).

2. В дисертаційній роботі для розв'язування задач параметричної та структурної ідентифікації як для статичних, так і динамічних систем сформульовано дискретні оптимізаційні задачі з нелінійною цільовою функцією та лінійними обмеженнями. Важливою складовою методів розв'язання задач цього класу з реальними даними вимірювань має бути процедура нормування цільової функції, яка суттєво впливає на збіжність методів оптимізації. Автором

не проаналізовано можливість нормування цільової функції в запропонованих в роботі методах аналізу побудованих моделей з реальними даними.

3. Запропоновані в дисертаційній роботі методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних та динамічних об'єктів ґрунтуються на евристичних методах та поведінкових моделях бджолиної колонії. Слід було б окремо дослідити вибір та налаштування низки основних параметрів, від яких залежить часова складність обчислювальних процедур.

4. В дисертаційній роботі розроблено методи структурної і параметричної ідентифікації інтервальних моделей характеристик статичних та динамічних об'єктів і алгоритми їх реалізації. Для демонстрації переваг отриманих результатів доцільно було б здійснити оцінки точності та складності зазначених методів та алгоритмів.

5. Для демонстрації досягнення зниження обчислювальної складності процесів моделювання характеристик статичних та динамічних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності доцільно було б провести числові порівняння отриманих в дисертаційній роботі результатів з відомими.

6. Розроблені у дисертаційній роботі математичні моделі стосуються різних галузей (енергетика, медицина, екологія). Доцільно було б показати, чи впливає специфіка кожної предметної області на результат побудови моделі, чи, навпаки, універсальність підходу дозволяє в однаковий спосіб підходити до побудови математичних моделей незалежно від особливостей предметної області.

Наведені зауваження не мають принципового значення та не зменшують наукової цінності дисертаційної роботи в цілому.

Загальні висновки.

Дисертаційна робота Пукаса А.В. є завершеним науковим дослідженням, що містить отримані особисто здобувачем нові наукові результати, направлені на розв'язання важливої 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.

Сформульовані у дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації достатньо повно опубліковано.

Дисертаційна робота Пукаса Андрія Васильовича відповідає паспорту спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

На підставі проведеного аналізу дисертаційної роботи «Методи та засоби побудови математичних моделей характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності» можна зробити висновок про те, що за актуальністю вирішеної науково-прикладної проблеми, отриманими науковими результатами і практичною цінністю роботи, дисертація відповідає пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. за №567 з відповідними змінами, а її автор, Пукас Андрій Васильович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри системотехніки
Харківського національного
університету радіоелектроніки

І.В. Гребеннік

28.04.2021р

Підпис І. В. Гребенніка засвідчую.
Перший проректор Харківського національного
університету радіоелектроніки



І.В. Рубан