

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора, завідувача кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки,

Гребенніка Ігоря Валерійовича

про дисертаційну роботу Манжули Володимира Івановича

«Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи,

05 «Технічні науки»

1. Актуальність теми дослідження та зв'язок з науковими програмами, планами та темами

Одним із напрямків теорії математичного моделювання є ідентифікація математичних моделей складних об'єктів із застосуванням індуктивного підходу. Складність задач ідентифікації полягає в можливості отримання широкого спектру математичних моделей, які адекватно описують той самий об'єкт. Тому в теорії ідентифікації доводиться розв'язувати як задачу структурної, так і параметричної ідентифікації моделей об'єкта. Обидві задачі є складними оптимізаційними задачами, причому задачі структурної ідентифікації переважно є NP-складними. Врахування неточності в даних, які є основою для розв'язування цих задач, суттєво ускладнює процедури ідентифікації, особливо, якщо результати експерименту подано в інтервальному вигляді, а самі математичні моделі можуть бути адекватними тільки у випадку їх представлення у вигляді нелінійних алгебричних рівнянь. У цих випадках обидві задачі структурної і параметричної ідентифікації є NP –складними.

Автор дисертаційної роботи вирішує зазначену проблему складності обчислень в оригінально спосіб, а саме у спосіб розробки та реалізації комплексного підходу на основі поєднання онтологічного опису предметної

області, що стосується процедур ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів глобальної і локальної оптимізації. Тому, тема та завдання дисертаційної роботи Манжули В.І. «Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками», є актуальними, оскільки вони пов'язані з розробленням комплексного підходу і на його підставі методів та програмних засобів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, що у сукупності створило можливість розробки нових, більш ефективних, з точки зору зниження обчислювальної складності, методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Досягнення мети дисертаційного дослідження створює умови для розвитку теорії ідентифікації та математичного моделювання в цілому, а також прикладних досліджень у різних прикладних сферах.

Актуальність теми дослідження підтверджується тим, що напрям досліджень дисертаційної роботи відповідає пріоритетному напрямку, відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Інформаційні та комунікаційні технології». Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень, які виконувалися за держбюджетною тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету: «Математичне та комп'ютерне моделювання об'єктів з розподіленими параметрами на основі поєднання онтологічного та інтервального аналізу» (2023-2024 рр., держреєстраційний номер 01220001497), «Національна концепція екобезпеки суспільства та інклюзія циркулярної економіки в умовах пандемії» (2021-2022 рр., держреєстраційний номер 01210109485), «Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод» (2020-2021 рр., держреєстраційний номер 0120U102040), «Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на

органах шиї» (2017-2018 рр., держреєстраційний номер 0117U000410), «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (2014-2015 рр., держреєстраційний номер 0114U000569), «Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації поворотного гортанного нерву в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі» (2012-2013 рр., держреєстраційний номер 0112U000078), а також ряду науково-дослідних робіт за госпдоговірною тематикою.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи Манжули В.І. повністю обґрунтовані, що підтверджуються коректним використанням методів теорії ідентифікації, а також зіставленням отриманих результатів із результатами наведеними в наукових публікаціях, рекомендаціях вітчизняних та закордонних вчених за напрямком дослідження.

Сформульовані в роботі наукові положення, висновки і рекомендації розроблено на теоретико-методологічній базі, в основу якої покладено методи теорії систем, теорії ідентифікації, математичного моделювання, інтервального аналізу, теорії ймовірностей, математичної статистики та оптимізації, реляційної алгебри. Для побудови онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних використано системний аналіз, методи реляційної алгебри. Комп'ютерне середовище розроблено на підставі методів об'єктно-орієнтованого аналізу, проектування та програмування, а також методів функціонального та комплексного тестування систем. методів глобальної і локальної оптимізації.

Наукові положення, висновки сформульовані до усіх розділів дисертації; загальні висновки по роботі мають наукове обґрунтування. Представлені результати і рекомендації базуються на теоретичному підґрунті та впливають з логічної послідовності проведених досліджень, експериментальних підтверджень пропонованих методів і підходів.

3. Наукова новизна результатів дослідження

В дисертаційній роботі Манжули В.І. розв'язано науково-прикладну проблему зниження обчислювальної складності методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на підставі розроблення та реалізації комплексного підходу ідентифікації цих моделей на основі поєднання онтологічного опису задач та процедур ідентифікації, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів глобальної і локальної оптимізації. При цьому отримано такі наукові результати:

1) Вперше запропоновано та обґрунтовано комплексний підхід до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на поєднанні онтологічного опису предметної області ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів глобальної і локальної оптимізації, що у сукупності забезпечило зниження часової складності розв'язування задач ідентифікації цих моделей;

2) Розроблено метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі з нелінійною цільовою функцією, яка мінімізує квадратичне відхилення між обчисленими значеннями модельованої характеристики статичної системи та значеннями, вибраними на числових інтервалах результатів експерименту, що уможливило гарантовану квадратичну збіжність на основі застосування квазі-Ньютонівських методів оптимізації;

3) Вперше розроблено метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на аналізі градієнта цільової функції та часткової похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого структурного елемента, що

уможливило напрямлений вибір структурних елементів і зниження кількості ітерацій обчислюваних процедур;

4) Розроблено уніфікований метод ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на знання-орієнтованому підході вибору методів параметричної та структурної ідентифікації в залежності від характеристик задачі, що забезпечило зниження часової складності реалізації методу ідентифікації;

5) Запропоновано та обґрунтовано архітектуру програмного забезпечення та комп'ютерне середовище для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних, яке, на відміну від існуючих, імплементує підсистему інтервального моделювання в сервісно-орієнтоване середовище із використанням платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, інтелектуалізованої консультативно-діагностичної підсистеми та програмно-інтерпретованих засобів на всіх етапах математичного моделювання, що у сукупності забезпечило спрощення процесу моделювання та наближеність користувача до розроблених сервісів;

6) Вперше розроблено інтервальні моделі залежності рН середовища у ферментаторі біогазової установки від складу завантаженої у біореактор сировини та технологічних параметрів процесу виробництва біогазу на основі багатокомпонентного субстрату, що уможливило визначення допустимих варіацій значень рН середовища в залежності від співвідношення сухої та рідкої фракції сировини для забезпечення стабільності процесу бродіння у ферментаторі;

7) Удосконалено систему критеріїв обчислювальної процедури оптимізації в задачах параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, яка, на відміну від існуючих, використовує додатковий критерій зупинки на поточній ітерації оптимізаційної процедури на

основі перевірки адекватності інтервальної моделі, що забезпечило зниження обчислювальної складності зазначеної процедури;

8) Набули подальшого розвитку інтервальні моделі для прогнозування генерованої електроенергії малою гідроелектростанцією (МГЕС) в залежності від характеристик її гідротехнічних споруд, які, на відміну від існуючих, отримані у вигляді нелінійного алгебраїчного рівняння, що уможливило забезпечення ефективного функціонування МГЕС на основі використання наявних гідроресурсів.

4. Зміст дисертації та відповідність встановленим вимогам

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Зміст дисертації відповідає поставленим меті та завданням дослідження, характеризується повнотою викладення, структурною логічністю та завершеністю.

У *вступі* автором здійснено обґрунтування актуальності вибору теми дослідження, зазначено зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Сформульовано мету та завдання дослідження. Дається опис наукової новизни одержаних результатів дослідження та їхнього практичного значення. Наведено особистий внесок здобувача у працях, які опубліковано у співавторстві, а також інформацію про апробації результатів досліджень. Також дається опис структури та обсягу дисертації.

У *першому розділі* сформульовано задачі параметричної та структурної ідентифікації інтервальних моделей, розв'язування яких ґрунтується на пошуку розв'язків інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Також проведено аналіз методів розв'язування цих задач. Встановлено, що у випадку знаходження розв'язку цієї системи отримують оптимізаційну задачу з нелінійною, дискретною цільовою функцією, що призводить до NP – обчислювальної складності методів їх розв'язування. У наступній частині цього розділу обґрунтовано використання онтологічних описів для формалізації процесів ідентифікації інтервальних моделей із урахуванням накопичених знань

щодо застосування методів оптимізації. На основі проведеного аналізу сформульовано наукову проблему та поставлено задачі дисертаційного дослідження.

Другий розділ дисертаційної роботи є одним із основних, де викладено теоретичні основи розроблених методів. У ньому запропоновано та обґрунтовано метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі з нелінійною цільовою функцією, яка мінімізує квадратичне відхилення між обчисленими значеннями модельованої характеристики статичної системи та значеннями, вибраними на числових інтервалах результатів експерименту, що уможливило гарантовану квадратичну збіжність на основі застосування квазі-Ньютонівських методів оптимізації. Наведено алгоритм реалізації методу. Проведено обчислювальні експерименти для дослідження обчислювальної складності реалізації методу. Також у цьому розділі вдосконалено систему критеріїв зупинки процедури оптимізації за рахунок використання додаткового критерію на основі перевірки адекватності моделі. На тестових прикладах підтверджено підвищення ефективності методу із використанням вдосконаленої системи критеріїв. Варто зазначити, що основні наукові результати цього розділу отримано на основі перетворення задачі знаходження одного розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь до оптимізаційної задачі з нелінійною цільовою функцією, яка мінімізує квадратичне відхилення між обчисленими значеннями модельованої характеристики статичної системи та значеннями, вибраними на числових інтервалах результатів експерименту. Також варто зазначити, що недоліком запропонованого підходу є розширення простору змінних оптимізаційної задачі.

Третій розділ дисертаційної роботи разом із другим є ключовими щодо вирішення наукової проблеми. У цьому розділі запропоновано та обґрунтовано новий метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на

аналізі градієнта цільової функції та часткової похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого структурного елемента, що уможливило напрямлений вибір структурних елементів і зниження кількості ітерацій обчислюваних процедур. На тестових прикладах підтверджено збіжність запропонованого методу. Розроблено алгоритм структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який апробовано на прикладі побудови інтервальної моделі генерованої електроенергії малою гідроелектростанцією в залежності від характеристик її гідротехнічних споруд. Варто зазначити, що недоліком запропонованого методу є потреба у формуванні множини потенційних структурних елементів. Якщо множина не буде повною, то метод не дає можливості знайти адекватної моделі. Проте, також варто відзначити, що це є загальною проблемою у теорії ідентифікації.

У *четвертому розділі*, на підставі онтологічного підходу агреговано результати досліджень другого та третього розділів і на цій підставі запропоновано та обґрунтовано комплексний підхід до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на поєднанні онтологічного опису предметної області ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів глобальної і локальної оптимізації, що у сукупності забезпечило зниження часової складності розв'язування задач ідентифікації цих моделей. В частині онтологічного опису знань вирішено завдання структурування знань про характеристики задач ідентифікації моделей статичних систем; методи оптимізації; критерії вибору методу залежно від характеристик задачі. В межах підходу реалізовано ряд методів ідентифікації, які ґрунтуються на знання-орієнтованому підході до вибору методів оптимізації, зокрема глобального пошуку на основі градієнтних методів та методів ройового інтелекту (рою частинок, поведінкових моделей бджолоїної колоній). В завершальній частині розділу наведено дослідження ефективності впровадження запропонованих нових наукових результатів.

П'ятий розділ присвячено питанням створення програмного середовища для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. Запропоновано та обґрунтовано архітектуру цього середовища та визначено функції основних компонент. Решта частин розділу стосується проектування та реалізації програмних модулів. На базі запропонованої архітектури реалізовано програмну систему для математичного моделювання в якій імплементовано підсистему інтервального моделювання в сервісно-орієнтоване середовище із використанням платформи Google Cloud Run, модель розподілених обчислень MapReduce, інтелектуалізовану консультативно-діагностичну підсистему та програмно-інтерпретовані засоби на всіх етапах математичного моделювання, що у сукупності забезпечило спрощення процесу моделювання та наближеність користувача до розроблених сервісів.

Шостий розділ роботи присвячено застосуванню розроблених методів для задач моделювання низки складних об'єктів. Зокрема: розроблено комплекс інтервальних моделей, які описують залежність рН середовища від складу завантаженої у біореактор сировини та технологічних параметрів процесу виробництва біогазу з багатокомпонентного субстрату; протестовано методи ідентифікації в процесі отримання моделей поширення промислового забруднення від точкового джерела та розподілу концентрацій фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта, та на ряді інших задач ідентифікації інтервальних моделей.

Висновки, сформульовані у роботі, повною мірою представляють отримані у дисертаційному дослідженні результати, мають належний науковий рівень та відповідають вимогам, які висувуються до результатів докторської дисертації.

Дисертаційна робота має завершену структурну форму представлення, повною мірою розкриває мету та завдання дослідження.

Результати кандидатської дисертації в докторській дисертації не використовувались.

5. Практичне значення результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи мають практичне значення, оскільки на їх основі реалізовано програмний комплекс для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. Програмні засоби практично використано при розв'язуванні низки задач моделювання в сферах екології, медицини та енергетики.

Результати дисертаційної роботи впроваджено: у ТОВ «Теофіпольська енергетична компанія» при виробництві біогазу для забезпечення стабільності бродіння в біореакторах першого етапу; у Тернопільській міській комунальній лікарні №2 при інтраопераційній ідентифікації нервів гортані при проведенні операцій тиреоїдектомії; у комунальному підприємстві теплових мереж «Тернопільміськтеплокомуненерго» Тернопільської міської ради для підтримки рішень щодо декарбонізації об'єктів виробництва теплової енергії (котелень), які працюють на газоподібному паливі; у ТзОВ «Топольки» для оцінювання потенційних можливостей використання наявних гідроресурсів малою гідроелектростанцією. На підставі проведених у дисертаційній роботі досліджень розроблено комплексне методичне забезпечення, яке використовують у навчальному процесі кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету при викладанні дисциплін для студентів спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення». Усі отримані результати та їх впровадження підтверджено актами використання результатів дисертаційного дослідження на наведено в додатках.

6. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 61 науковій праці, з них 20 – у фахових періодичних виданнях, 6 з яких входять до міжнародних наукометричних баз Scopus чи Web of Science, одна монографія у співавторстві та 40 публікацій у матеріалах конференцій, 23 з яких проіндексовано міжнародними наукометричними базами Scopus чи Web of

Science. Варто зазначити, що 4 статті з переліку опубліковано у журналах, що входять до Q1 та Q2 SCImago Journal & Country Rank, що засвідчує високий рівень виконання дисертаційної роботи. Результати роботи доповідались в основному на високо-рейтингових міжнародних наукових конференціях закордоном, а також на наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету.

Результати аналізу публікацій здобувача за темою дисертаційної роботи вказують на повноту викладу основних наукових положень та дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності у процесі підготовки докторської дисертації. Загальна кількість публікації та їх зміст достатньою мірою висвітлюють результати дисертаційної роботи.

7. Зауваження та дискусійні питання

Не заперечуючи важливість наукових положень та висновків, необхідно зазначити ряд дискусійних питань:

1. В першому розділі дисертаційної роботи доцільно було б навести критичний аналіз методів локальної оптимізації та більш детально описати обґрунтування вибору ефективних методів та алгоритмів. Слід зазначити, що вони є важливою складовою розробленого комплексного підходу до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками.
2. В другому розділі в п. 2.1. сформульовано задачу знаходження одного розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь на основі оптимізаційної задачі з нелінійною цільовою функцією. Недоліком запропонованого підходу є розширення простору змінних оптимізаційної задачі. Доцільно було б навести дослідження впливу надлишковості простору змінних на обчислювальну складність реалізації методу параметричної ідентифікації на основі зазначеної оптимізаційної задачі.
3. У роботі недостатньо уваги приділено дослідженню та обґрунтуванню способу підбору базисних функцій для множини потенційних структурних елементів математичної моделі у залежності від специфіки розв'язуваної задачі. Крім того, до недоліків запропонованого в п. 3.3. методу структурної ідентифікації можна

віднести потребу у формуванні множини потенційних структурних елементів, яка апіорі може бути неповною.

4. В описі методу моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі онтологічного підходу в п. 4.3 зазначено, що на одному з кроків ідентифікації здійснюється «вибір методу ідентифікації параметрів моделі на основі характеристик оптимізаційної задачі». Проте, не зрозуміло, якою є процедура вибору з цієї множини, зокрема, чи існує критерії, за яким апіорі частиною методів з множини можна знехтувати; чи є необхідність досліджувати результати ідентифікації для всіх методів, які залишилися для розгляду.

5. В шостому розділі п. 6.3. присвячено розробці інтервальних моделей підтримки прийняття рішень декарбонізації промислових об'єктів та транспортної інфраструктури. Проте не наведено рекомендацій щодо практичного спрямування отриманих результатів, а саме, щодо обґрунтування прийняття рішень на основі запропонованих моделей.

Вказані дискусійні положення істотно не впливають на позитивну оцінку дисертації, не знижують її наукову та практичну цінність.

Висновок про відповідність роботи встановленим вимогам МОН України

Дисертаційна робота Манжули Володимира Івановича за темою: «Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками» є завершеним науковим дослідженням, яке виконано самостійно, вирішує актуальну науково-прикладну проблему, має вагомое теоретичне та практичне значення. Отримані теоретичні результати мають належне наукове обґрунтування, є новими та раніше не захищалися. Дисертаційна робота за своїм змістом, темою, об'єктом та предметом дослідження, висновками, рекомендаціями відповідає спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Зважаючи на актуальність дисертаційного дослідження, новизну теоретичних положень, практичну цінність результатів, рівень висвітлення результатів дослідження в публікаціях наукових видань можна зробити висновок, що дисертація відповідає вимогам щодо дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора наук, зокрема, пп. 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук» затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 1197 від 17 липня 2021 р., а її автор, Манжула Володимир Іванович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки).

Офіційний опонент:

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



Ігор ГРЕБЕННИК

Підпис І.В. Гребенніка засвідчую.

в.о. ректора Харківського національного
університету радіоелектроніки, д.т.н., професор



Ігор РУБАН