

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАНЖУЛА ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ



УДК 519.876.5: 004.942

**МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ
МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи
05 «Технічні науки»

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант:

Дивак Микола Петрович

доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України,
проректор з наукової роботи

Тернопіль – 2024

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Зі зростанням складності технічних і природних систем актуальність моделювання екзогенних впливів на складні об'єкти постійно зростає. За цих умов моделювання екзогенних впливів на складні об'єкти, які можуть розглядатися як статичні системи з нелінійними характеристиками, є важливою проблемою в різних галузях науки і техніки, зокрема, у промисловості, енергетиці, екології та економіці. Сучасні методи моделювання все більше орієнтуються на точність та адекватність відтворення поведінки систем за різних умов, що потребує урахування широкого спектру зовнішніх факторів та їх впливу на характеристики системи. Використання методів ідентифікації нелінійних математичних моделей дозволяє більш точно відображати складні залежності та взаємозв'язки між змінними, що є ключовим для розуміння поведінки системи під впливом екзогенних факторів.

Одним із ключових інструментів у моделюванні складних систем є моделі «чорної скриньки», які застосовуються у випадку, коли пряме аналітичне вираження зв'язків між вхідними та вихідними змінними є неможливим або надто складним. Ці моделі використовуються для прогнозування поведінки системи на основі вхідних даних, не потребуючи детального знання внутрішніх механізмів або структурних характеристик самої системи.

Моделі «чорної скриньки» базуються на емпіричних даних і статистичних та чисельних методах для встановлення зв'язку між вхідними (екзогенними) і вихідними змінними системи. Основною перевагою такого підходу є можливість застосування до систем, де відсутня детальна інформація про внутрішні фізичні процеси, але є достатньо даних для аналізу і навчання моделі. У контексті статичних систем з нелінійними характеристиками моделі «чорної скриньки» дозволяють моделювати складні нелінійні залежності, які важко описати традиційними математичними методами. Вони особливо корисні для розв'язання задач прогнозування, оптимізації, контролю та діагностики, де точне моделювання всіх фізичних процесів є непрактичним або неможливим. Основні переваги моделей «чорної скриньки» включають швидкість їх розробки та здатність працювати з великими обсягами даних. Наприклад, у промислових системах, де є необхідність швидкої реакції на зміни вхідних сигналів, використання моделей «чорної скриньки» може значно підвищити ефективність управління.

Незважаючи на переваги, моделі «чорної скриньки» мають недоліки. Головним з них є відсутність прозорості: такі моделі не надають інформації про внутрішні механізми системи, що може ускладнити інтерпретацію результатів та їх верифікацію. Це може стати проблемою в ситуації, коли необхідне детальне розуміння причинно-наслідкових зв'язків.

У цьому випадку моделі «чорної скриньки» у вигляді нелінійних функціональних залежностей є більш придатним інструментом для моделювання та аналізу статичних систем з нелінійними характеристиками. Зокрема, найбільш значущі результати при розробці методів ідентифікації таких моделей отримали українські та зарубіжні вчені Бакан Г.М., Івахненко О.Г., Воцінін А.П., Грановський В.А., Кунцевич В.М., Дивак М.П., Степашко В.С., Личак М.М.,

Куржанський А.Б., Пшеничний Б.М., Шокін Ю.І., Шарий С.П., Згуровський М.З., Черноусько Ф.Л., Мойсеєва М.М., Ljung L., Milanese M., Norton J.P., Schwepper F.S., Pronzanto L., Vicino E., Akaike H., Rissanen J., Pollard D. Такі моделі будують у вигляді алгебраїчних рівнянь для опису взаємозв'язків між вхідними змінними та нелінійними характеристиками системи, що дозволяє враховувати складні нелінійні поведінкові закономірності. До основних переваг таких моделей можна віднести:

- точний опис складних взаємозв'язків, що виникають у статичних системах з нелінійними характеристиками. На відміну від лінійних моделей, які можуть значно спростувати реальні фізичні процеси, нелінійні моделі забезпечують більш адекватне відображення дійсної поведінки системи;

- широкий спектр базисних функцій для опису залежностей. Це дозволяє дослідникам та інженерам підбирати оптимальні базиси для конкретних задач, враховуючи фізичні та технічні особливості системи. Можливість налаштування моделі під конкретні умови та вимоги робить її універсальним інструментом для багатьох галузей;

- можливість інтерпретації та аналізу впливу різних вхідних змінних на вихідні характеристики системи. Це сприяє глибшому розумінню процесів, що відбуваються всередині системи, дозволяє ідентифікувати критичні фактори та здійснювати оптимізацію. Інтерпретованість є важливою перевагою в наукових дослідженнях, де розуміння механізмів є необхідним для розвитку нових теорій і методик;

- нижча обчислювальна складність у порівнянні з чисельними методами моделювання. Це є важливою перевагою для систем управління та моніторингу, де швидкість обчислень і реакції на зміни можуть бути критичними;

- легкість інтеграції в програмні системи для автоматизованого управління процесами. Вони надають простіші вирази та рівняння для реалізації в програмному коді, що полегшує розробку та підтримку програмних рішень.

Отже, моделі у вигляді алгебраїчних нелінійних залежностей надають широкий спектр можливостей для точного і адекватного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками. Вони забезпечують гнучкість, інтерпретованість, можливість аналітичного аналізу і оптимізації, а також більш високу швидкість обчислень, що робить їх ефективним інструментом для багатьох інженерних та наукових задач.

Однак, слід відмітити, що однією з основних проблем у моделюванні екзогенних впливів на статичні системи з нелінійними характеристиками є висока складність реалізації методів ідентифікації адекватних моделей, які враховували б усі значущі фактори та їх взаємодію.

Також ефективність методів обмежується способом врахування невизначеності, похибок в екзогенних даних. Одним із ефективних підходів, що враховує граничні значення похибок, є інтервальний підхід. Цей підхід уможливорює побудову інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із гарантованою точністю. Однак використання такого підходу значно ускладнює обчислювальні процедури структурної та параметричної

ідентифікації моделей у порівнянні з іншими. Таким чином виникає протиріччя між потребою у побудові адекватних математичних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із заданою точністю на основі аналізу інтервальних даних та складністю методів їх ідентифікації.

Відповідно актуальною є **науково-прикладна проблема** зниження обчислювальної складності процедур реалізації методів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з пріоритетним напрямом відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки»: «Інформаційні та комунікаційні технології» та безпосередньо пов'язана з планами наукових досліджень, які виконувалися за держбюджетною тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету у межах науково-дослідних робіт: «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 за госпдоговірною тематикою: «Моделювання динаміки процесів у біогазових установках» (2023-2024 рр., держреєстраційний номер 01230103785, замовник – ТОВ «Теофіпольська енергетична компанія»), «Макромоделювання якості ґрунтів як об'єкта із розподіленими параметрами в умовах інтервальної невизначеності» (липень 2014-грудень 2015 рр., держреєстраційний номер 0114U006089, замовник – ФО-П Мадюдя А.І.), «Розподілена система контролю технологічного процесу виробництва гіпсокартону» (грудень 2012-червень 2013 рр., держреєстраційний номер 0112U003917, замовник – ПП «Українські гіпсокартонні системи»).

Мета та завдання досліджень. Метою дисертаційного дослідження є зниження обчислювальної складності процедур реалізації методів ідентифікації математичних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в умовах інтервальної невизначеності у спосіб розробки та реалізації комплексного підходу на основі поєднання онтологічного опису предметної області ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів глобальної і локальної оптимізації.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційного дослідження необхідно розв'язати низку таких завдань:

- провести аналіз літературних джерел, за результатами якого у поєднанні з результатами власних досліджень обґрунтувати напрямки формалізації задач параметричної та структурної ідентифікації інтервальних моделей та розробки ефективних методів їх розв'язування;

- сформулювати новий комплексний підхід до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який б забезпечив зниження часової складності розв'язування задач структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем на основі аналізу інтервальних даних;

- обґрунтувати формалізацію задач ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних у вигляді оптимізаційної задачі з нелінійною диференційованою цільовою функцією;

- розробити гібридні методи параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із врахуванням специфіки використання інтервальних даних;

- розробити методи структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які ґрунтуються на аналізі градієнта цільової функції та часткової похідної по параметрах моделі для редукованих чи доданих структурних елементів;

- в межах комплексного підходу до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками розробити уніфікований метод ідентифікації, який ґрунтується на комбінуванні методів параметричної та структурної ідентифікації в залежності від характеристик задачі ідентифікації;

- запропонувати та реалізувати архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних;

- провести апробацію розроблених та удосконалених методів, а також реалізованих програмних засобів для розв'язування прикладних задач моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками.

Об'єктом досліджень є процеси ідентифікації математичних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних.

Предметом досліджень є гібридні методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками та засоби їх застосування, які орієнтовані на використання ефективних стратегій та алгоритмів оптимізації.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань в дисертаційній роботі застосовуються методи теорії систем, теорії ідентифікації, математичного моделювання, інтервальної математики, теорії ймовірностей, математичної статистики та оптимізації, реляційної алгебри. Для розробки комп'ютерного середовища та створення прикладних програмних систем використовуються методи системного аналізу, об'єктно-орієнтованого аналізу, проектування та

програмування, а також методи функціонального та комплексного тестування систем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у подальшому розвитку теоретичних засад ідентифікації математичних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних.

Зокрема:

уперше:

- 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;

- 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;

- 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;

- 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;

- 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;

- 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;

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;

набули подальшого розвитку:

- інтервальні моделі генерованої електроенергії малою гідроелектростанцією 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.

Практичне значення одержаних результатів. Основні практично значущі результати дисертаційної роботи були отримані на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень. Ці результати спрямовані на підвищення ефективності програмних засобів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, забезпечуючи спрощення процесу моделювання та наближеність користувача до розроблених сервісів. У межах запропонованого наукового комплексного підходу, з урахуванням особливостей розроблених методів та реалізованих алгоритмів, а також запропонованої сервісно-орієнтованої архітектури, розроблено програмний комплекс для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних.

В межах запропонованого наукового підходу отримано такі практично значимі результати:

- інтервальна нелінійна модель характеристик сигналу – реакцій на подразнення тканин в хірургічній рані, яка за рахунок застосування нових гібридних методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей потребує менше часу на її ідентифікацію, що відповідно забезпечує оперативність при інтраопераційній ідентифікації поворотних нервів гортані під час проведення операцій тиреоїдектомії;

- інтервальна модель поширення промислового забруднення від точкового джерела, яка з гарантованою точністю відтворює властивості фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта та слугує інструментарієм для підтримки рішень щодо декарбонізації таких об'єктів;

- інтервальна модель залежності обсягів відновлення транспортної інфраструктури, яка встановлює причинно-наслідкові зв'язки між обсягом відновленої транспортної інфраструктури та використанням низьковуглецевих матеріальних ресурсів, що уможливорює ефективне управління декарбонізацією транспортної інфраструктури.

Основні результати дисертаційної роботи використано та впроваджено для обґрунтування прийняття рішень в установах різного призначення: у ТОВ «Геофіпольська енергетична компанія» при виробництві біогазу для забезпечення стабільності бродіння в біореакторах першого етапу; у Тернопільській міській комунальній лікарні №2 при інтраопераційній ідентифікації нервів гортані під час проведення 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; при реалізації програмних проєктів ТОВ «АПКО УКРАЇНА» для відтворення властивостей статичних об’єктів з нелінійними характеристиками із гарантованою точністю. На підставі отриманих у дисертаційній роботі результатів досліджень розроблено методичне забезпечення, яке використовується у навчальному процесі кафедри комп’ютерних наук Західноукраїнського національного університету при викладанні дисциплін «Моделювання систем», «Інтелектуальний аналіз даних» для студентів спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення». А також дисципліни «Технологія розробки програмного забезпечення та систем моделювання», «Методи та програмні засоби теоретико-множинного інтервального підходу» для здобувачів третього рівня освіти зі спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення».

Особистий внесок здобувача. Дисертація є цілісним, завершеним дослідженням, проведеним особисто автором. Сформульовані результати дисертаційного дослідження отримані автором особисто та за його безпосередньої участі і є його особистим здобутком. У працях, що відображають основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації автору належать: [1, 8, 42, 45] – систематизація критеріїв оптимальності інтервальних моделей в задачах структурної ідентифікації; [2] – удосконалена система критеріїв зупинки обчислювальної процедури оптимізації в задачах параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками; [4, 16, 21] – формалізація задачі параметричної ідентифікації у вигляді оптимізаційної задачі з диференційованою нелінійною цільовою функцією; [23] – аналіз задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками та методів глобальної оптимізації для їх вирішення; [6] – інтервальні моделі процесів у біогазових установках, які описують залежність рН середовища від складу завантаженої у біореактор сировини та технологічних параметрів процесу виробництва біогазу на основі багатокомпонентного субстрату; [28] – аналіз задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей систем з нелінійними характеристиками та методів глобальної оптимізації для їх вирішення; [7, 40, 48] – інтервальні моделі залежності генерованої електроенергії від характеристик гідротехнічних споруд для оцінювання потенційних можливостей використання наявних гідроресурсів малою гідроелектростанцією;

[14, 34] – математичне забезпечення системи моніторингу забруднення повітря для моделювання фонових рівнів концентрацій забруднення; [9, 15, 22, 49] – інтервальні нелінійні моделі характеристик сигналу – реакцій на подразнення тканин в хірургічній рані при інтраопераційній ідентифікації поворотних нервів гортані під час проведення операцій тиреоїдектомії; [10, 11] – алгоритм отримання інтервальних оцінок параметрів моделі статичної системи з нелінійними характеристиками на основі допускового оцінювання області значень вектора параметрів; [13, 20] – новий комплексний підхід до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із застосуванням онтологічних описів предметної області; [47, 50] – реалізація методу параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем; [21, 25] – теоретичні засади та метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на аналізі градієнта цільової функції; [12, 19] – метод структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей статичних систем; [17, 18, 26, 43, 44] – архітектура програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних; [33] – постановка задачі оцінки наслідків неврахування факторів при прийнятті рішень на основі моделювання статичних систем [3, 5, 27, 29, 30, 31, 32] – інтервальні моделі для підтримки прийняття рішень в декарбонізації транспортної інфраструктури та енергетичних об'єктів; [35, 36, 57] – аналіз методів розв'язування інтервальних систем лінійних алгебраїчних рівнянь; [38, 39] – здійснено постановку задачі апроксимації функції із заданою точністю на основі інтервального підходу; [52, 53] – реалізація алгоритму параметричної ідентифікації інтервальних моделей; [55] – критичний аналіз методів машинного навчання з точки зору дослідження характеристик статичних систем; [41, 46, 59] – постановка задачі ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками; [51, 54, 56, 58, 60, 61] – постановка задачі реалізації архітектурних рішень сервісно-орієнтованого програмного забезпечення.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові, теоретичні положення та практичні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на таких міжнародних науково-технічних конференціях: “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”, CADSM (Львів-Поляна, 2015, 2017, 2023); “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, TCSET (Львів-Славсько, 2012, 2018); “Обчислювальні проблеми електротехніки” СРЕЕ (Terchova-Vratna Dolina, Slovak Republic, 2014); “Advanced Computer Information Technologies” ACIT (Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019; Deggendorf, Germany, 2020, 2021; Ruzomberok, Slovakia, 2022; Wrocław, Poland, 2023); “Artificial Intelligence for Sustainable Development” AISD (Ternopil, Ukraine, 2024); “Informatics and Data-Driven Medicine”, IDDM (Lyon, France, 2022), Всеукраїнських науково-технічних конференціях: «Сучасні комп'ютерні інформаційні технології» ACIT (Тернопіль, 2010-2017); «Комп'ютерні інформаційні технології» CIT (Тернопіль, 2019-2023); «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та

модельовання» ПНМК (Бучач, 2008, 2009, Східниця, 2010, 2011), а також наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету (2008-2023).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 61 наукову працю, зокрема 20 статей у наукових фахових періодичних виданнях, у тому числі 14 статей у наукових фахових виданнях України та 6 статей у закордонних періодичних виданнях, що включені в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science, 1 монографія, що опублікована за темою дослідження українською мовою та 40 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій (з них 17 публікацій включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science). Загалом 23 публікацій включено до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science.

Структура та загальний обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 350 сторінок, з яких основний зміст викладено на 280 сторінках друкованого тексту та в тому числі містить 94 рисунки і 28 таблиць. Список використаних джерел складається з 304 найменувань на 35 сторінках. Додатки у кількості 3 на 35 сторінках. Додатки містять часткові результати реалізації онтологічних описів, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, список праць автора за темою дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У першому розділі «Аналіз задач та методів ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних» розглянуто задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. Досліджено, що для модельовання складних систем набули поширення нелінійні авторегресійні моделі з екзогенними входами (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs, NARX). Моделі NARX можуть також розглядатися як моделі «чорної скриньки», коли нелінійна модель будується за допомогою нелінійних регресій, різницевих операторів, нейронних мереж або інших методів машинного навчання (рис. 1).

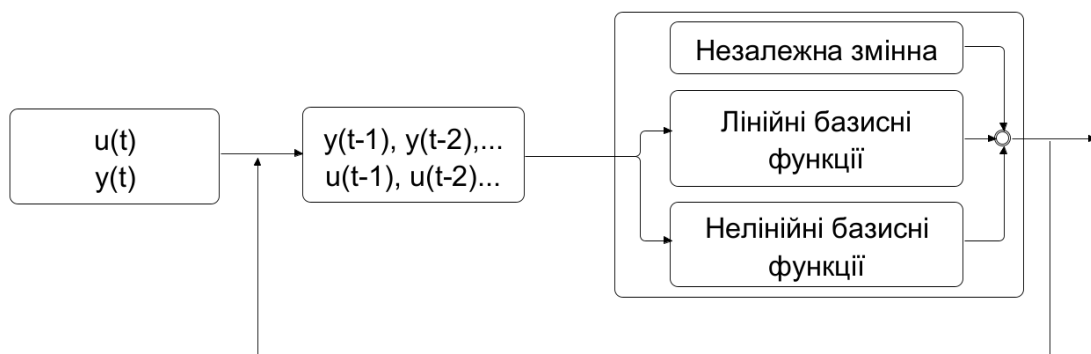


Рис. 1. Ідентифікація NARX моделей складних систем

В даному дослідженні складні об'єкти розглядаються як такі, в яких ігноруються перехідні процеси, тобто як статичні системи з нелінійними характеристиками. У цьому випадку ідентифікація моделей зводиться до встановлення залежності значення вихідної характеристики y від значень вхідних змінних x у вигляді нелінійних алгебраїчних рівнянь (рис. 2).



Рис. 2. Ідентифікація моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

При цьому процес ідентифікації включає дві задачі: структурну та параметричну ідентифікацію. Задача параметричної ідентифікації базується на припущенні, що вихідна нелінійна характеристика статичної системи y_0 описується алгебраїчним виразом такого вигляду:

$$y_0 = f_1(\vec{\beta}, X) + \dots + f_m(\vec{\beta}, X), \quad (1)$$

де y_0 – вихідна нелінійна характеристика статичної системи, $\vec{\beta}$ – вектор параметрів моделі, X – матриця значень екзогенних факторів впливу на нелінійну характеристику статичної системи, $f_1(\vec{\beta}, X), \dots, f_m(\vec{\beta}, X)$ – множина базисних нелінійних функцій, m – розмірність моделі.

При цьому результати експерименту отримані в інтервальному вигляді:

$$\vec{X}_i = (x_{i1} \dots x_{in}) \longrightarrow [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}, \quad (2)$$

де $y_i^-; y_i^+$ – граничні значення характеристики, n – кількість екзогенних факторів, N – кількість спостережень експерименту.

Сформульовано задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, як задачу розв'язування інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР) такого вигляду:

$$\begin{cases} y_1^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_1) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_1) \leq y_1^+; \\ \vdots \\ y_i^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \leq y_i^+; \\ \vdots \\ y_N^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_N) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_N) \leq y_N^+. \end{cases} \quad (3)$$

Таким чином, сумісність ІСНАР (3) означає, що інтервали значень прогнозованої нелінійної характеристики статичної системи $[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)]$ в точках експерименту \vec{X}_i належать інтервалам $[y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}$, отриманих

експериментально, в одних і тих же точках спостережень, тобто при виконанні таких умов:

$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \subset [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}. \quad (4)$$

Встановлено, що у випадку знаходження розв'язку цієї системи,

$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] = f_1([\hat{\beta}_1^-; \hat{\beta}_1^+], \vec{X}_i) + \dots + f_m([\hat{\beta}_m^-; \hat{\beta}_m^+], \vec{X}_i), i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

отримують оптимізаційну задачу:

$$\delta([\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+]) \xrightarrow{[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+]} \min, \quad (6)$$

$$[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+] \subset [\hat{\beta}^{low}; \hat{\beta}^{up}], \quad (7)$$

де $\hat{\beta}^{low}; \hat{\beta}^{up}$ – задані межі для параметрів моделі, з нелінійною дискретною цільовою функцією:

$$\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+]) = \max_{i=\overline{1, N}} \{ |mid([\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)]) - mid([y_i^-; y_i^+])| \}, \quad (8)$$

якщо

$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \cap [y_i^-; y_i^+] = \emptyset, \exists i = \overline{1, N};$$

$$\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+]) = \max_{i=\overline{1, N}} \left\{ \begin{array}{l} wid([\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)]) - \\ -wid([\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \cap [y_i^-; y_i^+]) \end{array} \right\}, \quad (9)$$

якщо

$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \cap [y_i^-; y_i^+] \neq \emptyset, \forall i = \overline{1, N},$$

де $mid(\bullet)$ і $wid(\bullet)$ – оператори визначення центру та ширини інтервалу, відповідно. Це призводить до підвищення обчислювальної складності методів розв'язування даної задачі.

Сформульовано задачу структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей статичних систем у вигляді оптимізаційної задачі на дискретній множині структурних елементів:

$$\delta(\lambda_m) \xrightarrow{\hat{\lambda}_m, [\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+]} \min, \quad (10)$$

$$\lambda_m \in \lambda_s, \quad (11)$$

$$[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+] \subset [\hat{\beta}^{low}; \hat{\beta}^{up}], \quad (12)$$

де λ_s означає деяку множину структурних елементів розмірністю s , яка є основою для побудови інтервальної моделі, $\lambda_s = \{f_1(\vec{\beta}, X), f_2(\vec{\beta}, X), \dots, f_s(\vec{\beta}, X)\}$.

Встановлено, що обчислювальна схема її розв'язування ґрунтується на багаторазовому розв'язуванні задач параметричної ідентифікації для фіксованого

набору моделей-претендентів. Досліджено, що ця задача є NP-складною і для її розв'язування необхідно використовувати методи глобальної оптимізації.

Проведено аналіз методів глобальної оптимізації для розв'язування задач параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Встановлено, що зазначені методи в основному ґрунтуються на метаевристичних алгоритмах глобальної оптимізації, серед яких найбільшого поширення набули методи: рою частинок, вовчої зграї, алгоритми бджолоїної колонії. Показано недоліки зазначених метаевристичних алгоритмів, зокрема їх високу обчислювальну складність, та встановлено, що у випадку ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками перспективним напрямком є використання гібридних методів, які поєднують стратегії глобального пошуку та методи локальної оптимізації, зокрема, метод множинного старту оптимізації, який поєднує евристики дослідження глобального простору пошуку та ефективні методи локальної оптимізації. Гібридний метод глобального пошуку базується на множинному запуску оптимізації, що робить його також ефективним при використанні паралельних обчислень. Метод поєднує глобальні та локальні методи оптимізації для знаходження глобальних мінімумів. При цьому використовуються евристики для вибору та фільтрації початкових точок. Евристики допомагають швидше знаходити перспективні області в просторі рішень, скорочуючи час обчислень. Загальну схему використання методів глобальної та локальної оптимізації наведено на рис. 3.

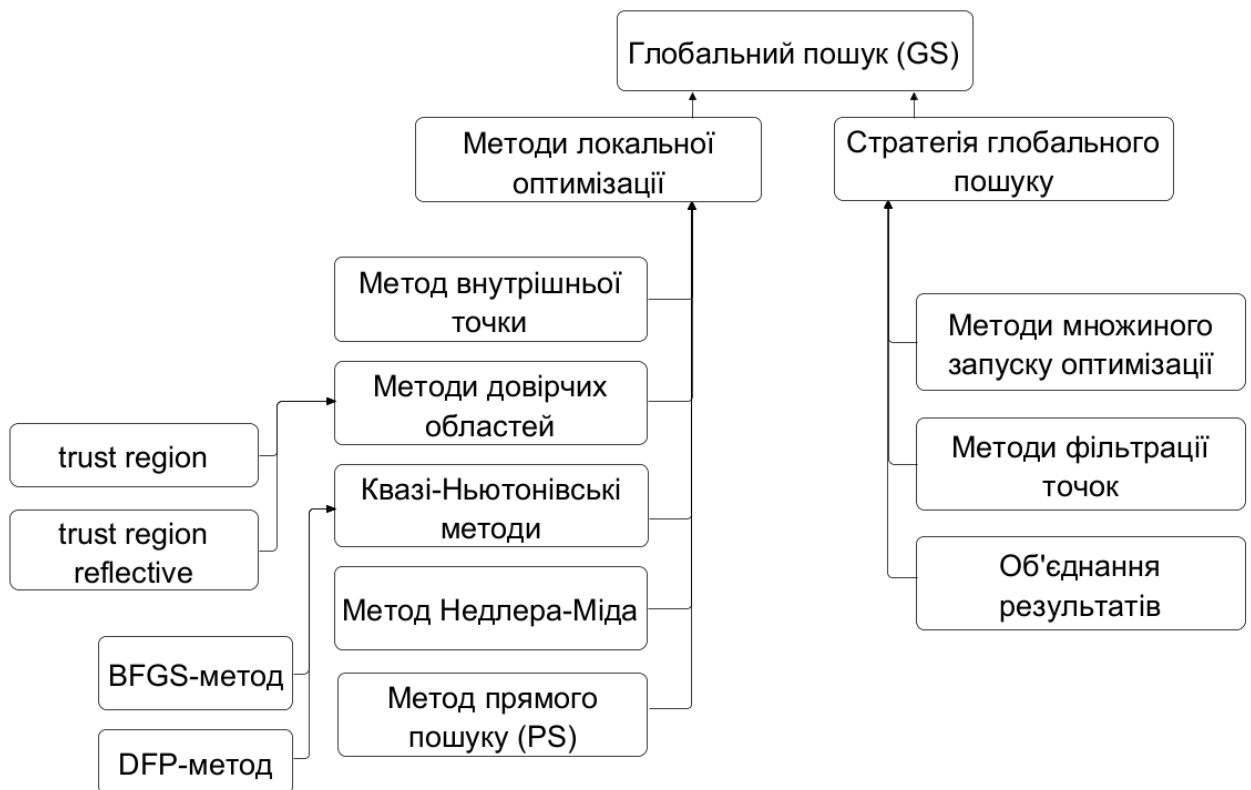


Рис. 3. Загальна схема гібридного методу глобального пошуку

Встановлено, що у випадку використання методів глобальної оптимізації для розв'язування задач ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, одним із можливих напрямів є формалізація процедур структурної та параметричної ідентифікації на підставі використання онтологічного підходу. Виокремлено досвід розробки онтологій для формалізації наукових експериментів та математичного моделювання складних об'єктів на основі інтервальних аналізу даних. Встановлено, що використання існуючих онтологічних описів обмежено традиційними кількісними методами аналізу даних, такими як регресійний аналіз, а у другому випадку, слабкою інтеперабельністю з точки зору інтеграції стандартних ефективних методів та засобів для ідентифікації інтервальних моделей статичних систем.

Таким чином, проведені дослідження на основі відкритих літературних джерел вказують на існування об'єктивного протиріччя між потребою у побудові адекватних інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із заданою точністю та складністю методів їх ідентифікації, які базуються на розв'язуванні оптимізаційних задач визначення структури та параметрів моделі.

Вирішення цього протиріччя лежить в площині формування комплексного підходу на основі поєднання онтологічних описів знань з предметної області ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками та гібридних методів, які поєднують ефективні стратегії глобального пошуку та методів локальної оптимізації. Реалізація такого підходу уможливить зниження обчислювальної складності процедур реалізації методів ідентифікації математичних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в умовах інтервальної невизначеності та спрощення процесу моделювання в цілому.

Другий розділ «Методи параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем на основі багатовимірної оптимізації» присвячено розробці ефективних гібридних методів параметричної ідентифікації на основі глобальної та локальної оптимізації.

Вперше при розв'язуванні задач параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками запропоновано та обґрунтовано представлення цієї задачі у вигляді оптимізаційної задачі з цільовою функцією, яка мінімізує квадратичне відхилення між значеннями модельованої характеристики статичного системи та значеннями, вибраними на експериментальних числових інтервалах цієї характеристики.

При інтервальній постановці задачі, в сенсі розв'язування ІСНАР (3), достатньо знайти хоча б одну модель на основі вектора параметрів $\vec{\beta}$. Тоді умови належності модельованого значення на основі розв'язку $\vec{\beta}$ експериментальному коридору набуде такого вигляду:

$$\hat{y}_i(\vec{X}_i) \in [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}, \quad (13)$$

де

$$\hat{y}(\vec{X}_i) = f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i), i = \overline{1, N}. \quad (14)$$

Вираз (14) означає модель на основі точкового розв'язку $\vec{\beta}$ ІСНАР:

$$y_i^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \leq y_i^+, i = \overline{1, N}, \quad (15)$$

де m – кількість нелінійних базисних функцій, що визначають структуру інтервальної моделі на основі точкового розв'язку.

Сформульовано та доведено твердження, що визначають оптимізаційну задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей нелінійних характеристик статичних систем та коректність її постановки.

Твердження 1. Якщо існує хоча б один розв'язок ІСНАР (15), то він еквівалентний розв'язку такої задачі:

$$\delta(\vec{\beta}) \xrightarrow{\vec{\beta}, \hat{\alpha}_i} \min \quad (16)$$

$$\alpha_i \in [0, 1], i = \overline{1, N}, \quad (17)$$

де α_i – коефіцієнти лінійної комбінації для визначення точки в межах експериментальних даних $[y_i^-; y_i^+]$.

Цільова функція є нелінійною функцією квадратичної похибки у такому вигляді:

$$\delta(\vec{\beta}) = \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right)^2, \quad (18)$$

де

$$P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) = \alpha_i \cdot y_i^- + (1 - \alpha_i) \cdot y_i^+, i = \overline{1, N}. \quad (19)$$

Твердження 2. Хоча б один розв'язок задачі (16-17) задовольняє умову:

$$\delta(\vec{\beta}) = 0.$$

Формулювання задачі у такий спосіб, з одного боку, призводить до зростання розмірності оптимізаційної задачі, за рахунок введення додаткових змінних у цільову функцію, які забезпечують узгодженість результатів моделювання та експерименту, проте, з іншого боку, за рахунок спрощення цільової функції забезпечує зниження обчислювальної складності процедур розв'язування цієї задачі. Отже, отримано задачу багатовимірної оптимізації з нелінійною цільовою функцією, яка уможливує застосування гібридних методів оптимізації із використанням алгоритмів з квадратичною збіжністю.

На основі чисельних експериментів досліджено характеристики запропоновано цільової функції та конвергенцію розв'язування задач з її використанням. Проведено компаративний аналіз відомих засобів глобальної оптимізації з метою вибору оптимального алгоритму для оптимізаційної процедури задачі ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелійними характеристиками. Визначено, що за умови диференційованості

цільової функції ефективним є гібридний глобальний пошук із використанням методу внутрішньої точки (алгоритм Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, BFGS).

Вперше запропоновано та розроблено метод параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі з нелінійною цільовою функцією та гібридної стратегії глобального пошуку із використанням квазі-Ньютонівських методів, що у сукупності забезпечує гарантовану квадратичну збіжність. Удосконалено систему критеріїв зупинки процедур оптимізації за рахунок використання додаткового критерію зупинки на поточній ітерації оптимізаційної процедури на основі перевірки адекватності моделі, умови (13), що забезпечило зниження часової складності цієї процедури. При цьому отримані нелінійні моделі статичних систем відображають властивості статичної системи із заданою точністю.

На основі застосування розробленого гібридного методу параметричної ідентифікації побудовано інтервальну нелінійну модель характеристик сигналу – реакцій на подразнення тканин в хірургічній рані, яка потребує менше часу на її ідентифікацію, що забезпечує оперативність при інтраопераційній ідентифікації поворотних нервів гортані під час проведення операцій тиреоїдектомії.

Для випадку потреби отримання інтервального представлення розв'язку задачі параметричної ідентифікації запропоновано алгоритм визначення інтервальних оцінок параметрів моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Алгоритм реалізовано на основі допускового оцінювання області визначення вектора параметрів, що ґрунтується на аналізі граничних умов приросту кожного параметра із врахуванням інтервальних значень експериментального коридору. Псевдокод алгоритму наведено нижче.

Алгоритм 1. Алгоритм визначення допускової області параметрів на основі точкового розв'язку

Ініціалізація:

задати:

експериментальні дані $[y_i^-; y_i^+]$, $i = \overline{1, N}$;

вхідні дані у вигляді матриці X ;

структуру моделі $y(X) = f_1(\vec{\beta}, X) + \dots + f_m(\vec{\beta}, X)$;

кількість параметрів k ;

точковий розв'язок для вектора параметрів $\vec{\beta}$;

початкові інтервали параметрів:

$$[\vec{\beta}] = [\vec{\beta}^-; \vec{\beta}^+], \beta_j^- = -\infty, \beta_j^+ = +\infty, j = \overline{1, k};$$

Для $i \leftarrow 1$ до N виконати

 Для $j \leftarrow 1$ до k виконати

 Визначення меж параметрів для j -го вимірювання:

$${}^i\beta_j^- = \frac{\left(y_i^- - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\left. \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}} + \hat{\beta}_j;$$

$${}^i\beta_j^+ = \frac{\left(y_i^+ - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\left. \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}} + \hat{\beta}_j$$

Оновлення меж інтервалів

Якщо $\left. \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j} \geq 0$

$$\beta_j^- = \max(\beta_j^-, {}^i\beta_j^-);$$

$$\beta_j^+ = \min(\beta_j^+, {}^i\beta_j^+);$$

Інакше

$$\beta_j^- = \min(\beta_j^-, {}^i\beta_j^-);$$

$$\beta_j^+ = \max(\beta_j^+, {}^i\beta_j^+);$$

Кінець

Кінець

Кінець

Повернути вектор інтервальних значень параметрів $[\vec{\beta}]$;

В третьому розділі «Метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних систем на основі градієнтних методів» розглянуто задачу структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Показано, що зазначена задача є оптимізаційною задачею мінімізації багатоекстремальної цільової функції, що здійснюється в просторі дискретних елементів, які визначають структуру моделі, та її параметрів, значення яких є розв'язками оптимізаційної задачі параметричної ідентифікації (рис. 4).

Сформульовано задачу структурної ідентифікації на основі оптимізаційної задачі (16-17):

$$\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}) \xrightarrow{\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}} \min \quad (20)$$

$$\lambda_m \in \lambda_s, \quad (21)$$

$$\alpha_i \in [0,1], i = \overline{1, N}. \quad (22)$$

Цільова функція оптимізаційної задачі (20-22) має такий вигляд:

$$\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}) = \sum_{i=1}^N \left(\left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) - P([y_i^-, y_i^+], \alpha_i) \right)^2. \quad (23)$$

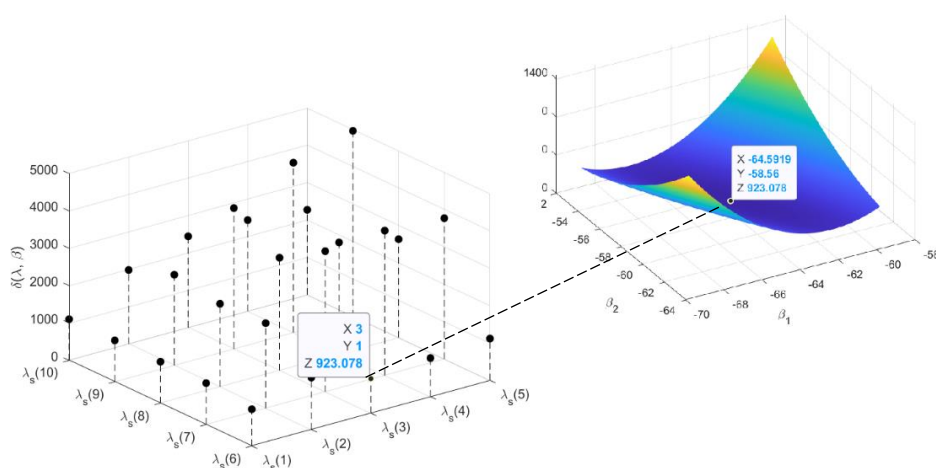


Рис. 4. Ілюстрація до постановки задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

Запропоновано та обґрунтовано правила нарощування, редукції та селекції структурних елементів інтервальних моделей-претендентів, які ґрунтуються на аналізі градієнта цільової функції відносно параметрів моделей та часткової похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого структурного елемента.

Правило 1. Необхідною умовою оптимальності множини структурних елементів λ_m моделі-претендента в сенсі задачі (20-22) є мінімум норми вектора антиградієнта $\|-\nabla\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})\|$ цільової функції (23) на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^m$, де

$$-\nabla\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}) = \left(\frac{d\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)}{d\beta_1^m}, \frac{d\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)}{d\beta_2^m}, \dots, \frac{d\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)}{d\beta_m^m} \right). \quad (24)$$

Виконання цього правила породжуватиме два випадки.

Випадок 1. Якщо інтервальна модель на основі вектора структури $\vec{\lambda}_m$ є адекватною, що підтверджується умовами (13), то це означає, що знайдено розв'язок оптимізаційної задачі (20-22), у вигляді вектора структури $\vec{\lambda}_m$ та вектора параметрів $\vec{\beta}^m$.

Випадок 2. «Вичерпаність» розмірності моделі, якщо глобальний мінімум функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})$ не забезпечує адекватності моделі на основі вектора структури $\vec{\lambda}_m$ з розмірністю m .

Правило 2. Найбільш придатним претендентом серед усіх структурних

елементів для структури $\vec{\lambda}_m$ є такий, який при нарощуванні структури моделі забезпечує найменше значення цільової функції (23), що оцінюється значенням похідної цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})$ для $\beta_v^m \in \vec{\beta}^m$ на основі поточного мінімуму цільової функції.

При цьому обчислене значення параметра моделі є розв'язками такого рівняння:

$$\sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) + \beta_v^m \cdot f_w^s(\vec{\beta}^m, \vec{X}_i) \right)^2 = \delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}). \quad (25)$$

Для кількісної оцінки «якості» нових структурних елементів, в сенсі мінімізації цільової функції, для яких існує розв'язок рівняння (25), запропоновано використовувати значення часткової похідної цільової функції,

$$\left. \frac{d}{d\beta_v} \delta(\hat{\beta}_v^m, f_w^s(\vec{\beta}^m, X), \vec{\alpha}) \right|_{\beta=\hat{\beta}_v^m, \delta=\min \delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})}, \quad (26)$$

для тієї моделі-претендента, структурні елементи якої забезпечують мінімум цільової функції із врахуванням нових структурних елементів $f_v^s(\vec{\beta}_w, X)$, які не входили в структуру моделі-претендента, $f_w^s(\vec{\beta}^m, X) \in \lambda_s \wedge f_w^s(\vec{\beta}^m, X) \notin \lambda_m$, $w = \overline{1, s}$.

Ілюстрація оцінки похідної цільової функції для вибору структурного елемента наведено на рис 5.

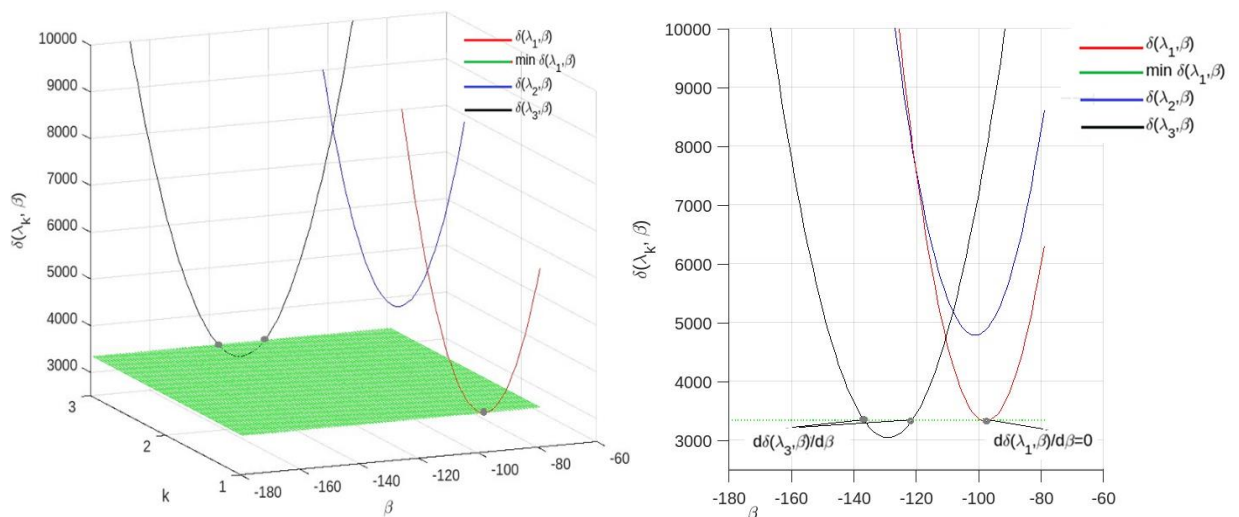


Рис. 5. Ілюстрація вибору структурного елемента на основі оцінки похідної цільової функції.

На підставі обґрунтованих правил нарощування, редукції та селекції структурних елементів вперше розроблено метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на аналізі градієнта цільової функції відносно параметрів моделі та часткової похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого

структурного елемента, що забезпечило напрямлений вибір структурних елементів і відповідно зниження кількості ітерацій обчислюваних процедур структурної ідентифікації. На тестових прикладах підтверджено збіжність запропонованого методу.

Розроблено алгоритм реалізації запропонованого методу структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Псевдокод алгоритму структурної ідентифікації наведено нижче.

Алгоритм 2. Структурна ідентифікація інтервальних моделей

Ініціалізація:

експериментальні дані $\vec{X}_i \rightarrow [y_i^-; y_i^+]$, $i = \overline{1, N}$;

множина структурних елементів λ_s ;

обчислити розмірність λ_s , $s = \text{length}(\lambda_s)$;

лічильник ітерацій, $k = 1$;

початкова структура моделі: $\lambda_k = \{f_1(\vec{\beta}, X), \dots, f_m(\vec{\beta}, X)\}$;

значення критерію зупинки: $\text{Stop_kriterion} = \text{FALSE}$;

Поки $\text{Stop_kriterion} = \text{FALSE}$ **виконувати**

$m = \text{length}(\lambda_k)$;

Обчислити вектор оцінок параметрів $\vec{\beta}^k$ моделі на основі λ_k ;

Якщо модель адекватна:

$\text{Stop_Criterion} = \text{TRUE}$;

В іншому випадку:

Для $v \leftarrow 1$ **до** m **виконувати**

Для $w \leftarrow 1$ **до** s **виконувати**

Обчислити похідну функції мети по v -му параметру для w -го структурного елемента,

$$\left. \frac{d}{d\beta_v} \delta(\hat{\beta}_v^k, f_w^s(\vec{\beta}^k, X), \vec{\alpha}) \right|_{\beta = \hat{\beta}_v^k, \delta = \min \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k, \vec{\alpha})};$$

Кінець для w

Кінець для v

Знайти вектор антиградієнта на основі k -ї структури,

$$-\nabla \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k);$$

Для $v \leftarrow 1$ **до** m **виконувати**

Замінити у структурі λ_k елемент $f_v^k(\vec{\beta}^k, X)$ на

$$f_w^s(\vec{\beta}, X), \text{ для якого } \left\| \frac{d}{d\beta_v} \delta(\hat{\beta}_v^k, f_w^s(\vec{\beta}^k, X)) \right\| = \max;$$

Кінець для v

Обчислити вектор оцінок параметрів $\vec{\beta}^k$ моделі на основі λ_k ;

Якщо модель адекватна:

$\text{Stop_Criterion} = \text{TRUE}$;

В іншому випадку

$$k = k + 1;$$

Додати у структуру λ_k новий елемент $f_w^s(\vec{\beta}, \vec{X})$;

Кінець якщо**Кінець якщо****Кінець поки**

Повернути множину λ_k та вектор параметрів $\vec{\beta}^k$;

Метод та алгоритм апробовано на прикладі ідентифікації інтервальної моделі генерованої електроенергії малою гідроелектростанцією в залежності від характеристик її гідротехнічних споруд.

Четвертий розділ «Моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками із застосуванням онтологічного підходу» присвячено реалізації комплексного підходу 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. Для реалізації комплексного підходу ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками запропоновано правила комбінування методів оптимізації, зокрема гібридного методу глобального пошуку на основі градієнтних методів (Global Search) та методів ройового інтелекту (рою частинок, PSO), поведінкових моделей бджолоїної колонії, ABC), що у сукупності забезпечило зниження часової складності ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками.

Для дослідження умов застосування методів нелінійної оптимізації в задачах ідентифікації статичних систем, враховуючи такі характеристики, як складність цільової функції та розмірність задачі, було проведено чисельні експерименти на основі тестових функцій. Було визначено умови застосування відповідних методів в залежності від характеристик задачі ідентифікації статичних систем з нелінійними характеристиками (табл. 1).

Таблиця 1

Вибір методів оптимізації на основі характеристик задач моделювання

Характеристика	Розмірність		
	низька, $n \leq 30$	середня, $30 < n \leq 100$	висока, $n > 100$
Складність			
Нейтральність	Global Search	Global Search	Global Search
Локальні мінімуми	GlobalSearch	Global Search	Global Search
Не диференційована (розриви 1 роду)	PSO	Global Search	Global Search
Не диференційована (розриви 2 роду)	ABC	Global Search	GlobalSearch

Загальну схему онтології для реалізації комплексного підходу до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками наведено на рисунку 6.

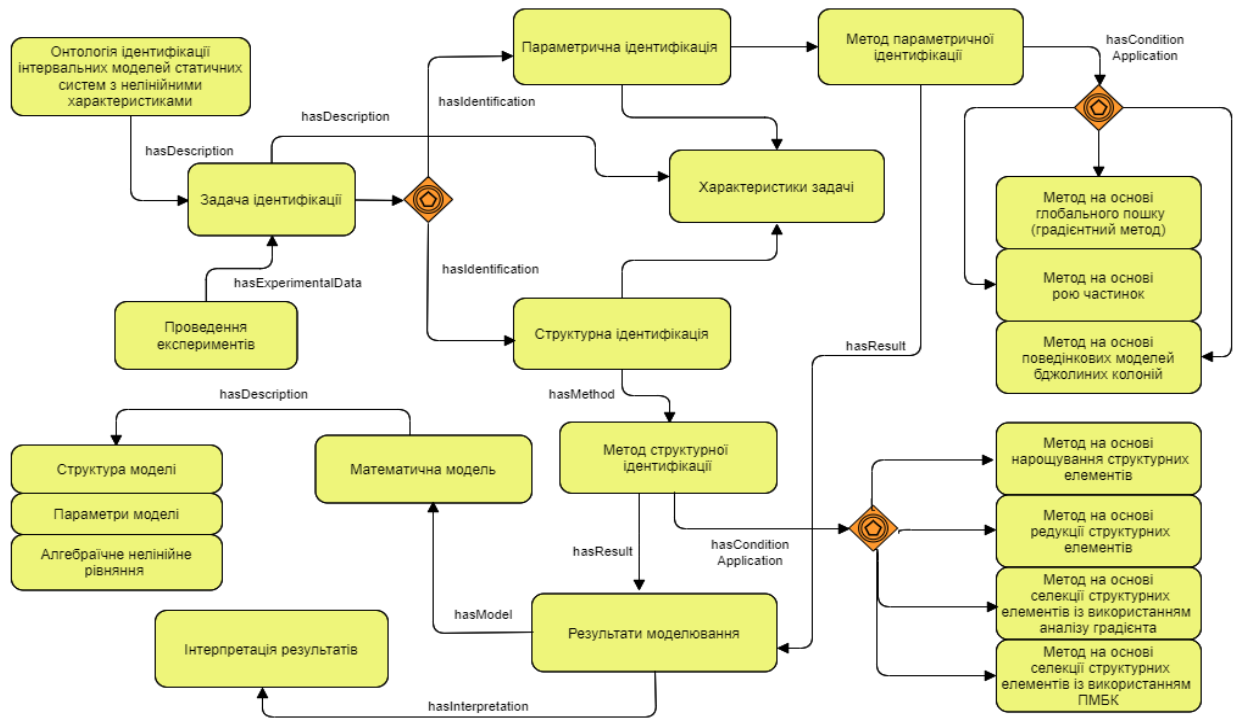


Рис. 6. Загальна схема онтології підтримки процесів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

На підставі аналізу предметної області, яка стосується ідентифікації моделей, запропоновано та обґрунтовано онтологічний опис (рис. 7).

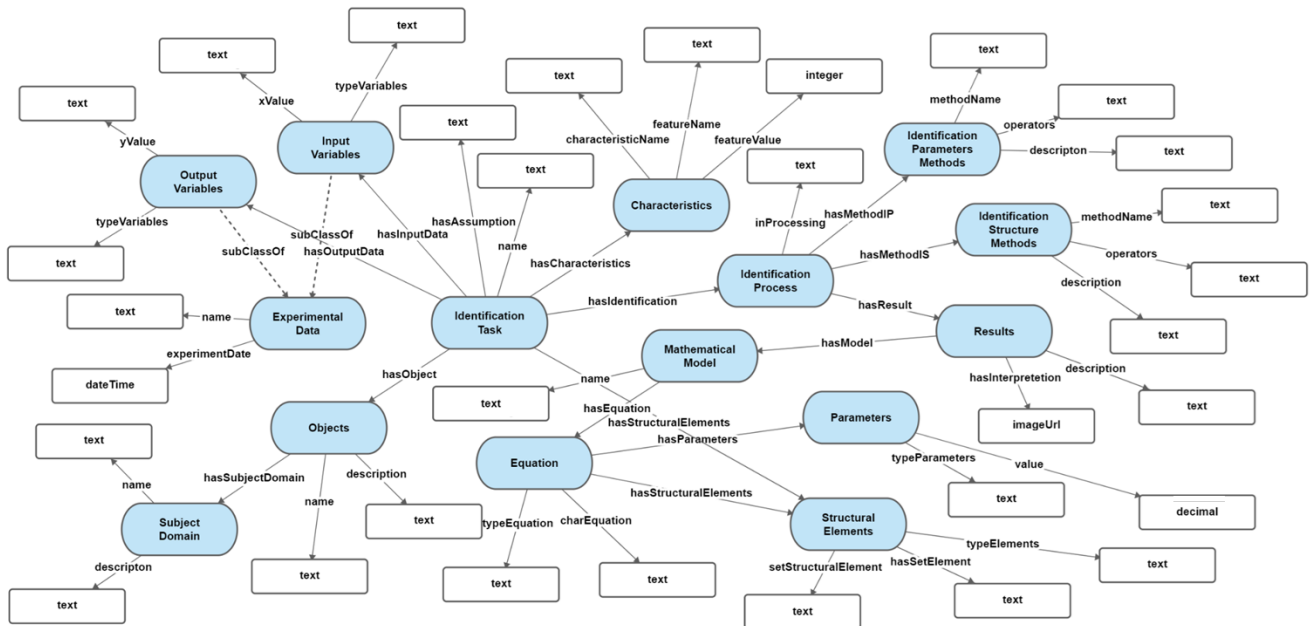


Рис. 7. Граф онтологічного опису предметної області моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками

В частині онтологічного опису вирішено завдання структурування знань про характеристики задач ідентифікації моделей статичних систем; методи оптимізації; критерії вибору методу залежно від характеристик задачі.

Запропоновано метод на основі формалізації процесу ідентифікації шляхом вибору ефективного методу ідентифікації в залежності від характеристик задачі, який забезпечує більш ефективне моделювання та ідентифікацію інтервальних нелінійних моделей статичних систем з нелійними характеристиками в порівнянні з існуючими. В основу реалізації методу покладено елементи та операції алгебри кортежів.

Псевдокод розробленого алгоритму реалізації методу ідентифікації інтервальних нелінійних моделей на основі онтологічного підходу наведено нижче.

Алгоритм 3. Ідентифікації інтервальних моделей статичних систем на основі онтологічного підходу

Ініціалізація:

Предметна область id_{a_C} ;

Об'єкт для ідентифікації:

$$O_{T_C} = \pi_{id_o} \left(\sigma_{O(id_a)=id_{a_C} \wedge O(id_x)=id_{x_C} \wedge O(id_y)=id_{y_C}}(\tau(O)) \right);$$

Вихідні дані для побудови моделі:

вхідні значення для факторів впливу id_{x_C} ;

вихідні значення характеристики id_{y_C} ;

множина структурних елементів або множина елементів для відомої структури id_f_C ;

характеристики задачі ідентифікації id_{ch_C} ;

Виконати

Якщо невідома структура

Вибір методу структурної ідентифікації id_{IS_C} ;

$$Idnt_C = \pi_{id_{IS}, M_{IS}} \left(\begin{array}{c} \sigma_{IP(id_o)=id_{o_C} \wedge IP(id_m)=id_{m_C} \wedge} \\ \wedge IP(id_{ch})=id_{ch_C} \end{array} (\tau(IP)) \right);$$

Кінець

Вибір методу ідентифікації параметрів моделі на основі характеристик оптимізаційної задачі:

$$Idnt_C = \pi_{id_{IP}, M_{IP}} \left(\begin{array}{c} \sigma_{IP(id_o)=id_{o_C} \wedge IP(id_m)=id_{m_C} \wedge} \\ \wedge IP(id_{ch})=id_{ch_C} \end{array} (\tau(IP)) \right);$$

Побудова інтервальної нелінійної моделі на основі експериментальних даних для об'єкта O_C предметної області id_o :

$$M_{T-C} = \pi_{id_m} \left(\begin{array}{c} \sigma_{M(id_o)=id_o-C \wedge M(id_\beta)=id_\beta-C}(\tau(M)) \\ \wedge M(id_f)=id_f-C \end{array} \right),$$

результатом побудови є структура моделі id_f та вектор параметрів id_β ; Формування результатів побудови моделі, інтерпретації результатів та основних тверджень використання моделі:

$$R_{T-C} = \pi_{id_r} (\sigma_{R_T(id_o)=id_o-C \wedge R_T(id_m)=id_m-C}(\tau(R))),$$

Оновлення умов застосування методів структурної та параметричної ідентифікації, в залежності від характеристик задачі ідентифікації:

$$IP-C = \pi_{desc_{IP}} (\sigma_{IP(id_{IP})=id_{IP-C} \wedge M(id_{ch})=id_{ch-C}}(\tau(IP)));$$

$$IS-C = \pi_{desc_{IS}} (\sigma_{IP(id_{IS})=id_{IS-C} \wedge M(id_{ch})=id_{ch-C}}(\tau(IS)));$$

Кінець

Повернути результати побудови моделі R ;

На основі запропонованого підходу до моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками розроблено модель генерованої потужності денного циклу модуля сонячної електростанції. В таблиці 2 наведено порівняння часових характеристик ідентифікації зазначеної моделі шляхом комбінування методів структурної та параметричної ідентифікації. Встановлено ефективність запропонованого методу.

Таблиця 2

Порівняльна характеристика комбінування методів ідентифікації інтервальних моделей (t, c)

Метод	Структурна ідентифікація	
	Метод селекції на основі аналізу градієнта	Метод селекції на основі поведінкових моделей бджолиних колоній
Метод глобального пошуку на основі градієнтних методів	2.105	3.0947
Метод на основі рою частинок	3.7695	6.9246
Метод на основі поведінкових моделей бджолиних колоній	2.6103	4.7797

В п'ятому розділі «Архітектура програмного забезпечення для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками з використанням хмарних технологій» наведено особливості запропонованої архітектури програмного забезпечення та описано специфіку її імплементації в процесі практичної реалізації програмної системи для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних.

Встановлено, що потреби наближеності до користувача та забезпечення зручності у застосуванні методів математичного моделювання на основі

інтервальних даних вимагають розробки спеціалізованих програмних середовищ, які інтегрують спектр математичних методів в єдину концепцію побудови інструментальних засобів, зрозумілу для користувачів-практиків. Процес математичного моделювання на основі інтервальних даних є складним і вимагає виконання деякої послідовності кроків, що визначається в даній ситуації специфікою використання хмарних сервісів, яку в загальному представлено на рисунку 8.

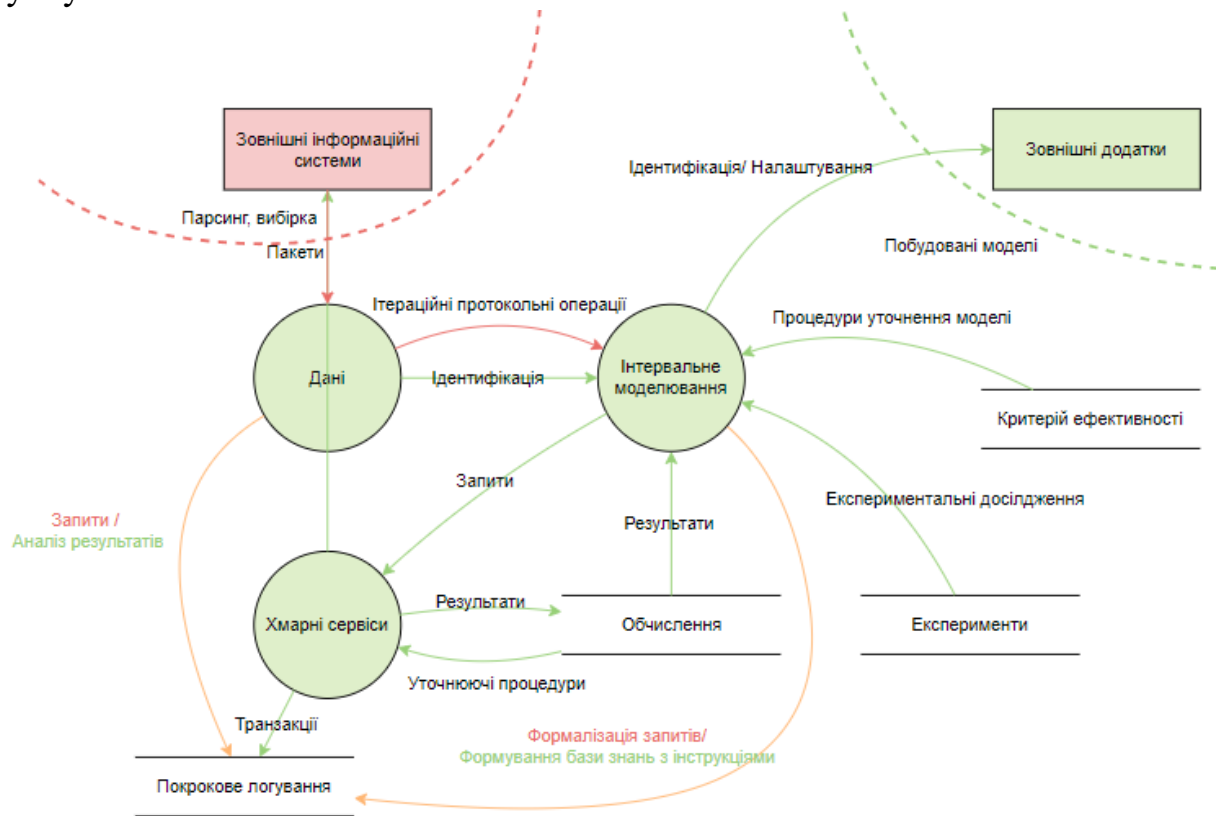


Рис. 8. Схема побудова інтервальних моделей з використанням хмарних сервісів

Такий підхід можливо реалізувати на основі використання сервісо-орієнтованої архітектури із урахуванням оптимізації обчислювальних процесів за допомогою застосування платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, безкоштовних програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API.

В роботі вперше запропоновано та обґрунтовано архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій (рис. 9). Особливостями запропонованої архітектури є імплементація підсистеми інтервального моделювання статичних систем в хмарній сервісо-орієнтованій архітектурі із врахуванням оптимізації обчислювальних схем на основі платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, безкоштовних програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API на всіх етапах математичного моделювання

На базі запропонованої архітектури реалізовано програмну систему для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій. Одним із ключових компонентів даної системи є інтелектуалізована консультативно-діагностична підсистема на основі штучного інтелекту. На рисунку 10 представлено приклад екранної форми в процесі реалізації моделі розподілу інформаційного сигналу на тканинах хірургічної рани для пошуку поворотного гортанного нерву під час операції в середовищі CloudInterval.

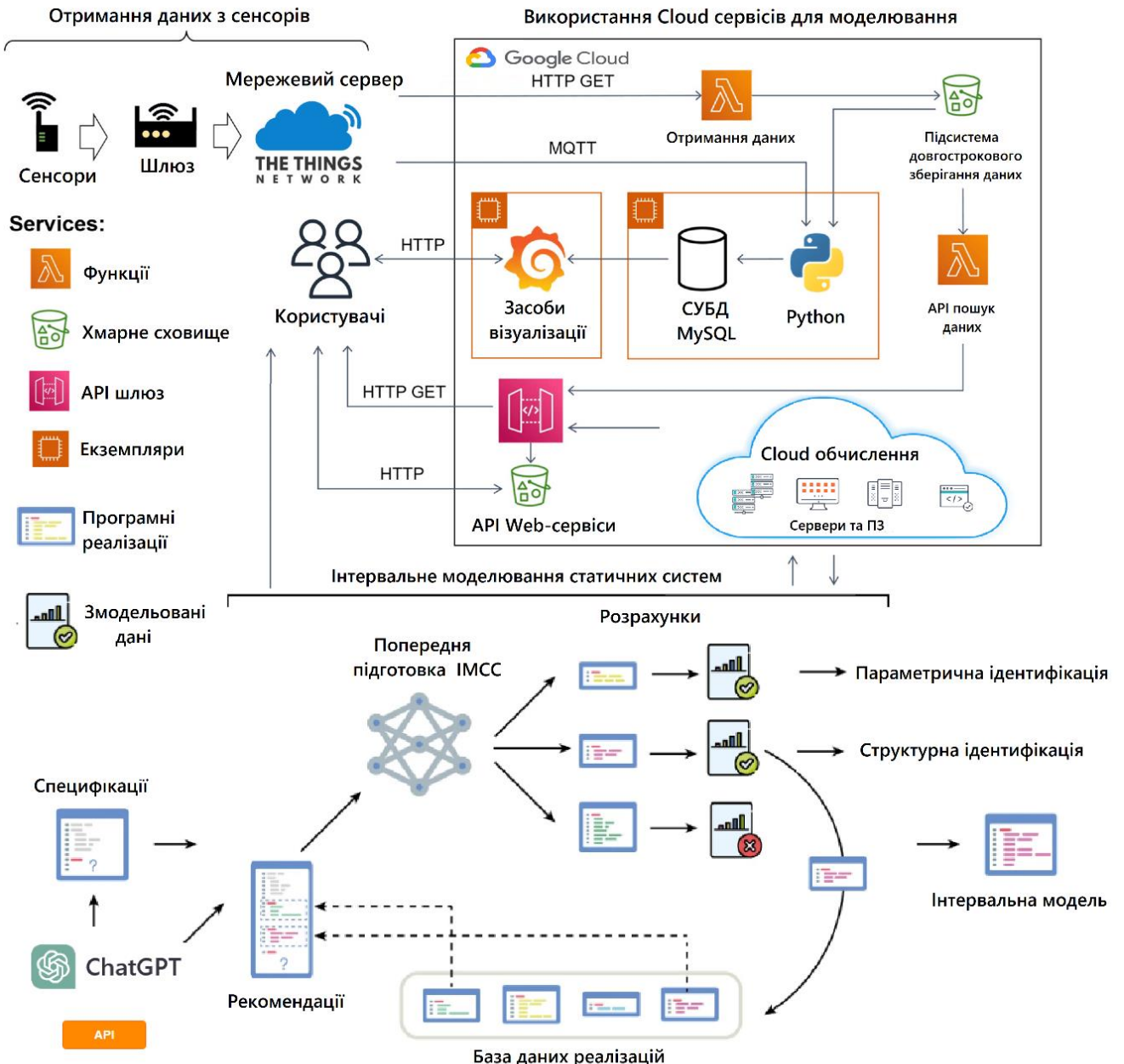


Рис. 9. Запропонована архітектура програмного забезпечення з використанням хмарних технологій

Проведено дослідження можливостей оптимізації швидкодії та ефективності програмної системи для обробки великих обсягів інтервальних даних в хмарному середовищі. В результаті таких досліджень отримано показники зниження часової складності в межах 60-70%.

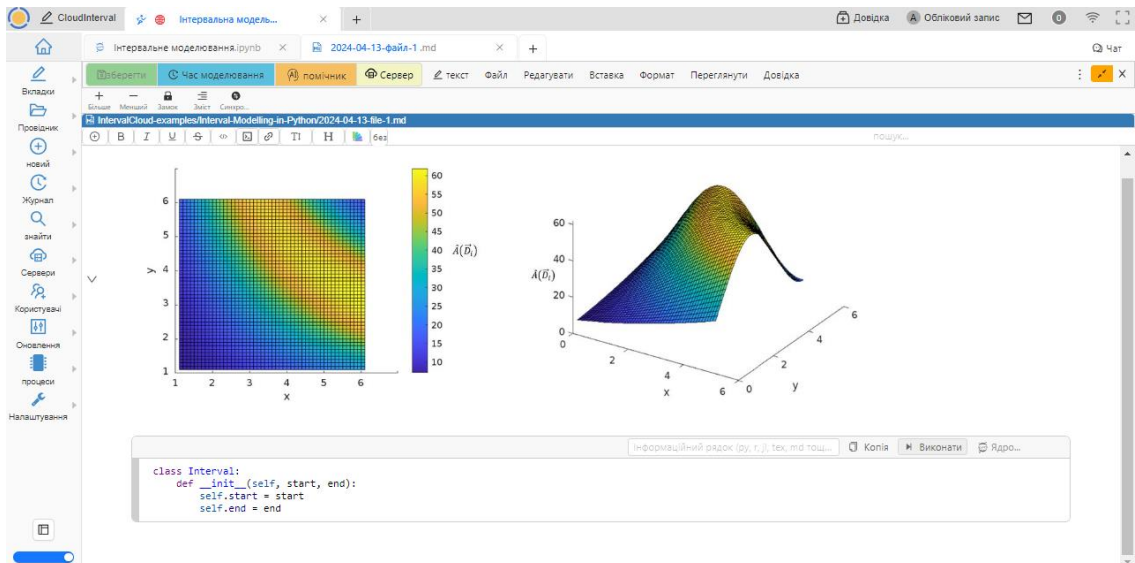


Рис. 10. Екранна форма для ілюстрації функціонування підсистеми інтервального моделювання в системі CloudInterval

В шостому розділі «Прикладні аспекти ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками» розглянуто прикладні аспекти ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в розрізі задач моделювання процесів в біогазових установках, декарбонізації об'єктів промисловості та транспортної інфраструктури. Для розв'язування вказаних задач використовувався розроблений програмний комплекс для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками та розроблені методи ідентифікації інтервальних моделей.

Було проведено дослідження процесів функціонування БГУ, які стосувалися розробки математичних моделей та їх комп'ютерної реалізації. Вперше було побудовано інтервальні моделі залежності рН середовища від чинників, які характеризують склад сировини та технологічні параметри для реакторів першого етапу виробництва біогазу з багатокомпонентного субстрату.

Виходячи із фізичних міркувань структуру нелінійного алгебричного рівняння, яке описує залежність рН середовища від обсягу та структури сировини, а також від температури та вологості середовища, було задано у такому вигляді:

$$y(X) = \beta_0 + \left(\frac{\sum_{i=1}^s \beta_i \cdot x_i}{1 + \sum_{j=1}^l \beta_j \cdot x_j} \right)^{\beta_{k+5}} + \beta_{k+1} \cdot x_{k+1}^{\beta_{k+2}} + \beta_{k+3} \cdot x_{k+2}^{\beta_{k+4}}, \quad (27)$$

де x_i – об'єм в м³ добового завантаження у відповідний період i -го виду сировини твердої фракції (суха барда, жом з цукрових буряків, солома, тощо); x_j – маса в 1000 кг добового завантаження у відповідний період j -го виду сировини

рідкої фракції (сечівка, патока тощо); x_{k+1} – вологість у %; x_{k+2} – температура в °C середовища бродіння; $k = s + l$ – кількість видів сировини, де s – кількість видів сировини твердої фракції, l – кількість видів сировини рідкої фракції.

На основі експериментальних даних за різні періоди функціонування БГУ було розроблено інтервальні моделі, які описують різні конфігурації структури та обсягів сировини для добового завантаження. Отримані математичні моделі, представлені у вигляді алгебричних нелінійних рівнянь, можуть бути застосовані для оптимізації процесів у біореакторах шляхом визначення оптимальних обсягів сировини кожного виду залежно від температури та вологості субстрату.

За проведеними експериментами у визначенні періоди функціонування БГУ було отримано такі моделі:

- за місяць серпень:

$$y(X) = 9.997 + \left(\frac{17.304 \cdot x_1 + 321.69 \cdot x_2 - 264.728 \cdot x_3}{1 - 0.116 \cdot x_4 + 251.675 \cdot x_5} \right)^{3.608} - 3176.194 \cdot x_6^{-1.493} + 215.389 \cdot x_7^{-1.32}, \quad (28)$$

де x_1 – об'єм в 1000 кг завантаженого у відповідний період жому цукрових буряків; x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період сухої барди післяспиртової; x_3 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період суміші жому та соломи; x_4 – маса в м³ завантаженої у відповідний період сечівки; x_5 – об'єм в м³ завантаженої у відповідний період барди.

- за місяць жовтень:

$$\hat{y}(X) = 2.982 + \left(\frac{-2.456 \cdot x_2 + 8.669 \cdot x_3}{1 - 102827876.087 \cdot x_1 + 9.326 \cdot x_4} \right)^{1.993} + 57.5192 \cdot x_5^{-0.536} + 3.494 \cdot x_6^{-0.864}, \quad (29)$$

де x_1 – об'єм в м³ завантаженої у відповідний період барди; x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період жому; x_3 – маса в 1000 кг завантаженого у відповідний період гною ВРХ; x_4 – маса в м³ завантаженої у відповідний період сечівки.

- за місяць листопад (ферментатор 1):

$$\hat{y}(X) = 4.986 + \left(\frac{36.114 \cdot x_2 - 151.306 \cdot x_3 + 191.582 \cdot x_4}{1 + 136.827 \cdot x_1 + 561.936 \cdot x_5} \right)^{1.887} - 180.749 \cdot x_6^{-1.517} + 124.524 \cdot x_7^{-0.968}, \quad (30)$$

- за місяць листопад (ферментатор 2):

$$\hat{y}(X) = 8.064 + \left(\frac{0.0024 \cdot x_2 - 0.0028 \cdot x_3 + 0.017 \cdot x_4}{1 - 346.0068 \cdot x_1 + 10157.327 \cdot x_5} \right)^{0.238} -$$

$$-463.569 \cdot x_6^{-79.703} - 891.169 \cdot x_7^{-29.228}. \quad (31)$$

де x_1 – об’єм в м³ завантаженої у відповідний період барди; x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період жому; x_3 – маса в 1000 кг завантаженого у відповідний період гною ВРХ; x_4 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період сухої барди післяспиртової; x_5 – маса в м³ завантаженої у відповідний період сечівки.

- за місяць грудень (ферментатор 1):

$$\hat{y}(X) = 8.852 + \left(\frac{35.613 \cdot x_2}{1 - 3369.812 \cdot x_1 - 4807.859 \cdot x_3 + 31.381 \cdot x_4} \right)^{0.6246} - 9.061 \cdot x_5^{-1.193} - 13.971 \cdot x_6^{-0.788}, \quad (32)$$

- за місяць грудень (ферментатор 2):

$$\hat{y}(X) = 7.769 + \left(\frac{9.613e - 07 \cdot x_2}{1 + 30.477 \cdot x_1 - 111.194 \cdot x_3 + 68.748 \cdot x_4} \right)^{0.153} + 8.891 \cdot x_5^{0.595} - 176.716971 \cdot x_6^{-1.729}, \quad (33)$$

де x_1 – об’єм в м³ завантаженої у відповідний період барди; x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період жому; x_3 – маса в м³ завантаженої у відповідний період сечівки; x_4 – маса в м³ завантаженої у відповідний період патоки.

Результати експериментальних досліджень для біогазової установки продемонстрували високу точність розроблених моделей (до 1%), що дозволяє застосовувати розроблені моделі для контролю рівня рН середовища в біореакторі. На рис. 11 наведено графіки модельованого значення та експериментальних даних за вказані періоди. Модельовані значення рН середовища належать інтервалам вимірних значень $[pH_i^-; pH_i^+]$ у всіх точках вимірювань, що вказує на адекватність моделей із вибраною структурою.

На підставі отриманих моделей визначено допустимі варіації значення рН в залежності від співвідношення сухої та рідкої фракції сировини для багатокомпонентного субстрату. Зокрема, встановлено, що при заданих оптимальних режимах температури (35-55%) та вологості (не менше 96%) модель забезпечує управління значенням рН середовища шляхом регулювання співвідношення складників сировини сухої та рідкої фракції в межах одиниці, що уможливорює контроль значенням рН середовища в оптимальних межах (6,5-8,5) та забезпечує стабільність процесу бродіння.

Також було проведено чисельні експерименти для дослідження удосконаленого в п.2.4. методу параметричної ідентифікації з використанням додаткового критерію зупинки у вигляді умов (13) на основі моделей залежності рН середовища у ферментаторі біореактора першого етапу біогазової установки від факторів впливу. Встановлено, що запропонований критерій в середньому зменшує

кількість ітерацій у 4,5 рази, що є пропорційним такому ж зменшенню кількості обчислень цільової функції.

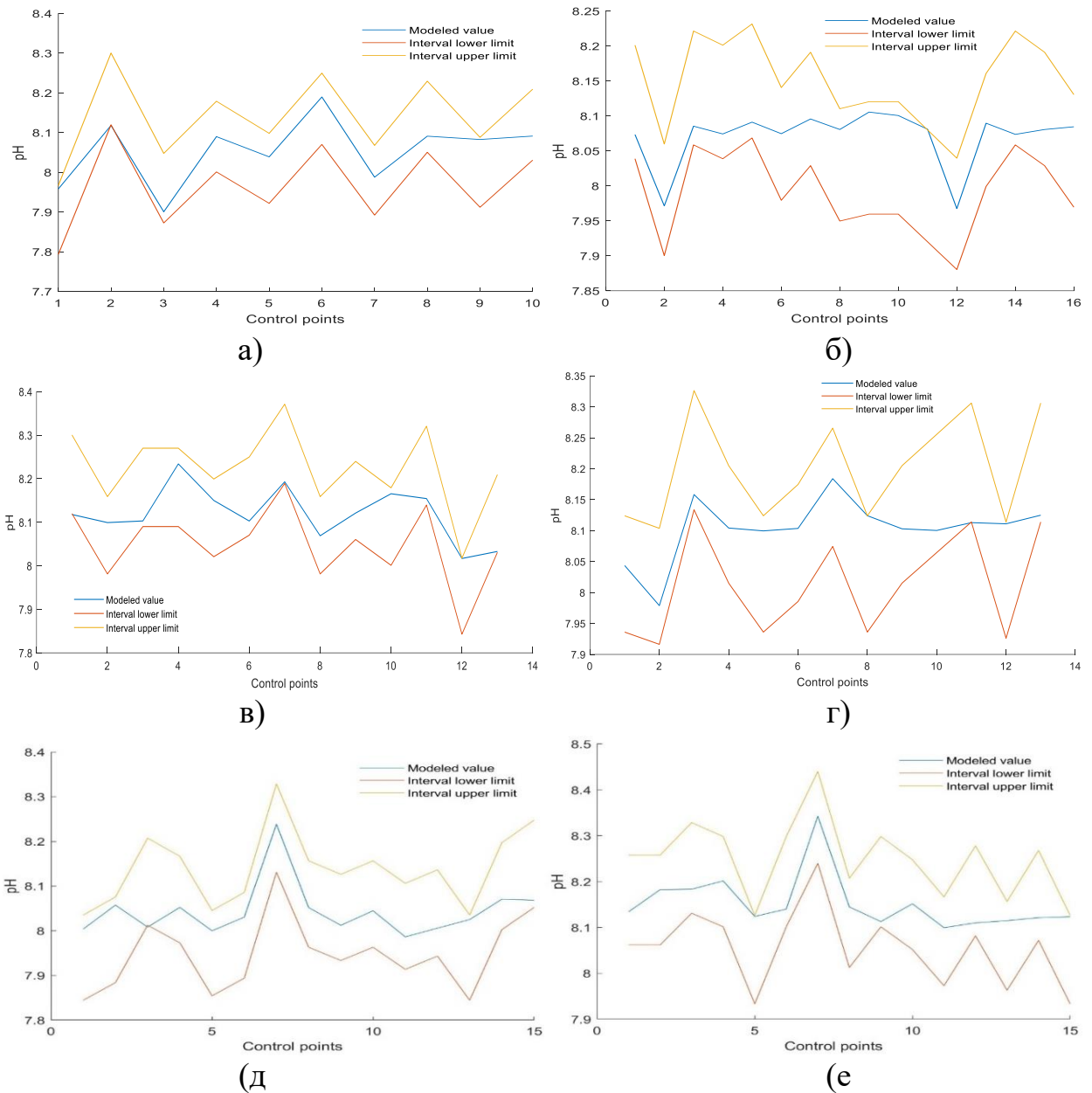


Рис. 11. Результати моделювання залежності рН середовища від обсягу та структури сировини, температури та вологості для ферментаторів (біореактора): а) – за місяць серпень, б) – за місяць жовтень, в) – за місяць листопад (ферментатор 1), г) – за місяць листопад (ферментатор 2) (д – за місяць грудень (ферментатор 1), е – за місяць грудень (ферментатор 2)

Розроблено інтервальні моделі поширення промислового забруднення від точкового джерела, які за рахунок застосування методів структурної ідентифікації на основі нарощування структурних елементів в базисі гаусових моделей уможливають спрощення процедури ідентифікації розподілу концентрацій фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта та можуть слугувати інструментарієм для підтримки рішень щодо декарбонізації таких об'єктів.

Відповідно одержано інтервальну модель:

$$y(X) = 419.8273 \cdot e^{\left[-\left(\frac{x_1 - 57.4029}{692.11}\right)^2\right]} + 5.751 \cdot 10^{16} \cdot e^{\left[-\left(\frac{x_1 + 70379.1}{12357.3}\right)^2\right]} - 874.7416 \cdot e^{\left[-\left(\frac{x_1 - 66.9348}{176.0167}\right)^2\right]}, \quad (34)$$

де x_1 – відстань від джерела забруднення, м.

Відповідно отриманий розподіл концентрацій фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта на основі моделі може слугувати інструментом для підтримки рішень щодо забезпечення екологічної безпеки в місцях розташування таких об'єктів (рис. 12).

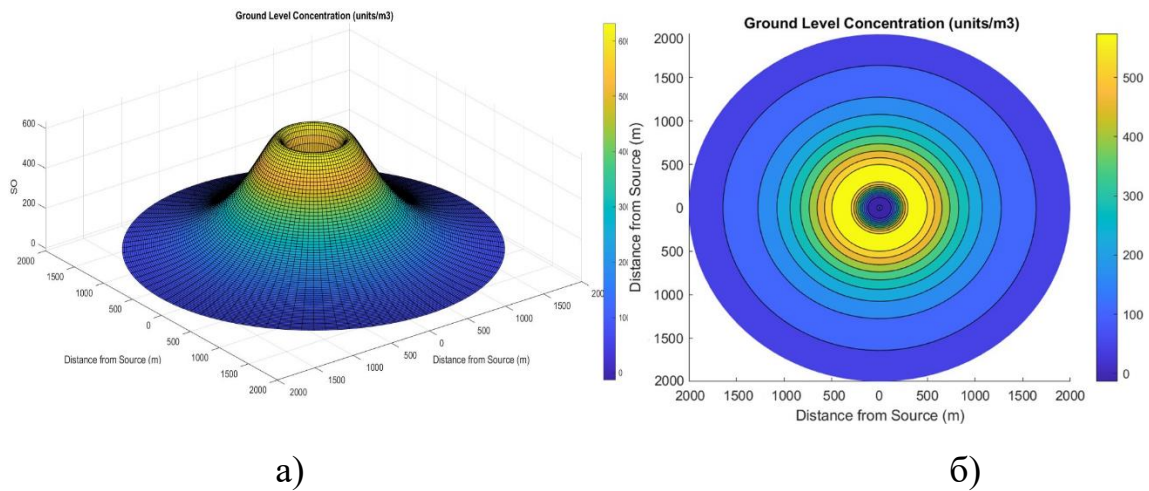


Рис. 12. Розподіл модельованої концентрації фонового рівня промислового забруднення в околі джерела забруднення

Також розроблено інтервальні моделі обсягів відновлення транспортної інфраструктури, які встановлюють причинно-наслідкові зв'язки між обсягом відновленої транспортної інфраструктури та використанням низьковуглецевих матеріальних ресурсів, що уможливорює ефективне управління декарбонізацією транспортної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

Основні результати теоретичних та практичних досліджень представленої дисертаційної роботи:

1. Проаналізовано задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. Сформульовано задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, як задачу розв'язування інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Встановлено, що у випадку знаходження розв'язку цієї системи отримують оптимізаційну задачу з нелінійною дискретною цільовою функцією, що призводить до підвищення обчислювальної

складності методів її розв'язування. Сформульовано задачу структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей статичних систем у вигляді оптимізаційної задачі на дискретній множині структурних елементів і встановлено, що обчислювальна схема її розв'язування ґрунтується на багаторазовому розв'язуванні задач параметричної ідентифікації для фіксованого набору моделей-претендентів. Досліджено, що ця задача є NP-складною і для її розв'язування необхідно використовувати методи глобальної оптимізації. Обґрунтовано, що у випадку ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, на противагу метаевристичних, перспективним напрямком є використання гібридних методів, які поєднують ефективні стратегії глобального пошуку та методи локальної оптимізації, зокрема, метод множинного старту оптимізації, який використовує евристики дослідження глобального простору пошуку та ефективні методи локальної оптимізації. Обґрунтовано використання онтологічних описів для формалізації теоретичних засад ідентифікації інтервальних моделей та досвіду застосування методів оптимізації. Встановлено, що використання існуючих онтологічних описів обмежено традиційними кількісними методами аналізу даних, такими як регресійний аналіз, або слабкою інтеперабельністю з точки зору інтеграції стандартних методів та засобів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем.

2. При розв'язуванні задач параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками запропоновано та обґрунтовано представлення цієї задачі у вигляді оптимізаційної задачі з цільовою функцією, яка мінімізує квадратичне відхилення між значеннями модельованої характеристики статичного системи та значеннями, вибраними на експериментальних числових інтервалах цієї характеристики. Такий підхід, з одного боку, призводить до зростання розмірності оптимізаційної задачі за рахунок введення додаткових змінних у цільову функцію, які забезпечують узгодженість результатів моделювання та експерименту, проте, з іншого боку, за рахунок диференційованості цільової функції уможливує застосування гібридних методів оптимізації на основі використання алгоритмів з квадратичною збіжністю.

3. Обґрунтовано та розроблено метод параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі з нелінійною цільовою функцією та гібридній стратегії глобального пошуку із використанням квазі-Ньютонівських методів (алгоритм Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, BFGS), що у сукупності забезпечує гарантовану квадратичну збіжність та зниження обчислювальної складності до квадратичної. Удосконалено систему критеріїв зупинки процедури оптимізації за рахунок використання додаткового критерію зупинки на поточній ітерації оптимізаційної процедури на основі перевірки адекватності моделі, що забезпечило зниження часової складності цієї процедури. На тестових експериментах продемонстровано зменшення кількості ітерацій у 4,5 рази, що є співрозмірним такому ж зменшенню кількості обчислень цільової функції.

4. Обґрунтовано та розроблено метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на

правилах нарощування, редукції та селекції структурних елементів інтервальних моделей-претендентів, що, в свою чергу, базуються на аналізі градієнта цільової функції відносно параметрів моделей та часткової похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого структурного елемента, що забезпечило напрямлений вибір елементів і відповідно зниження кількості ітерацій обчислюваних процедур структурної ідентифікації. 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, що визначає кількість генерованої електроенергії МГЕС в залежності від характеристик гідротехнічних споруд.

5. Запропоновано та реалізовано новий комплексний підхід до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на поєднанні знань у вигляді онтологічного опису предметної області теоретичних засад ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів глобальної та локальної оптимізації, що у сукупності забезпечило зниження часової складності розв'язування задач ідентифікації інтервальних моделей статичних систем. В частині онтологічного опису вирішено завдання структурування знань про характеристики задач ідентифікації моделей статичних систем; методи оптимізації; критерії вибору методу залежно від характеристик задачі.

6. Для реалізації комплексного підходу ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками реалізовано метод моделювання, який ґрунтується на знання-орієнтованому підході до вибору методів оптимізації, зокрема глобального пошуку на основі градієнтних методів та методів ройового інтелекту (рою частинок, поведінкових моделей бджолиної колонії), що у сукупності забезпечило зниження часової складності ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Встановлено, що запропонований метод на основі формалізації процесу вибору ефективного методу оптимізації на основі таких характеристик задачі ідентифікації, як розмірність та складність цільової функції, забезпечує більш ефективне моделювання та ідентифікацію інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в порівнянні з існуючими.

7. Запропоновано та обґрунтовано архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. Особливостями запропонованої архітектури є імплементація підсистеми інтервального моделювання в сервісно-орієнтоване середовище із врахуванням оптимізації обчислювальних схем за допомогою використання платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, інтелектуалізованої консультативно-діагностичної підсистеми на базі штучного інтелекту, безкоштовних програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API на всіх етапах математичного моделювання, що у сукупності спрощує процес моделювання та забезпечує наближеність користувача до розроблених сервісів. На основі

запропонованої архітектури реалізовано програмну систему для математичного моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій.

8. Розглянуто прикладні аспекти ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в розрізі задач моделювання процесів в біогазових установках, декарбонізації об'єктів промисловості та транспортної інфраструктури.

8.1 Побудовано інтервальні моделі залежності рН середовища від чинників, які характеризують склад сировини та технологічні параметри для реакторів виробництва біогазу з багатокомпонентного субстрату. На підставі отриманих моделей визначено допустимі варіації значення рН в залежності від співвідношення сухої та рідкої фракції сировини для багатокомпонентного субстрату. Зокрема, встановлено, що при заданих оптимальних режимах температури (35-55%) та вологості (не менше 96%) модель забезпечує управління значенням рН середовища шляхом регулювання співвідношення складників сировини сухої та рідкої фракції в межах одиниці, що уможливорює контроль значенням рН середовища в оптимальних межах (6,5-8,5) та забезпечує стабільність процесу бродіння;

8.2 Побудовано інтервальну модель поширення промислового забруднення від точкового джерела, яка з гарантованою точністю відтворює властивості фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта та слугує інструментарієм для підтримки рішень щодо декарбонізації таких об'єктів;

8.3 Побудовано інтервальну модель обсягів відновлення транспортної інфраструктури, яка встановлює причинно-наслідкові зв'язки між обсягом відновленої транспортної інфраструктури та використанням низьковуглецевих матеріальних ресурсів, що уможливорює ефективне управління декарбонізацією транспортної інфраструктури.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці які відображають основні наукові результати дисертації:

Статті у журналах, що входять до наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

1. Dyvak, N.P., Manzhula, V.I. The structural identification of interval models of static systems. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2008 40(4). P. 49–61. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v40.i4.40>. (Scopus)

2. Manzhula V., Dyvak M., Zabchuk V. The Improved Method for Identifying Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems. *International Journal of Computing*. 2024. 23 (1). P. 19-25. <https://doi.org/10.47839/ijc.23.1.3431>. (Scopus)

3. Borysiak O., Skowron Ł., Brych V., Manzhula V., Dluhopolskyi O., Sak-Skowron M., Wołowiec T. Towards Climate Management of District Heating Enterprises' Innovative Resources. *Energies* 2022, 15 (21), 7841. <https://doi.org/10.3390/en15217841>. (SJR Q1, Scopus)

4. Dyvak M., Spivak I., Melnyk A., Manzhula V., Dyvak T., Rot, A., Hernes, M. Modeling Based on the Analysis of Interval Data of Atmospheric Air Pollution Processes with Nitrogen Dioxide due to the Spread of Vehicle Exhaust Gases. *Sustainability (Switzerland)*. 2023. 15 (3). P. 2163. <https://doi.org/10.3390/su15032163>. (SJR Q2, Scopus)

5. Mykytyuk P., Brych V., Manzhula V., Borysiak O., Sachenko A, Banasik A., Kempa W.M., Mykytyuk Yu., Czupryna-Nowak A., Lebid I. Efficient Management of Material Resources in Low-Carbon Construction. *Energies*. 2024. 17(3). С. 575. <https://doi.org/10.3390/en17030575>. (SJR Q1, Scopus)

6. Dyvak M., Manzhula V., Melnyk A., Rusyn B., Spivak I. Modeling the Efficiency of Biogas Plants by Using an Interval Data Analysis Method. *Energies*. 2024. 17 (14). P. 3537. <https://doi.org/10.3390/en17143537>. (SJR Q2, Scopus)

Статті у наукових фахових виданнях України:

7. Дивак М.П., Манжула В.І. Франко Ю.П. Інтервальна модель для прогнозування потужності малої гідро-електростанції «Топольки». *Енергетика та електрифікація*. 2008. № 11(303). С. 21-29.

8. Дивак М., Манжула В., Войтюк І. Структурна ідентифікація інтервальних різницевих операторів. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*. 2010. Том 15, № 4. С. 154-160. [Електронний ресурс].

9. Дивак М.П., Манжула В.І., Падлецька Н.І. Методи, засоби та інтервальна модель для задачі візуалізації поворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2011. Том 22. Вип. 2. С. 102-109.

10. Дивак М.П., Пукас А.В., Дивак Т.М., Манжула В.І. Макромодель розподілу вологості в листі гіпсокартону в процесі його сушіння на основі інтервального оператора різниці. *Керуючі системи та машини*. 2013. № 2. С. 72-78.

11. Дивак М.П., Крепич С.Я., Дивак Т.М., Манжула В.І. Моделювання та забезпечення функціональної придатності технологічного обладнання лінії по виготовленню гіпсокартону в умовах змінних характеристик сировини. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2015. №3(52). С. 186-192.

12. Дивак М.П., Манжула В.І., Мельник А.М., Пукас А.В. Метод структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей статичних об'єктів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. Том 54, № 2, С. 103-114. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-103-114>

13. Мельник А.М., Дивак М.П., Манжула В.І. Моделювання динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту на основі поєднання методів інтервального аналізу та онтологічного підходу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2022 №. 2. С. 14-23. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-2>

14. Дивак М.П., Манжула В.І., Мельник А.М., Тимчишин В.С. Система моніторингу забруднення повітря автотранспортом на базі автономного аеромобільного вимірювального комплексу. *Оптико-електронні інформаційно-*

енергетичні технології. 2022. 42, вип. 2. С. 73-83. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83>

15. Манжула В.І., Дивак М.П. Інтервальна нелінійна модель розподілу амплітуди інформаційного сигналу в задачі виявлення та локалізації поворотного гортанного нерва в процесі хірургічних операцій. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2022. № 43, вип.1. С. 65-75. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-43-1-65-75>

16. Dyvak M., Manzhula V., Dyvak T. Identification of Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems using Multidimensional Optimization. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2022. Vol. 12, No. 2. P. 5-13. DOI:10.23939/jcpee2022.02.005

17. Манжула В.І., Забчук В.В. Архітектура програмного забезпечення для моделювання процесів у біогазових установках. *Наукові Праці ВНТУ*. 2024. вип. 1. С. 1-10. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-1-19-28>

18. Дивак М., Манжула В., Мельник А., Юшко А. Архітектура програмного забезпечення для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. Вип.1. С. 125-139. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-15>

19. Манжула В.І., Дивак М.П., Мельник А.М. Метод структурної ідентифікації нелінійних моделей статичних систем на основі інтервальних даних. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2024. Вип.59, №1. С. 94-104. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-103-114>

20. Манжула В., Дивак М. Моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками із застосуванням онтологічного підходу. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2024. №2. С. 306-324. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-36>

Монографії у співавторстві:

21. Дивак М.П., Мельник А.М., Манжула В.І., Співак І.Я., Порплиця Н.П. Знання-орієнтовані системи для ідентифікації інтервальних математичних моделей складних динамічних та статичних об'єктів: монографія. Тернопіль: ВПЦ “Університетська думка”. 2024. 294 с.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

22. Dyvak M., Manzhula V., Trufanova Yu. Interval Non-linear Model of Information Signal Characteristics Distribution for Detection of Recurrent Laryngeal Nerve during Thyroid Surgery. *CEUR Workshop Proceedings: 5th International Conference on Informatics and Data-Driven Medicine, IDDM 2022, Lyon, France, November 18–20, 2022, Том 3302, pp. 99-107 (Scopus)*

23. Dyvak M., Manzhula V., Pukas A., Dyvak T. and Manzhula V.V. Application of Global Optimization Toolbox for Identification of Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems, *Proceedings: 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland, 2023, pp. 60-63, doi: 10.1109/CADSM58174.2023.10076513. (Scopus)*

24. Dyvak M., Melnyk A., Porplytsya N., Manzhula V., Mushak A. and Semaniuk V. Identification of Interval Discrete Models based on the Bee Swarm Optimization Algorithm with Adaptive Tuning of the Probability of Selecting Structural Elements, *Proceedings: 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Wrocław, Poland, 2023, pp. 13-18, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275408. (Scopus)

25. Dyvak M., Manzhula V. and Dyvak T. The Method of Structural Identification of Interval Nonlinear Models with the Selection of Structural Elements based on the Gradient of the Objective Function, *Proceedings: 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Wrocław, Poland, 2023, pp. 52-57, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275642. (Scopus)

26. Tymchyshyn V., Tymchyshyn B., Melnyk A., Manzhula V., Faifura V. and Romanets I., The System Architecture of the Software for Modeling Harmful Emissions in Soil, *Proceedings: 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Wrocław, Poland, 2023, pp. 58-62, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275416. (Scopus)

27. Borysiak O., Manzhula V., Bila Y., Petryshyn N., Vovchuk D. Verifying the Economic Potential of Low-Carbon Energy Using Artificial Intelligence in Transport. *CEUR Workshop Proceedings: 1st International Workshop of Young Scientists on Artificial Intelligence for Sustainable Development, AISD*, 2024, 3716, pp. 19-25. (Scopus)

28. Dyvak M., Pukas A., Manzhula V., Papa O., Akimjak A. and Maslyiak B., The Task of Structural Identification the Interval Models of Static Objects with Multiple Parameters, *Proceedings: 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 112-115, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913146. (Scopus)

29. Brych V., Manzhula V., Halysh N., Kalinichuk N., Reznik N. and Hrynychak I., Modeling the Dynamics of Living Standards Based on Factors of the Remuneration System, *Proceedings: 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2021, pp. 420-423, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548617. (Scopus)

30. Brych V., Manzhula V., Brych B., Halysh N., Ursakii Y. and Homotiuk V. Estimating the Efficiency of the Energy Service Market Functioning in Ukraine, *Proceedings: 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2020, pp. 670-673, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208858. (Scopus)

31. Brych V., Manzhula V., Borysiak O., Liakhovych G., Halysh N. and Tolubyak V. Communication Model of Energy Service Market Participants in the Context of Cyclic Management City Infrastructure, *Proceedings: 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Deggendorf, Germany, 2020, pp. 678-681, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208902. (Scopus)

32. Brych V., Manzhula V., Halysh N., Zhekalo G., Liakhovych G. and Vakun O. Strategy of Effective Pricing Policy of Biofuel Enterprises, *Proceedings: 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*,

Deggendorf, Germany, 2020, pp. 674-677, doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208815. (Scopus)

33. Manzhula V., Semanyuk V. and Rozhelyuk V. Evaluation Method of Economic Benefit Taking Into Account Additional Data in Decision-Making Process, *Proceedings: 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2019, pp. 413-416, doi: 10.1109/ACITT.2019.8779982. (Scopus)

34. Dyvak M., Darmorost I., Shevchuk R., Manzhula V. and Kasatkina N. Correlation analysis traffic intensity of the motor vehicles and the air pollution by their harmful emissions, *Proceedings: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 855-858, doi: 10.1109/TCSET.2018.8336331. (Scopus)

35. Dyvak M., Oliynyk I., Manzhula V. Design of the saturated interval experiment for the task of recurrent laryngeal nerve identification. *CEUR Workshop Proceedings: Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2018*, June 1-3, 2018, Ceske Budejovice, Czech Republic, 2300, pp 46-49. (Scopus)

36. Dyvak M., Oliynyk I., Manzhula V. and Shevchuk R. Stochastic method forming the optimal “saturated block” in the localization task of solutions the interval system of linear algebraic equations, *Proceedings: 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, Ukraine, 2017, pp. 367-371, doi: 10.1109/CADSM.2017.7916152. (Scopus)

37. Brushnicka A., Pukas A., Shpintal M. and Manzhula V. Formalization the task of increasing the websites attendance based on management the dynamics of their characteristics, *Proceedings: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, Ukraine, 2015, pp. 263-265, doi: 10.1109/CADSM.2015.7230852. (Scopus)

38. Shtunder O., Manzhula V., Kasatkina N. Applying the Difference Operators for Surfaces Approximation with Given Accuracy in Nodes, *Proceedings of the XI International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering TCSET'2012*, Lviv-Slavske, Ukraine, 2012, P.436. (Scopus)

39. Shtunder O., Dyvak M., Manzhula V., Shevchuk R. The method of construction the approximating function with multiple arguments with minimum number of parameters and with given accuracy, *Proceedings of the 2th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Lviv, UKRaine, 2013, pp. 329-331. (Scopus)

40. Pukas A., Dyvak M., Oliynyk I., Manzhula V. Interval model for description the small hydroelectric power station and method of its construction, *Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of abstracts of the 15th International Conference CPEE'2014*, Terchova Vratna Dolina, Slovak Republic, September 09-12, 2014, P.38. (Scopus)

41. Манжула В.І., Рижий О.В., Кирильчук А.Б. Математичне моделювання характеристик якості гіпсокартону на стадіях його виробництва, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, ACIT'2016*, Тернопіль: THEU, 2016, С. 23-25.

42. Дивак М., Войтюк І., Манжула В. Критерії оптимальності структури інтервального різницевого оператора, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції*, Бучач-Скоморохи, 2009, Том 1, №5, С. 220-224.

43. Манжула В.І. Петровський І.М. Програмна система для реалізації задач параметричної ідентифікації інтервальних моделей, *Матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції "Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання"*, Бучач-Скоморохи, 2009, Том 1, №5, С. 228-233.

44. Манжула В.І., Назар А.М. Програмна система для структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції*, Бучач-Скоморохи, 2009, Том 1, №5, С. 234-238.

45. Дивак М., Войтюк І., Манжула В. Критерії структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції*, Бучач-Східниця, 2010, Том. 1. №6, С. 280-283.

46. Паньків М.Р., Манжула В.І., Цільо І.В. Моделювання процесу газоспоживання, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції*, Бучач-Східниця, 2010, Том. 1, №6, С. 288-291.

47. Дивак М.П. Падлецька Н.І., Манжула В.І. Застосування методів гарантованого інтервального оцінювання параметрів макромоделей статичних систем для задачі візуалізації поворотного гортанного нерва, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції (ПНМК-2011)*, Бучач, 2011, №7, С. 340-343.

48. Манжула В.І., Франко Ю.П. Оцінка впливу факторів на ефективність функціонування малої ГЕС методами інтервального аналізу, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції (ПНМК-2011)*, Бучач, 2011, №7, С. 349-351.

49. Дивак М.П., Падлецька Н.І., Манжула В.І. Інтервальна модель для візуалізації поворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали I Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, АСІТ'2011*, Тернопіль: Економічна думка, 2011, С. 10-11.

50. Манжула В.І., Мачула В.Я. Генетичний алгоритм параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали II Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, АСІТ'2012*, Тернопіль: Економічна думка, 2012, С. 33-35.

51. Манжула В.І., Пукас А.В., Гаврилюк А.О. Соціальна мережа для обміну GPS-маршрутами, *Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції,*

енергетики, економіки, моделювання та управління: матеріали проблемно-наукової міжгалузевої конференції, ПНМК 2012, Бучач, 2012, С.285-288.

52. Мачула В.Я., Манжула В.І. ПЗ для інтервальної локалізації параметрів моделей із використанням елементів символічної математики, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, АСІТ'2013, Тернопіль: ТНЕУ, 2013, С.43-44.

53. Манжула В.І., Поляруш О.В. Аналіз ефективності алгоритму інтервальної локалізації параметрів моделі на основі дробових обчислень, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, АСІТ'2013, Тернопіль: ТНЕУ, 2013, С. 40-41.

54. Вербова Х.М., Манжула В.І. Програмний інтелектуальний агент для бази даних поштового відділення, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, АСІТ'2013, Тернопіль: ТНЕУ, 2013, С. 205-206.

55. Базурін О.С., Манжула В.І., Костів Ю.В., Методи машинного навчання в інженерії програмного забезпечення, *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів, СІТ'2019, Тернопіль, 29 листопада 2019, С. 4-5.

56. Заревений О.Р., Манжула В.І. Метод та програмне забезпечення для автоматизації сортування письмової кореспонденції, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів, АСІТ'2013, Тернопіль: ТНЕУ, 2013, С. 170-171.

57. Манжула В.І., Вишньовський І.Є. Модифікований метод розв'язку ІСЛАР на основі задач ЛП, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали III Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів АСІТ'2013, Тернопіль: ТНЕУ, 2013, С.39.

58. Манжула В.І., Ухіна С.Б. Прототип конструктора складних типів на основі Java FX, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених та студентів, АСІТ'2014, Тернопіль: ТНЕУ, 2014, С. 158.

59. Манжула В.І., Стефанишин Х.І., Яковів В.І. Математичне моделювання характеристик тренувального навантаження легкоатлетів, *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2019, Тернопіль, 29 листопада 2019, С. 15-17.

60. Кіцула В.І., Терлецький А.І., Манжула В.І. Аналіз підходів до оцінювання якості програмних продуктів, *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених та студентів, АСІТ'2015, Тернопіль: ТНЕУ, 2015, С. 136-137.

61. Кот О.О., Манжула В.І. Інтелектуалізована бібліотека на основі стандарту WCAG (Web Content Accessibility Guidelines), *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи-семінару молодих вчених і студентів СІТ'2023, 2023, Тернопіль: ЗУНУ, С. 45-47.