

ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

МАНЖУЛА ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ

УДК 519.876.5: 004.942

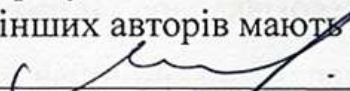
ДИСЕРТАЦІЯ

**Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей
статичних систем з нелінійними характеристиками**

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

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ В.І. Манжула
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий консультант –
Дивак Микола Петрович,
доктор технічних наук,
професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



/Дубчак Л.О./

Тернопіль – 2024

АНОТАЦІЯ

Манжула В.І. Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи, Спеціалізована вчена рада Д 58.082.02 Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України, Тернопіль, 2024.

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Міністерства освіти і науки України.

У вступі обґрунтована актуальність наукової проблеми, сформульовані мета та задачі досліджень, визначені об'єкт та предмет досліджень, відображені основні наукові результати, їх практичне значення та інші кваліфікаційні параметри, згідно чинного законодавства.

У першому розділі 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 одного 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 інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, як оптимізаційну задачу на дискретній множині структурних елементів із багаторазовим розв'язуванням оптимізаційної задачі параметричної ідентифікації на основі інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь з нелінійною, дискретною цільовою функцією. Досліджено, що задача

структурної ідентифікації є NP-складною і для її розв'язування необхідно використовувати методи глобальної оптимізації. У спрощеній та доступній формі проведено аналіз методів глобальної оптимізації для розв'язування задач параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Обґрунтовано використання онтологічних описів для формалізації теоретичних засад ідентифікації інтервальних моделей та досвіду застосування методів оптимізації. Встановлено, що використання існуючих онтологічних описів обмежується традиційними кількісними методами аналізу даних, такими як регресійний аналіз, або слабкою інтероперабельністю з точки зору інтеграції стандартних методів та засобів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем. На основі проведеного аналізу сформульовано перелік основних завдань для подальших досліджень, які у випадку ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками можуть базуватися на використанні гібридних методів, що поєднують стратегії глобального пошуку та ефективні методи локальної оптимізації.

Другий розділ присвячений методам розв'язування задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. При розв'язуванні задачі 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 статичної 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 уможливорює застосування гібридних методів оптимізації із використанням алгоритмів з квадратичною збіжністю.

Обґрунтовано та розроблено метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі з диференційованою цільовою функцією та гібридній стратегії глобального пошуку із використанням квазі-Ньютонівських методів (метод 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 в середньому у 4,5 рази, що є співрозмірним такому ж зменшенню кількості обчислень цільової функції.

В центрі уваги **третього розділу** знаходилися методи структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які базуються на аналізі градієнта цільової функції оптимізаційної задачі пошуку структури моделі. Обґрунтовано та розроблено метод структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який ґрунтується на правилах нарощування, редукації та селекції структурних елементів інтервальних моделей-претендентів, що в свою чергу базуються на аналізі градієнта цільової функції відносно параметрів моделей та частинної похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого структурного елемента, що забезпечило напрямлений вибір елементів і відповідно зниження кількості ітерацій 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 для нелінійної характеристики, яка визначає кількість генерованої

електроенергії МГЕС в залежності від характеристик гідротехнічних споруд.

В четвертому розділі в межах загальної постановки задачі розглянуто питання реалізації нового комплексного підходу до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. 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 ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів, що поєднують стратегії глобальної та локальної оптимізації, що у сукупності забезпечило зниження часової складності розв'язування задач ідентифікації інтервальних моделей статичних систем. В частині онтологічного опису знань вирішено завдання структурування знань про характеристики задач ідентифікації моделей статичних систем; методи оптимізації; критерії вибору методу залежно від характеристик задачі.

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 бджолоїної колонії), на основі онтології, що у сукупності забезпечило зниження часової складності ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Встановлено, що запропонований метод на основі формалізації процесу ідентифікації шляхом вибору ефективного методу оптимізації на основі характеристик задачі ідентифікації забезпечує більш ефективно моделювання та ідентифікацію інтервальних нелінійних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в порівнянні з існуючими.

У п'ятому розділі, що завершує теоретичну частину дисертаційної роботи, розглянуто питання проектування та реалізації програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. В

основу реалізації покладено забезпечення наближеності до користувача та зручності у застосуванні методів математичного моделювання на основі інтервальних даних, що вимагає розробки спеціалізованих програмних середовищ, які інтегрують спектр математичних методів в єдину концепцію побудови інструментальних засобів, зрозумілу для користувачів-практиків.

Запропоновано та обґрунтовано архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних. На відміну від існуючих, 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 забезпечило спрощення процесу моделювання та забезпечило наближеність користувача до розроблених сервісів. На базі запропонованої архітектури реалізовано програмну систему для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій.

Основні результати дисертаційної роботи, що присвячені практичним аспектам ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, представлені в розрізі задач моделювання процесів в біогазових установках, декарбонізація об'єктів промисловості та транспортної інфраструктури у **шостому розділі** роботи. Виконано аналіз процесів в біогазових установках при виробництві біогазу. Встановлено, що однією з основних характеристик реакторів біогазової установки при виробництві біогазу є показник рН середовища зброджуваного субстрату. В процесі досліджень встановлено, що цей показник залежить від обсягу та структури сировини, а також від температури у біореакторі та вологості субстрату. На основі запропонованого комплексного підходу до ідентифікації інтервальних

моделей статичних систем з нелінійними характеристиками розроблено інтервальні моделі процесів у біогазових установках, які описують залежність рН середовища від складу завантаженої у біореактор сировини та технологічних параметрів процесу виробництва біогазу з багатокомпонентного субстрату, що уможливило визначення допустимих варіацій значень рН середовища в залежності від співвідношення сухої та рідкої фракції сировини з метою забезпечення стабільності процесу бродіння в біореакторах першого етапу. Заключна частина шостого розділу присвячена побудові інтервальних моделей у сфері декарбонізації об'єктів промисловості та транспортної інфраструктури. Побудовано моделі поширення промислового забруднення від точкового джерела, які уможливають спрощення процедури побудови розподілу концентрацій фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта та слугують інструментарієм для підтримки рішень щодо декарбонізації таких об'єктів. Отримано інтервальну модель залежності обсягів відновлення транспортної інфраструктури, яка встановлюють причинно-наслідкові зв'язки між обсягом відновленої транспортної інфраструктури та використанням низьковуглецевих матеріальних ресурсів, що уможливорює ефективне управління декарбонізацією транспортної інфраструктури.

У **висновках** сформульовано основні результати проведених досліджень.

У **додатках** містяться фрагменти онтологічних описів, акти впровадження результатів роботи та список публікацій здобувача.

Ключові слова: методи структурної ідентифікації, методи параметричної ідентифікації, інтервальна модель, статична система з нелінійними характеристиками, аналіз інтервальних даних, інтервальна система нелінійних алгебраїчних рівнянь, оптимізаційна задача, цільова функція, гібридні методи оптимізації, онтологічний опис.

Перелік опублікованих праць за темою дисертаційної роботи
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. DOI: 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>. (SJQ1, 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>. (SJQ2, 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). C. 575. <https://doi.org/10.3390/en17030575>. (SJQ1, 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>. (SJQ2, 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.*

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, АСІТ'2016, Тернопіль: ТНЕУ, 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 І 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.

ABSTRACT

Manzhula V.I. Methods and Software Tools for Identification of Interval Models of Static Systems with Nonlinear Characteristics. – Qualifying research paper as a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Engineering in the specialty 01.05.02 – Mathematical Modeling and Computational Methods, Specialized Academic Council D 58.082.02 of the West Ukrainian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil, 2024.

The research was conducted at the Department of Computer Science at the West Ukrainian National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The **introduction** substantiates the relevance of the scientific problem, formulates the purpose and tasks of the research, defines the object and subject of the research, and presents the main scientific results, their practical significance, and other qualification parameters according to current legislation.

Chapter 1 was to analyze the problems of identifying models of static systems with nonlinear characteristics based on interval data analysis. The problem of parametric identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics is formulated as the problem of solving an interval system of nonlinear algebraic equations. It was established that in the case of finding one solution of this system, an optimization problem with a nonlinear, discrete objective function is obtained, which leads to an increase in the computational complexity of its solution methods. The problem of structural identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics is formulated as an optimization problem on a discrete set of structural elements with multiple solutions of the optimization problem of parametric identification based on an interval system of nonlinear algebraic equations with a nonlinear, discrete objective function, which leads to an increase in the computational complexity of the methods its solution. It has been studied that the problem of structural identification is NP-complex and for its solution, it is necessary to use global optimization methods. In a simplified and

accessible form, the analysis of global optimization methods for solving the problems of parametric identification of models of static systems with nonlinear characteristics is carried out. Based on the analysis, a list of main tasks for further research is formulated, which in case of identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics can be based on using the hybrid methods that combine global search strategies and effective local optimization methods.

Chapter 2 is devoted to methods of solving the problem of parametric identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics. When solving problems of parametric identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics, the presentation of this problem in the form of an optimization problem with an objective function that minimizes the root mean square deviation between the values of the modeled characteristic of the static system and the values selected on the experimental numerical intervals of this characteristic is proposed and substantiated. This approach, on the one hand, leads to an increase in the dimension of the optimization problem due to the introduction of additional variables into the objective function, which ensures the consistency of the results of simulation and experiment, but, on the other hand, due to the differentiation of the objective function, it enables the application of hybrid optimization methods using algorithms with quadratic convergence.

The method of parametric identification of models of static systems with nonlinear characteristics is substantiated and developed, which, unlike the existing ones, is based on solving an optimization problem with a differentiated objective function and a hybrid global search strategy using quasi-Newtonian methods (the Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno method, BFGS), which collectively provides guaranteed quadratic convergence and reduction of computational complexity to quadratic. The system of stopping criteria of the optimization procedure has been improved by using an additional stopping criterion at the current iteration of the optimization procedure based on checking the adequacy of the model, which has ensured a reduction in the computational complexity of this procedure. The test experiments showed a decrease in the number of iterations by an average of 4.5

times, which is commensurate with the same decrease in the number of objective function calculations.

The focus of **Chapter 3** was on methods of structural identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics, which are based on the analysis of the gradient of the objective function of the optimization task of finding the structure of the model. The method of structural identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics is substantiated and developed, which is based on the rules of building up, reduction, and selection of structural elements of applicant interval models, which in turn are based on the analysis of the gradient of the objective function with respect to the parameters of the models and the partial derivative with respect to the parameters of the model for of a reduced or added structural element, which ensured a directed selection of elements and, accordingly, a reduction in the number of iterations of the calculated procedures of the structural identification. The convergence of the proposed method was confirmed on test examples. An algorithm for structural identification of interval models of static systems with non-linear characteristics was developed, which was tested on the example of building an interval model for non-linear characteristics, which determines the amount of electricity generated by the MHP depending on the characteristics of hydro-technical structures.

In **Chapter 4**, within the framework of the general statement of the problem, the issue of implementing a new complex approach to the identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics is considered. A new comprehensive approach to the identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics is proposed and implemented, which is based on a combination of knowledge in the form of an ontological description of the subject area of identification of these models, methods of analysis of interval data and hybrid methods combining global and local optimization strategies, which in aggregate provided a reduction in the time complexity of solving the problems of identifying interval models of static systems. In the part of the ontological description of knowledge, the problem of structuring knowledge about the characteristics of

problems of identification of models of static systems is solved; optimization methods; and criteria for choosing a method depend on the characteristics of the task.

To implement a comprehensive approach to identifying models of static systems with nonlinear characteristics, a modeling method is implemented, which is based on a knowledge-oriented approach to the selection of optimization methods, in particular, global search based on gradient methods and methods of swarm intelligence (swarm of particles, behavioral models of bee colonies), based on ontology, which collectively provided a reduction in the time complexity of identifying interval models of static systems with nonlinear characteristics. It was established that the proposed method based on the formalization of the identification process by choosing an effective optimization method based on the characteristics of the identification problem provides more effective modeling and identification of interval nonlinear models of static systems with nonlinear characteristics compared to existing ones.

Chapter 5, which concludes the theoretical part of the dissertation, deals with the design and implementation of software for the mathematical modeling of static systems with nonlinear characteristics based on the analysis of interval data. The implementation is based on ensuring closeness to the user and convenience in using mathematical modeling methods based on interval data, which requires the development of specialized software environments that integrate the spectrum of mathematical methods into a single concept of building tools, understandable for practical users.

The software architecture for the mathematical modeling of static systems with nonlinear characteristics based on interval data analysis is proposed and substantiated. Unlike the existing ones, the features of the proposed architecture are the implementation of the interval modeling subsystem in a service-oriented environment, taking into account the optimization of computing schemes using the Google Cloud Run platform, the MapReduce distributed computing model, an intellectualized advisory and diagnostic subsystem based on artificial intelligence,

free software-interpreted tools and the use of RESTful APIs at all stages of mathematical modeling, which in aggregate ensured the simplification of the modeling process and ensured the user's proximity to the developed services. Based on the proposed architecture, a software system for mathematical modeling based on the analysis of interval data using cloud technologies has been implemented.

The main results of the dissertation, which are devoted to the practical aspects of the identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics, are presented in the context of the tasks of modeling processes in biogas plants, decarbonization of industrial facilities and transport infrastructure in **Chapter 6** of the work. Analysis of processes in biogas plants during biogas production was performed. It has been established that one of the main characteristics of biogas plant reactors during biogas production is the fermented substrate pH value. In the course of research, it was established that this indicator depends on the volume and structure of raw materials, as well as on the temperature in the bioreactor and the humidity of the substrate. Based on the proposed comprehensive approach to the identification of interval models of static systems with nonlinear characteristics, interval models of processes in biogas plants were developed, which, unlike the existing ones, describe the dependence of the pH of the medium on the composition of the raw materials loaded into the bioreactor and technological parameters of biogas production processes from a multicomponent substrate, which made it possible to determine the permissible variations of pH values of the environment depending on the ratio of dry and liquid fractions of raw materials in order to ensure the stability of the fermentation process in bioreactors of the first stage. The final part of the sixth chapter is devoted to constructing interval models in the decarbonization field of industrial facilities and transport infrastructure. Models of the spread of industrial pollution from a point source have been built, which make it possible to simplify the procedure for constructing the distribution of concentrations of the background level of pollution around an industrial object and serve as a toolkit for supporting decisions about the decarbonization of such objects. An interval model of the dependence of the volume

of transport infrastructure restoration was obtained, which establishes cause-and-effect relationships between the volume of restored transport infrastructure and the use of low-carbon material resources, which enables effective management of the decarbonization of transport infrastructure.

In **conclusion**, the main results and recommendations from the research are summarized.

The **appendices** include fragments of ontological descriptions, implementation documentation, and a list of scientific publications and presentations related to the research.

Keywords: Structural identification methods, parametric identification methods, interval model, static system, nonlinear characteristics, interval data analysis, nonlinear algebraic equations, optimization problem, objective function, hybrid optimization methods, ontological description, interval model identification.

List of published works by the topic of the dissertation:

Scientific works in which the main scientific results of the dissertation are published

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. 49–612. DOI: 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>. (SJQR 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>. (SJQR 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). C. 575. <https://doi.org/10.3390/en17030575>. (SJQR 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>. (SJQR Q2, Scopus)

7. Dyvak M.P., Manzhula V.I. Franko Y.P. Interval model for forecasting the power of the small hydro-electric power station "Topolka". *Energy and electrification*. 2008. No. 11(303). P. 21-29. [in Ukrainian].

8. Dyvak M., Manzhula V., Voytiuk I. Structural identification of interval difference operators. *Bulletin of the Ternopil National Technical University*. 2010. Volume 15, No. 4. C. 154-160. [Electronic resource, in Ukrainian].

9. Dyvak M.P., Manzhula V.I., Padletska N.I. Methods, means and interval model for the task of visualization of the recurrent laryngeal nerve in the process of surgical operation on the thyroid gland. *Optical-electronic information and energy technologies*. 2011. Volume 22. Issue 2. C. 102-109. [in Ukrainian].

10. Dyvak M.P., Pukas A.V., Dyvak T.M., Manzhula V.I. Macro model of moisture distribution in a sheet of plasterboard during its drying based on the interval difference operator. *Control systems and machines*. 2013. No. 2. P. 72-78. [in Ukrainian].

11. Dyvak M.P., Krepych S.Ya., Dyvak T.M., Manzhula V.I. Modeling and ensuring the functional suitability of the technological equipment of the plasterboard production line in conditions of variable characteristics of raw materials. *Measuring and computing equipment in technological processes*. 2015. No. 3(52). P. 186-192. [in Ukrainian].

12. Dyvak M.P., Manzhula V.I., Melnyk A.M., Pukas A.V. Method of structural identification of nonlinear interval models of static objects. *Information*

technology and computer engineering. 2022. Volume 54, No. 2, C. 103-114. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-103-114>

13. Melnyk A.M., Dyvak M.P., Manzhula V.I. Modeling of the dynamics of concentrations of harmful emissions from vehicles based on a combination of interval analysis methods and an ontological approach. *Measuring and computing equipment in technological processes*. 2022 no. 2. P. 14-23. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-2>

14. Dyvak M.P., Manzhula V.I., Melnyk A.M., Tymchyshyn V.S. A system for monitoring air pollution by motor vehicles based on an autonomous air-mobile measuring complex. *Optical-electronic information and energy technologies*. 2022. 42, issue 2. C. 73-83. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2021-42-2-73-83>

15. Manzhula V.I., Dyvak M.P. Interval nonlinear model of information signal amplitude distribution in the task of detection and localization of the recurrent laryngeal nerve during surgical operations. *Optical-electronic information and energy technologies*. 2022. No. 43, issue 1. P. 65-75. [in Ukrainian]. <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. Manzhula V.I., Zabchuk V.V. Software architecture for modeling processes in biogas plants. *Scientific Works of VNTU*. 2024. issue 1. P. 1-10. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-1-19-28>

18. Dyvak M., Manzhula V., Melnyk A., Yushko A. Software architecture for mathematical modeling based on interval data analysis using cloud technologies. *Measuring and computing equipment in technological processes*. 2024. Issue 1. C. 125-139. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-77-15>

19. Manzhula V.I., Dyvak M.P., Melnyk A.M. Method of structural identification of nonlinear models of static systems based on interval data.

Information technology and computer engineering. 2024. Issue 59, No. 1. P. 94-104. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-103-114>

20. Manzhula V., Dyvak M. Modeling of static systems with nonlinear characteristics using an ontological approach. *Measuring and computing equipment in technological processes*. 2024. No. 2. C. 306-324. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-78-36>

21. Dyvak M.P., Melnyk A.M., Manzhula V.I., Spivak I.Ya., Porplitsia N.P. Knowledge-oriented systems for the identification of interval mathematical models of complex dynamic and static objects: monograph. Ternopil: VOC "University Dumka". 2024. 294 p. [in Ukrainian].

Scientific works certifying the approval of the dissertation proceedings

22. Dyvak M., Manzhula V., Trufanovaa 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, Tom 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. Manzhula V.I., Ryzhiy O.V., Kyrylchuk A.B. Mathematical modeling of plasterboard quality characteristics at its stages production, *Modern computer information technologies: materials VI All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students*, ASIT'2016, Ternopil: TNEU, 2016, pp. 23-25. [in Ukrainian].

42. Dyvak M., Voytiuk I., Manzhula V. Optimality criteria of the structure of the interval difference operator, “*Information problems of computer systems, jurisprudence, economics and modeling*”: proceedings of the problem-scientific

interdisciplinary conference, Buchach-Skomorokhy, 2009, Volume 1, No. 5, P. 220-224. [in Ukrainian].

43. Manzhula V.I., Petrovskiy I.M. A software system for the implementation of problems of parametric identification of interval models, "*Information problems of computer systems, jurisprudence, economics and modeling*": proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference, Buchach-Skomorokhy, 2009, Volume 1, No. 5, pp. 228-233. [in Ukrainian].

44. Manzhula V.I., Nazar A.M. Software system for structural identification of interval models of static systems, "*Information problems of computer systems, jurisprudence, economics and modeling*": proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference, Buchach-Skomorokhy, 2009, Volume 1, No. 5, pp. 234-238. [in Ukrainian].

45. Dyvak M., Voytiuk I., Manzhula V. Criteria for the structural identification of the interval difference operator, "*Information problems of computer systems, jurisprudence, economics, modeling and management*": proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference, Buchach-Skhidnytsia, 2010, Vol. 1, No. 6, pp. 280-283. [in Ukrainian].

46. Pankiv M.R., Manzhula V.I., Tsilyo I.V. Modeling of the gas consumption process, "*Information problems of computer systems, jurisprudence, economics, modeling and management*": proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference, Buchach-Skhidnytsia, 2010, Vol. 1, No. 6, pp. 288-291. [in Ukrainian].

47. Divak M.P., Padletska N.I., Manzhula V.I. The application of methods of guaranteed interval estimation of parameters of macromodels of static systems for the task of visualization of the recurrent laryngeal nerve, "*Information problems of computer systems, jurisprudence, economics, modeling and management*": proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference (PSIC-2011), Buchach, 2011, No. 7, pp. 340-343. [in Ukrainian].

48. Manzhula V.I., Franko Y.P. Assessment of the influence of factors on the efficiency of the operation of a small hydroelectric power station using the methods of interval analysis, "*Information problems of computer systems, jurisprudence,*

economics, modeling and management”: proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference (PSIC-2011), Buchach, 2011, No. 7, pp. 349-351. [in Ukrainian].

49. Dyvak M.P., Padletska N.I., Manzhula V.I. An interval model for visualization of the recurrent laryngeal nerve during thyroid surgery, *Modern computer information technologies: Proceedings of the 1st All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2011*, Ternopil: Economic Opinion, 2011, pp. 10-11. [in Ukrainian].

50. Manzhula V.I., Machula V.Ya. Genetic algorithm for parametric identification of interval models of static systems, *Modern computer information technologies: Proceedings of the II All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2012*, Ternopil: Economic Dumka, 2012, pp. 33-35. [in Ukrainian].

51. Manzhula V.I., Pukas A.V., Gavrilyuk A.O. Social network for sharing GPS-routes, *Information problems of computer systems, jurisprudence, energy, economics, modeling and management: Proceedings of the problem-scientific interdisciplinary conference, PSIC-2012*, Buchach, 2012, C.285-288. [in Ukrainian].

52. Machula V.Ya., Manzhula V.I. Software for interval localization of model parameters using elements of symbolic mathematics, *Advanced computer information technologies: Proceedings of the III All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2013*, Ternopil: TNEU, 2013, pp. 43-44. [in Ukrainian].

53. Manzhula V.I., Polyarush O.V. Analysis of the effectiveness of the algorithm of interval localization of model parameters based on fractional calculations, *Modern computer information technologies: Proceedings of the III All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2013*, Ternopil: TNEU, 2013, pp. 40-41. [in Ukrainian].

54. Verbova H.M., Manzhula V.I. Software intelligent agent for the database of the post office, *Modern computer information technologies: Proceedings of the*

III All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2013, Ternopil: TNEU, 2013, pp. 205-206. [in Ukrainian].

55. Bazurin O.S., Manzhula V.I., Kostiv Yu.V., Machine learning methods in software engineering, *Computer information technologies: Proceedings of the school-seminar of young scientists and students, CIT'2019, Ternopil, November 29, 2019*, pp. 4-5. [in Ukrainian].

56. Zarevenyi O.R., Manzhula V.I. Method and software for automating the sorting of written correspondence, *Modern computer information technologies: Proceedings of the III All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2013, Ternopil: TNEU, 2013*, pp. 170-171. [in Ukrainian].

57. Manzhula V.I., Vyshniovskyi I.E. A modified method of solving ISLAR based on LP problems, *Modern computer information technologies: Proceedings of the 3rd All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students ACIT 2013, Ternopil: TNEU, 2013*, p.39. [in Ukrainian].

58. Manzhula V.I., Ukhina S.B. A prototype of a constructor of complex types based on Java FX, *Modern computer information technologies: Proceedings of the 5th All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2014, Ternopil: TNEU, 2014*, p. 158. [in Ukrainian].

59. Manzhula V.I., Stefanyshyn H.I., Yakoviv V.I. Mathematical modeling of the training load characteristics of track and field athletes, *Computer information technologies: Proceedings of the school-seminar of young scientists and students CIT'2019, Ternopil, November 29, 2019*, pp. 15-17. [in Ukrainian].

60. Kitsula V.I., Terletskyi A.I., Manzhula V.I. Analysis of approaches to evaluating the quality of software products, *Modern computer information technologies: Proceedings of the 5th All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students, ACIT'2015, Ternopil: TNEU, 2015*, C. 136-137.

61. Kot O.O., Manzhula V.I. An intellectualized library based on the WCAG standard (Web Content Accessibility Guidelines), *Computer information technologies: Proceedings of the school-seminar of young scientists and students CIT'2023, 2023, Ternopil: WUNU*, pp. 45–47.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	36
ВСТУП	37
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЗАДАЧ ТА МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ.....	51
1.1. Задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристикам на основі інтервальних даних	51
1.2. Аналіз методів глобальної оптимізації для задач моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками	62
1.3. Аналіз умов застосування методів глобальної оптимізації для задач ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками ..	70
1.4. Огляд сучасних засобів підтримки процесів моделювання із використанням онтологічного підходу.....	79
Висновки до розділу 1	87
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БАГАТОВИМІРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ	89
2.1. Постановка задачі ідентифікації параметрів інтервальних моделей складних об'єктів з нелінійними характеристиками.....	90
2.2. Властивості цільової функції в задачі ідентифікації параметрів інтервальних нелінійних моделей статичних систем.....	94
2.3. Метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками.....	106
2.4. Удосконалений метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем із додатковим критерієм зупинки	114
2.5. Метод визначення інтервальних оцінок параметрів на основі точкового розв'язку	118
Висновки до розділу 2	128

РОЗДІЛ 3. МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕЛІНІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ГРАДІЄНТНИХ МЕТОДІВ.....	130
3.1. Постановка задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками	131
3.2. Теоретичні аспекти розробки методів структурної ідентифікації на основі аналізу градієнта цільової функції	134
3.3. Метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей на основі аналізу градієнта цільової функції	153
3.4. Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації та його апробація	162
Висновки до розділу 3	168
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ.....	170
4.1. Характеристики задачі моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками.....	172
4.2. Онтологія задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних	184
4.3. Метод моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі онтологічного підходу.....	194
4.4. Дослідження ефективності на основі задачі моделювання обсягу генерованої електроенергії модулем сонячної електростанції.	199
Висновки до розділу 4	207
РОЗДІЛ 5. АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	209
5.1. Особливості використання хмарних сервісів для підтримки процесів математичного моделювання.....	210

5.2. Архітектура програмного забезпечення для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних	214
5.3. Програмна реалізація системи для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних	224
Висновки до розділу 5	232
РОЗДІЛ 6. ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ.	235
6.1. Моделювання статичних характеристик процесу бродіння в біогазових установках.....	236
6.1.1. Принцип функціонування БГУ та основні характеристики процесу бродіння.....	236
6.1.2. Інтервальні моделі залежності рН середовища від структури сировини та технологічних параметрів	243
6.1.3. Інтерпретація результатів моделювання	254
6.2. Дослідження ефективності удосконаленого методу параметричної ідентифікації з додатковим критерієм зупинки обчислювальної процедури.....	260
6.3. Інтервальні моделі для підтримки прийняття рішень в декарбонізації промислових об'єктів та транспортної інфраструктури	265
6.3.1. Моделювання фонових рівнів поширення шкідливих викидів від точкового джерела забруднення	265
6.3.2. Ідентифікація залежності обсягів будівництва транспортної інфраструктури від використання низьковуглецевих матеріалів	270
Висновки до розділу 6	274
ВИСНОВКИ.....	276
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	281
ДОДАТОК А OWL-КОД ОНТОЛОГІЧНИХ ОПИСІВ.....	316
ДОДАТОК Б АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ.....	331
ДОДАТОК В СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ	339

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ABC – Artificial Bee Colony

AC – змінний струм

ACO – оптимізації мурашиної колонії

API – Application Programming Interface

BFGS – Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno

CERC – Cambridge Environmental Research Consultants

DC – постійний струм

EA – еволюційні алгоритми

EXPO – Ontology for Scientific Experiments

NARX – Nonlinear AutoRegressive with eXogenous inputs

NSC – Negative Slope Coefficient

OntoDM – Ontology for Data Mining

PSO – Particle Swarm Optimization

БГУ – біогазова установка

ПГН – поворотний гортанний нерв

ІМСС – інтервальна модель статичного системи

ІСЛАР – інтервальна система лінійних алгебричних рівнянь

ІСНАР – інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь

МГЕС – мала гідроелектростанція

МГУА – метод групового урахування аргументів

ПМБК – поведінкові моделі бджолої колонії

ВСТУП

Зі зростанням складності технічних і природних систем актуальність моделювання екзогенних впливів на складні об'єкти постійно зростає. При цьому, 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 [89].

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 медицині, де є необхідність швидкого прийняття рішень під час проведення хірургічних операцій, використання моделей «чорної скриньки» може значно підвищити ефективність прийняття рішень та відповідно безпеку.

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 ситуаціях, коли необхідне детальне розуміння причинно-наслідкових зв'язків.

У цьому випадку моделі 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. [234], Івахненко О.Г. [95, 96], Воцінін А.П. [237], Грановський В.А. [238], Кунцевич В.М. [116], Дивак М.П. [241, 242] Степашко В.С. [297, 298], Личак М.М. [271], Куржанський А.Б. [263], Пшеничний Б.М., Шокін Ю.І. [194], Шарий С.П. [190, 191], Згуровський М.З., Черноусько Ф.Л., Мойсеєва М.М., Ljung L. [124], 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 спрощувати реальні фізичні процеси, нелінійні моделі забезпечують більш адекватне відображення властивостей 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 порівняно 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 формули 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 інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із заданою точністю 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 яких автор був посаді старшого наукового співробітника:

– НДР «Математичне та комп'ютерне моделювання об'єктів з розподіленими параметрами на основі поєднання онтологічного та інтервального аналізу» (2023-2024 рр., держреєстраційний номер 01220001497);

– НДР «Національна концепція екобезпеки суспільства та інклюзія циркулярної економіки в умовах пандемії» (2021-2022 рр., держреєстраційний номер 01210109485);

– НДР «Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод» (2020-2021 рр., держреєстраційний номер 0120U102040);

– НДР «Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах ший» (2017-2018 рр., держреєстраційний номер 0117U000410);

– НДР «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (2014-2015 рр., держреєстраційний номер 0114U000569);

– НДР «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 госпдогвірною тематикою:

– НДР «Моделювання динаміки процесів у біогазових установках» (2023-2024 рр., держреєстраційний номер 01230103785, замовник – ТОВ "Теофіпольська енергетична компанія");

– НДР «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.);

– НДР «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 частинної похідної по параметрах моделі на основі 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, що 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 частинної похідної по параметру моделі 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 часової 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 практично значимі результати:

- інтервальна нелінійна модель характеристик сигналу – реакцій на подразнення тканин в хірургічній рані, яка, на відміну від існуючих, 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 «Теофіпольська енергетична компанія» при виробництві біогазу для забезпечення стабільності бродіння в біореакторах першого етапу; у Тернопільській міській комунальній лікарні №2 при інтраопераційній ідентифікації нервів гортані при проведенні операцій тиреоїдектомії; у комунальному підприємстві теплових мереж «Тернопільміськтеплокомуненерго» Тернопільської міської ради для підтримки рішень щодо декарбонізації об'єктів виробництва теплової енергії (котелень), які працюють на газоподібному паливі; у ТзОВ «Топольки» для оцінювання потенційних можливостей використання наявних гідроресурсів

малою гідроелектростанцією; 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». Акти використання результатів дисертаційного дослідження подано в додатку Б.

Особистий внесок здобувача. У працях, що відображають основні результати дисертаційної роботи, які опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації (додаток В) здобувачеві 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 нелійними характеристиками на основі допускового оцінювання області вектора параметрів; [13, 20] – новий комплексний підхід до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелійними 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 нелійними 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 нелійними 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 сервісо-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» АСІТ (Тернопіль, 2010-2017); «Комп’ютерні інформаційні технології» СІТ (Тернопіль, 2019-2023); «Інформаційні проблеми комп’ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання» 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 (Додаток В), зокрема 20 статей [1-20] у наукових фахових періодичних виданнях, у тому числі 14 статей у наукових фахових виданнях України [7-20] та 6 статей у закордонних періодичних виданнях [1-6], що включені в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science, 1 монографія, що опублікована за темою дослідження українською

мовою [21] та 40 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій (з них 17 публікацій [22-39] 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.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ЗАДАЧ ТА МЕТОДІВ ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВІ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

1.1. Задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних

Моделювання систем з нелінійними характеристиками є складним завданням, що потребує врахування багатьох факторів і змінних. У випадку коли розуміння внутрішньої структури та механізмів системи є обмеженим або неможливим, для моделювання використовують моделі «чорної скриньки» (black-box models) [89, 99].

Моделі «чорної скриньки» – це математичні моделі, які описують систему тільки на основі вхідних і вихідних даних, не враховуючи деталі внутрішніх процесів. Такі моделі побудовані виключно на емпіричних даних і використовуються для встановлення причинно-наслідкових зв'язків між нелінійними характеристиками системи та зовнішніх факторів впливу та прогнозування поведінки системи без розуміння її внутрішньої структури.

Охарактеризуємо детальніше потребу у використанні моделей «чорної скриньки»:

- складність системи з нелінійними характеристиками. Внутрішні процеси системи є настільки складними, що їх неможливо описати аналітично. Наприклад, моделювання кліматичних змін, моніторинг забруднення повітря або управління відновлюваними джерелами енергії;
- обмеженість знань. Немає достатньої інформації про внутрішні механізми системи, що унеможливорює побудову моделей «білої скриньки» (white-box) або «сірої скриньки» (grey-box). Наприклад, нові технологічні процеси або біологічні системи;

- велика кількість даних. Великий обсяг емпіричних даних, що дозволяє побудувати точну модель на основі вхідних і вихідних змінних без необхідності розуміння внутрішньої структури. Наприклад, дані інтернет-ресурсів та рекомендаційні системи.

До переваг моделювання систем на основі моделей такого типу можна віднести гнучкість, простоту та швидкість процесу побудови моделей на основі наявних даних. Слід також відзначити недостатню інтерпретованість та залежність від експериментальних даних моделей даного типу таких, як нейронні та баєсові мережі, зокрема точність моделі буде залежати від якості та обсягу вхідних даних [89].

Останнім часом для моделювання 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. 1.1) [148].

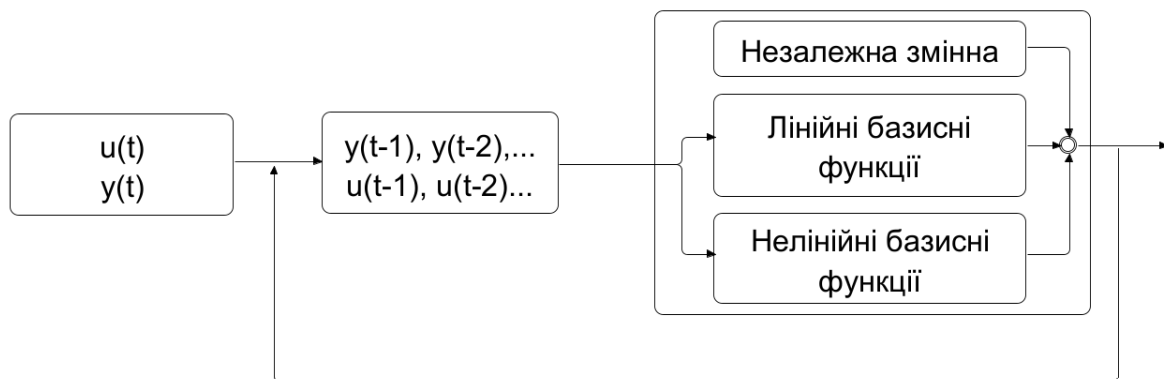


Рис. 1.1. Ідентифікація NARX моделей складних систем

Такі моделі враховують перехідні процеси в системах за рахунок використання регресорів із затримкою: $y(t-1), y(t-2), \dots; u(t-1), u(t-2), \dots$, де $y(t)$ – вихідна змінна значення нелінійної характеристики системи, $u(t)$ – значення екзогенних вхідних даних.

В даному дослідженні ми розглядаємо складні об'єкти, в яких ігноруються перехідні процеси, тобто як статичні системи з нелінійними характеристиками [124, 307]. У цьому випадку ідентифікація моделей зводиться до встановлення залежності значення вихідної характеристики y від значень вхідних змінних x у вигляді нелінійних алгебраїчних рівнянь (рис. 1.2.).

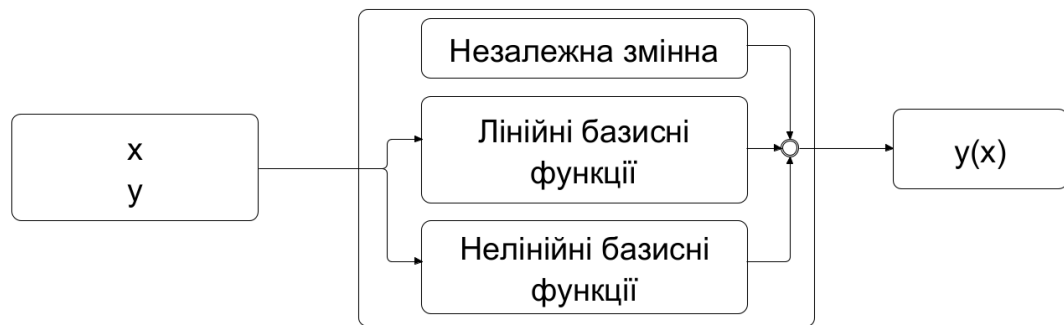


Рис. 1.2. Ідентифікація моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

При цьому процес ідентифікації включає дві задачі: структурну та параметричну ідентифікацію [62, 63, 307, 308]. Параметрична ідентифікація базується на відомій структурі моделі, для якої необхідно ідентифікувати параметри [46, 166, 250, 264]. Структурна ідентифікація є складнішою задачею, оскільки апріорними даними для ідентифікації є тільки екзогенні дані та припущення про тип нелінійних моделей, якими описується характеристика статичної системи [60, 63, 67, 247].

Розглянемо детальніше задачі параметричної та структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Наші дослідження базуються на теоретико-множинному або інтервальному підході, який враховує межі похибок та дозволяє будувати інтервальні моделі статичних систем з нелінійними характеристиками із заданою точністю [250, 263]. Проте застосування цього підходу значно ускладнює методи ідентифікації параметрів моделі порівняно з детермінованим або стохастичним підходами [297, 302]. Таким чином,

перевага у можливості побудови інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із заданою точністю нівелюється ускладненням методів структурної та параметричної ідентифікації цих моделей, а в більшості випадків і самих моделей [61, 68, 264].

Як відомо, задача параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками із заданою точністю полягає у знаходженні розв'язків інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР) [55, 56, 241]. Розглянемо це твердження докладніше.

Як зазначалося вище, задача параметричної ідентифікації базується на припущенні, що вихідна нелінійна характеристика статичної системи y_0 описується алгебраїчним виразом такого вигляду:

$$y_0 = f_1(\vec{\beta}, X) + \dots + f_m(\vec{\beta}, X), \quad (1.1)$$

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:

$$\vec{X}_i = (x_{i1} \dots x_{in}) \longrightarrow [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}, \quad (1.2)$$

де n – кількість екзогенних факторів, N – кількість спостережень експерименту.

Тоді задача параметричної ідентифікації (з відомими базовими функціями та структурою моделі) полягає в пошуку розв'язків ІСНАР такого вигляду [62]:

$$\begin{cases} y_1^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_1) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_1) \leq y_1^+; \\ \vdots \\ y_i^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \leq y_i^+; \\ \vdots \\ y_N^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_N) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_N) \leq y_N^+. \end{cases} \quad (1.3)$$

Таким чином, отримують загальну постановку задачі ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками у вигляді інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР).

Складність вирішення цієї задачі в порівнянні із задачами для випадку лінійних інтервальних моделей очевидна [250, 292, 293]. Застосування методів, які традиційно використовуються в межах інтервального підходу, зокрема симплекс-методу [250], є проблематичним, а в більшості випадків неможливим. В працях [62, 244 нижче] запропоновано уніфікований підхід до вирішення даної задачі. Основою для побудови методів в межах даного підходу є поведінкові моделі бджолиних колоній (ПМБК), які базуються на властивостях самоорганізації та самоадаптації [257].

Як впливає з вищесказаного, задача параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в загальному випадку є задачею знаходження розв'язків ІСНАР (1.3) у вигляді множини Ω . Враховуючи складність розв'язання цієї системи часто також використовують точкові розв'язки на основі вектора $\vec{\beta}$.

Враховуючи те, що задача (1.3) не може бути розв'язана для загального випадку в аналітичній формі, для пошуку розв'язку ІСНАР використовують методи на основі ітераційних процедур. В цілому, зазначені методи базуються на аналізі сумісності ІСНАР (1.3). Відповідно, якщо розв'язок ІСНАР (1.3) отримано у вигляді деяких інтервалів оцінок $[\hat{\beta}_1^-; \hat{\beta}_1^+], \dots, [\hat{\beta}_m^-; \hat{\beta}_m^+]$, то оцінка вихідної характеристики приймає значення у такому інтервальному вигляді:

$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] = f_1([\hat{\beta}_1^-; \hat{\beta}_1^+], \vec{X}_i) + \dots + f_m([\hat{\beta}_m^-; \hat{\beta}_m^+], \vec{X}_i), i = \overline{1, N}. \quad (1.4)$$

Таким чином, сумісність ІСНАР (1.3) 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:

$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \subset [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}. \quad (1.5)$$

Ітераційні процедури методів пошуку розв'язків ІСНАР (1.3) базуються на оцінюванні на кожній ітерації «якості» оцінки параметрів математичної моделі, представленої алгебраїчним виразом (1.4). При цьому для оцінки «якості» параметрів на k -ій ітерації, використовують функцію $\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+])$, яка визначає значення різниці між найбільш віддаленими прогнозними центрами та експериментальними інтервалами – для випадку, коли вони не перетинаються, і для випадку їх перетину – мінімальною шириною перетину прогнозних і експериментальних інтервалів. Виходячи з умов (1.5), вираз для функції $\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+])$, для обох наведених вище випадків, записують таким чином:

$$\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+]) = \max_{i=\overline{1, N}} \{ |mid([\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)]) - mid([y_i^-; y_i^+])| \}, \quad (1.6)$$

якщо

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

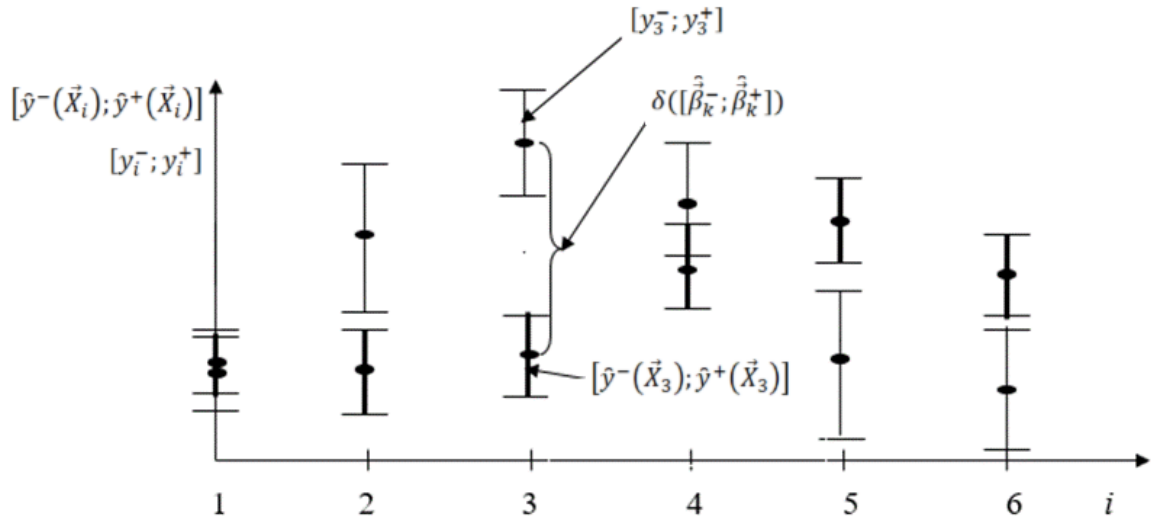
$$\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+]) = \max_{i=\overline{1, N}} \left\{ \begin{array}{l} wid([\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)]) - \\ -wid([\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \cap [y_i^-; y_i^+]) \end{array} \right\}, \quad (1.7)$$

якщо

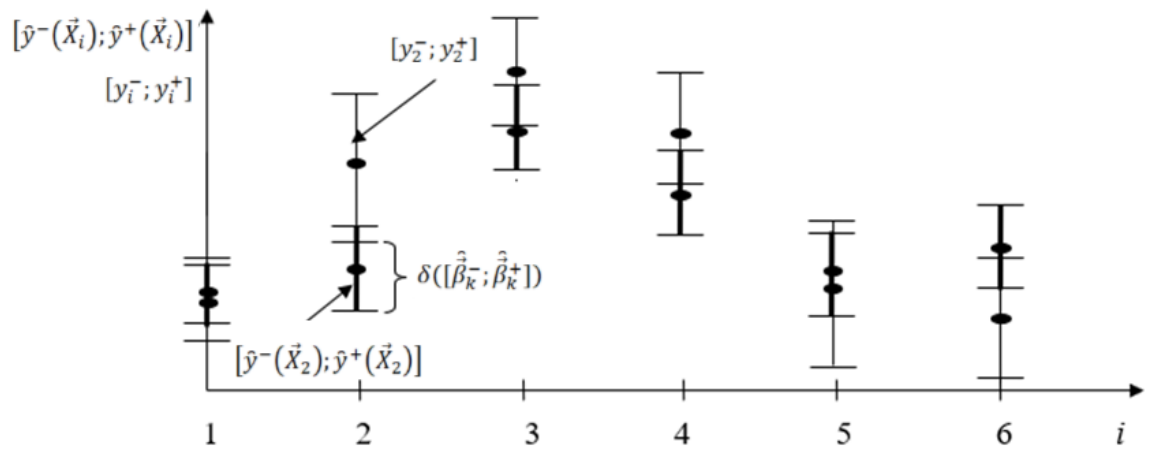
$$[\hat{y}^-(\vec{X}_i); \hat{y}^+(\vec{X}_i)] \cap [y_i^-; y_i^+] \neq \emptyset, \forall i = \overline{1, N},$$

де $mid(\bullet)$ і $wid(\bullet)$ – оператори визначення центру та ширини інтервалу, відповідно [61].

На рисунку 1.3 проілюстровано випадки обчислення значень функції $\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+])$ за формулами (1.6), (1.7).



а)



б)

Рис. 1.3. Ілюстрація обчислення функції $\delta([\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+])$: а) випадок використання формули (1.6); б) випадок використання формули (1.7), пов'язаний з уточненням інтервальних оцінок параметрів

Для першого випадку обчислення значення функції за формулою (1.6) на рис. 1.3.а, наведено інтервальні оцінки отримані експериментально та

прогнозованої характеристики статичної системи для шести спостережень. Значенням функції $\delta \left(\left[\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+ \right] \right)$ є модуль відхилення центрів цих інтервалів. Найбільше відхилення спостерігається між центрами інтервалів для третього спостереження.

Випадок перетину інтервалів значень прогнозованої нелінійної характеристики статичної системи та інтервалів значень, отриманих в результаті експерименту, проілюстровано на рис. 1.3.б. У цьому випадку значення функції $\delta \left(\left[\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+ \right] \right)$ обчислюють за формулою (1.7).

Якщо отримують оцінки параметрів у вигляді вектора $\vec{\hat{\beta}} = \hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_m$, то модель статичної системи з нелінійними характеристиками записують у такому вигляді [242, 244]:

$$\hat{y}(\vec{X}_i) = f_1(\vec{\hat{\beta}}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\hat{\beta}}, \vec{X}_i), i = \overline{1, N}. \quad (1.8)$$

У цьому випадку значення функції $\delta \left(\hat{\beta}_k \right)$ обчислюють за формулою:

$$\delta \left(\hat{\beta}_k \right) = \max_{i=\overline{1, N}} \{ |\hat{y}(\vec{X}_i) - \text{mid}([y_i^-; y_i^+])| \} \quad (1.9),$$

якщо

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

В той час виконання умов

$$\hat{y}(\vec{X}_i) \in [y_i^-; y_i^+], \forall i = \overline{1, N} \quad (1.10)$$

обумовлює завершення процедури ідентифікації.

Виходячи з вищесказаного, задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками формують у вигляді оптимізаційної задачі такого вигляду:

$$\delta \left(\left[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+ \right] \right) \xrightarrow{\left[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+ \right]} \min, \quad (1.11)$$

$$\left[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+ \right] \subset \left[\hat{\beta}^{low}; \hat{\beta}^{up} \right]. \quad (1.12)$$

де $\hat{\beta}^{low}; \hat{\beta}^{up}$ – задані межі для параметрів моделі, а значення цільової функції $\delta \left(\left[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+ \right] \right)$ обчислюється за формулою (1.6) або (1.7).

Використання формул (1.6) та (1.7) для розрахунку функції «якості» поточної оцінки параметрів моделі статичної системи з нелінійними характеристиками є затратним з точки зору обчислювальної складності оптимізації, однак такий підхід є виправданим, за рахунок простоти обчислювальної реалізації формул (1.6) та (1.7).

Відповідно, методи реалізації параметричної ідентифікації ґрунтуються на скінченних ітераційних процедурах (за умови сумісності ІСНАР (1.3), в іншому випадку обмежується максимальною кількістю ітерацій) пошуку мінімального (нульового) значення функції «якості» оцінок параметрів, тобто

$$\delta \left(\left[\hat{\beta}_k^-; \hat{\beta}_k^+ \right] \right) = 0. \quad (1.13)$$

Отже, підсумовуючи, задачу ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних об'єктів формують у вигляді задачі визначення оптимальних розв'язків інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (1.3) у вигляді оптимізаційної задачі (1.11)-(1.13) з нелінійною та дискретною цільовою функцією (1.6)-(1.7) та лінійними обмеженнями на неперервній множині області параметрів.

Тепер розглянемо задачу ідентифікації структури інтервальних моделей. Як відомо, базовими методами ідентифікації структури є нарощування або редуція структури моделі на основі заданого типу структурних елементів (нелінійних функцій) [244, 276]. Для цього використовують поняття множини структурних елементів:

$$\lambda_s = \{f_1(\vec{\beta}, X), f_2(\vec{\beta}, X), \dots, f_s(\vec{\beta}, X)\}, \quad (1.14)$$

де λ_s означає деяку множину структурних елементів розмірністю s , яка є основою для побудови інтервальної моделі у вигляді (1.4), тобто як згортку визначених елементів із цієї множини. Позначення λ_k використовують для означення структури k -ї моделі-претендента, оскільки всі моделі будують на основі елементів даної множини.

Відповідно, задача ідентифікації структури інтервальної моделі статичної системи з нелінійними характеристиками за результатами експерименту у формі інтервальних даних (1.2) полягає у визначенні структури λ_m (множини елементів розмірністю m), яка уможливить побудову адекватної моделі статичної системи з нелінійними характеристиками [62].

Математичні моделі в процесі ідентифікації структури моделі називають претендентами, відповідно, представлення їх структури з урахуванням наведених позначень має такий вигляд:

$$[\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i); \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)] = f_1([\hat{\beta}_1^-, \hat{\beta}_1^+], \vec{X}_i) + \dots + f_m([\hat{\beta}_m^-, \hat{\beta}_m^+], \vec{X}_i), \quad (1.15)$$

$$i = \overline{1, N}.$$

У цьому випадку умови узгодження моделі-претендента з інтервалами експериментальних даних мають такий вигляд:

$$[\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i); \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)] \in [y_i^-; y_i^+], \forall i = \overline{1, N}, \quad (1.16)$$

де $\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i), \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)$ – інтервальні межі прогнозованого значення нелінійної характеристики для заданого набору структурних елементів λ_m і значень вхідних змінних \vec{X}_i .

Таким чином, для кожної моделі-претендента отримують задачу ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем у вигляді системи інтервальних нелінійних алгебраїчних рівнянь (1.3). Тому задача ідентифікації структури інтервальних моделей статичних систем з

нелінійними характеристиками є багаторазово розв'язуваною задачею параметричної ідентифікації для моделей-претендентів. Таку задачу формулюють також як спрямований пошук оптимальної множини λ_m в просторі структурних елементів множини λ_s [63].

За аналогією із задачею параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками «якість» структури визначають на основі функції $\delta(\lambda_m)$ у вигляді різниці між центрами найбільш віддалених прогнозних інтервалів $[\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i); \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)]$ і експериментальних інтервалів $[y_i^-; y_i^+]$ – у випадку, коли вони не перетинаються і мінімальну ширину перетину – для випадку коли вони перетинаються.

Вираз для обчислення функції $\delta(\lambda_m)$, для наведених вище двох випадків, записують таким чином:

$$\delta(\lambda_m) = \max_{i=\overline{1, N}} \{ |mid([\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i); \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)]) - mid([y_i^-; y_i^+])| \}, \quad (1.17)$$

якщо

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

$$\delta(\lambda_m) = \max_{i=\overline{1, N}} \left\{ \begin{array}{l} wid([\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i); \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)]) - \\ -wid([\hat{y}^-(\lambda_m, \vec{X}_i); \hat{y}^+(\lambda_m, \vec{X}_i)] \cap [y_i^-; y_i^+]) \end{array} \right\}, \quad (1.18)$$

якщо

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

Математично задачу структурної ідентифікації формулюють у вигляді такої оптимізаційної задачі:

$$\delta(\lambda_m) \xrightarrow{\hat{\lambda}_m, [\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+]} \min, \quad (1.19)$$

$$\lambda_m \in \lambda_s, \quad (1.20)$$

$$\left[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+ \right] \subset \left[\hat{\beta}^{low}; \hat{\beta}^{up} \right]. \quad (1.21)$$

Очевидно, що проблема вирішення задачі є значно складнішою порівняно з задачею параметричної ідентифікації. Враховуючи той факт, що задача ідентифікації структури інтервальних моделей статичних систем є проблемою багаторазового розв'язування задач параметричної ідентифікації цих моделей вона є NP-повною.

Тому на заміну методам прямого нарощування або редукції на практиці використовують методи на основі ройового інтелекту або еволюційних алгоритмів, які спрощують ітераційну процедуру перебору послідовності структур $\lambda_{s=1}, \lambda_{s=2}, \dots, \lambda_m$ таким чином, щоб забезпечити оцінку послідовності значень функції $\delta(\lambda_{s=1}), \delta(\lambda_{s=2}), \dots, \delta(\lambda_m)$, яка визначає їх «якість», обчислену за виразом (1.17) або (1.18), що відповідає таким умовам:

$$\delta(\lambda_{s=1}) > \delta(\lambda_{s=2}) > \dots > \delta(\lambda_{m=m_{opt}}) = \delta\left(\left[\hat{\beta}^-; \hat{\beta}^+\right] \subset \Omega\right), \quad (1.22)$$

де m_{opt} – номер структури, для якої є сумісною ІСНАР (1.3).

Отже, задачу ідентифікації структури інтервальних моделей статичних систем, формулюють як оптимізаційну задачу з дискретною цільовою функцією пошуку розв'язків ІСНАР (1.3) на дискретній множині структурних елементів λ_s .

1.2. Аналіз методів глобальної оптимізації для задач моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками

Загалом, алгоритми оптимізації можна розділити на дві основні категорії: детерміновані та ймовірнісні алгоритми [11, 150, 227]. Детерміновані алгоритми найчастіше застосовуються, коли існує чіткий зв'язок між характеристиками можливих рішень та їх корисністю для конкретної задачі. У такому випадку простір пошуку можна ефективно

дослідити, використовуючи, наприклад, схему «поділяй та владарюй». Якщо зв'язок між претендентом на рішення і його «придатністю» не є очевидним або занадто складним, або якщо розмірність простору пошуку дуже велика, вирішення задачі використовуючи детерміновані методи є ускладненим [227].

У такому випадку використовують ймовірнісні методи оптимізації. Можна відмітити клас ймовірнісних алгоритмів на основі методу Монте-Карло. Вони не гарантують точність розв'язку, але мають нижчу обчислювальну складність. Це призводить до того, що отримані за їх допомогою результати можуть не бути глобальними оптимумами.

На рис. 1.4 наведено загальну класифікацію ймовірнісних методів глобальної оптимізації [227].

Багато методів базуються на використанні евристик – функцій, правил, які допомагають визначити, яке з можливих рішень слід розглянути наступним. З одного боку, детерміновані алгоритми зазвичай також використовують евристики для визначення порядку обробки кандидатів на рішення. З іншого боку, ймовірнісні методи можуть розглядати в подальших обчисленнях лише ті елементи простору пошуку, які були вибрані за допомогою евристики.

Евристика [102, 223, 224, 231] є частиною алгоритму оптимізації, яка використовує інформацію, зібрану алгоритмом на поточний момент, щоб допомогти вирішити, який кандидат на рішення слід перевірити наступним або як можна створити наступного індивіда. Евристики зазвичай залежать від класу задач.

Метаевристика – це метод розв'язання дуже загальних класів задач. Вона поєднує цільові функції або евристики в абстрактний та ефективний спосіб, зазвичай без використання глибокого розуміння структури цих задач, тобто, розглядаючи їх як «чорні скриньки» [15, 31, 77, 211].

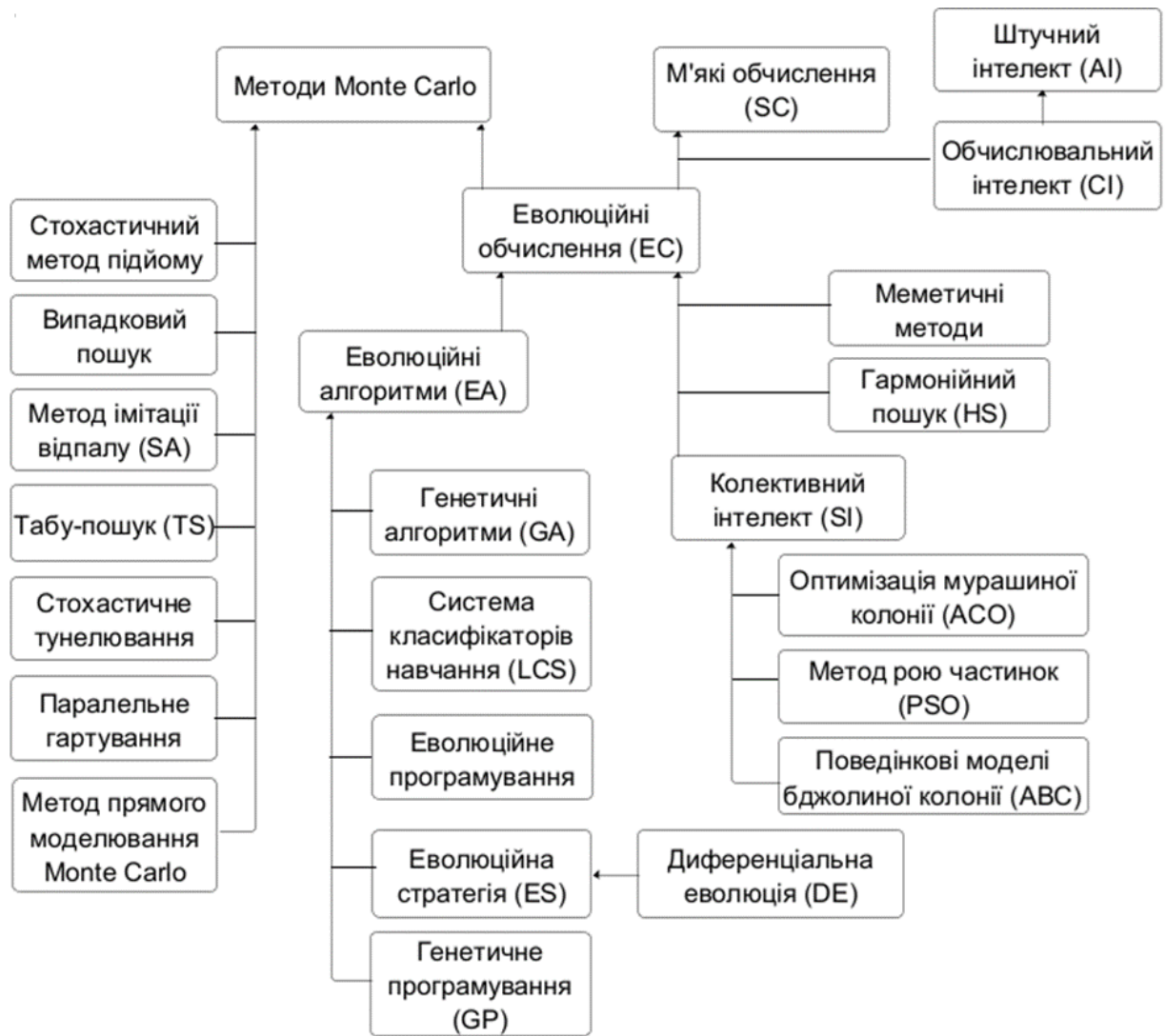


Рис. 1.4. Таксономія ймовірнісних методів глобальної оптимізації [227]

Це поєднання часто здійснюється стохастично за допомогою статистики, отриманої з вибірок простору пошуку або на основі моделі якогось природного явища чи фізичного процесу. Наприклад, метод імітації відпалу визначає, який кандидат на рішення оцінюватиметься наступним, відповідно до фактору ймовірності Больцмана для конфігурацій атомів у тверднучих металах [227]. Еволюційні алгоритми копіюють поведінку природної еволюції, розглядаючи кандидатів на рішення як індивідууми, які змагаються у віртуальному середовищі. Уніфіковані моделі метаевристичних оптимізаційних процедур були запропоновані Ваессенсом та ін. [176, 177], Рейворд-Смітом [174], Османом [92], і Тайярдом [73] та ін.

Важливий клас ймовірнісних метаевристик на основі Монте-Карло становить еволюційні обчислення. Вони включають усі алгоритми, що базуються на множині претендентів на рішення (так званої популяції), які поступово вдосконалюються. Ця галузь оптимізації також належить до класу м'яких обчислень та є частиною галузі штучного інтелекту. Деякі з її найважливіших представників – еволюційні алгоритми та ройовий (колективний) інтелект, до яких відносяться методи оптимізації мурашиної колонії (ACO) [136, 207], рою частинок (PSO) [180, 181], на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії (ABC) [1, 4, 3] та інші.

Еволюційні алгоритми (EA) є популяційно-орієнтованими метаевристичними оптимізаційними алгоритмами, які використовують механізми, запозичені з біології, такі як мутація, кросовер, природний відбір та селекція, щоб поступово вдосконалювати набір претендентів на рішення [90, 215, 214, 216]. Перевага еволюційних алгоритмів у порівнянні з іншими методами оптимізації полягає в тому, що вони розглядають задачу як «чорний ящик», та використовують невелику кількість припущень про цільову функцію. Більше того, визначення цільової функції зазвичай вимагає меншого розуміння структури простору проблеми, ніж ручне створення допустимої евристики. Завдяки цьому EA демонструють стабільні результати для задач різного класу.

Методи ройового інтелекту моделюють колективну поведінку мультиагентних децентралізованих систем. Вони застосовуються для розв'язання складних оптимізаційних задач, таких як багатовимірні оптимізація, дискретна оптимізація та багатокритеріальна оптимізація [183]. Ці методи базуються на біологічному принципі, згідно з яким особини об'єднуються в зграї або колонії для поліпшення умов своєї життєдіяльності. Зокрема, об'єднання в колонії підвищує шанси на виживання в умовах загрози з боку хижаків, а також сприяє ефективнішому пошуку їжі [172]. У процесі функціонування колонії живих організмів вирішуються оптимізаційні та, як правило, багатокритеріальні задачі.

Як і інші еволюційні методи, методи ройового інтелекту використовують популяцію індивідів (потенційних рішень) та методи стохастичної оптимізації, що моделюють соціальну поведінку цих індивідів, наприклад, поведінку риб у зграї або комах у колонії [172, 173]. На початку роботи алгоритму випадковим чином формується початкова популяція агентів (потенційних рішень задачі). Далі пошук оптимальних або субоптимальних рішень відбувається за допомогою моделей поведінки, аналогічних до поведінки живих організмів. Індивіди популяції взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем локально. Якщо один з індивідів знаходить «перспективний напрямок», інші швидко приєднуються до нього. Водночас, для забезпечення охоплення простору рішень, частина індивідів рухається випадково. Ці локальні взаємодії втілюють принципи ройового інтелекту [91].

До алгоритмів ройового інтелекту належать методи вовчої зграї, бджолоїної колонії, кажанів, рою частинок, мурашиний алгоритм та інші. Розглянемо деякі з них детальніше.

Мурашиний алгоритм моделює здатність мурах швидко знаходити найкоротший шлях від мурашника до джерела їжі та адаптуватися до змін довкілля [131, 197]. Під час руху мурахи виділяють феромони, які з часом випаровуються. Інші мурахи використовують концентрацію феромонів, залишену попередниками, для вибору шляху до їжі. Таким чином, мурахи надають перевагу маршрутам з більшою концентрацією феромонів [131]. Вищу концентрацію на початку роботи алгоритму матимуть коротші шляхи, оскільки мурахи-розвідники зможуть пройти ними кілька разів. Згодом концентрацію підтримують інші мурахи, а менш використовувані маршрути поступово стають неактивними через випаровування феромонів. Це дозволяє мурахам знаходити нові маршрути, якщо попередні стають недоступними [197].

Алгоритм рою частинок частково відтворює соціально-психологічну поведінку груп тварин у пошуку оптимальних місць для поселення. Він базується на поведінці птахів і риб у зграї, тому агентів системи називають

«частками» [172]. Кожна частка є потенційним розв'язком задачі, що характеризується позицією та швидкістю. Частки рухаються до оптимального розв'язку, обмінюючись інформацією з «сусідніми» частками. Вони також мають пам'ять, де зберігають координати найкращого місця, яке вони знайшли, та глобального найкращого місця, знайденого зграєю [48]. На кожній ітерації напрямки і швидкість часток коригуються, щоб вони рухалися в напрямку найкращого загального місця та до власного найкращого рішення.

Алгоритм штучної бджолоїної колонії (ABC) – це евристичний метод, розроблений у 2005 році турецьким науковцем Карабогою Д., для розв'язання оптимізаційних задач з багатьма змінними [103, 104]. Його ідея полягає в моделюванні поведінки колонії медоносних бджіл під час пошуку їжі. У природі бджоли-розвідники шукають цінні джерела нектару в різних напрямках, оцінюючи їх за кількістю нектару та віддаленістю від вулика. Повернувшись до вулика, розвідники повідомляють іншим бджолам про знайдені джерела за допомогою «бджолоїного танцю». Інші бджоли обирають джерела нектару відповідно до отриманих відомостей [100]. Чим якісніше джерело, тим більше бджіл його відвідують. Процес повторюється, при цьому розвідники продовжують шукати нові джерела. Якщо нектар вичерпався, бджоли переміщуються до нових ділянок [100].

Усі розглянуті методи використовують принципи ройового інтелекту. Загальна схема роботи ройових алгоритмів виглядає так [216]:

- ініціалізація популяції агентів (випадковий вибір початкових точок у просторі розв'язків задачі);
- переміщення агентів (агенти рухаються в просторі розв'язків задачі, застосовуючи специфічні правила, наближаючись до екстремуму функції мети);
- завершення (процедура зупиняється при досягненні умови зупинки, інакше повертається до другого кроку).

Методи ройового інтелекту мають багато спільного з генетичними алгоритмами: наприклад, випадкову ініціалізацію популяції та використання

функції мети для оцінювання рішень. Однак вони не використовують генетичних операторів (схрещення, мутації), замість цього особини взаємодіють локально, змінюють швидкості та мають пам'ять. Механізми взаємодії особин у ройових і генетичних алгоритмах значно відрізняються [73, 105]. У генетичних алгоритмах інформація передається попарно, сприяючи синхронному руху популяції до екстремуму. У ройових алгоритмах взаємодія відбувається локально, що дозволяє знаходити локальні екстремуми та прискорює пошук глобального екстремуму [216]. Додатковою перевагою ройових методів є менша кількість параметрів алгоритму.

Крім цих запозичених з природи та еволюційних підходів, існують також методи, що копіюють фізичні процеси, як, наприклад, метод імітації відпалу, паралельного відпалу, метод крапель дощу, а також методи без прямої аналогії в реальному світі, такі як пошук з табу та випадкова оптимізація [32, 227].

На сьогоднішній день дуже перспективним є гібридний підхід до реалізації методів глобальної оптимізації. В межах даного підходу варто відзначити меметичні алгоритми та методи множинного запуску оптимізації.

Термін «меметичний алгоритм» був введений Москато [152, 153] як алегорія для моделювання соціальної еволюції (де поведінкові шаблони передаються через меми). Концепція мемів була визначена Докінзом [173] як «одиниця імітації в соціокультурній передачі». Меметичні алгоритми є гібридними, оскільки поєднують глобальний пошук (генетичні оператори) та локальний пошук (зазвичай методом градієнтного спуску або іншими методами локального пошуку). Меметичні алгоритми зазвичай використовують генетичні оператори, такі як селекція, кросовер і мутація, для генерації нових рішень. Після застосування генетичних операторів меметичні алгоритми проводять локальний пошук для покращення знайдених рішень. Локальний пошук виконується на основі поточних рішень, отриманих в результаті генетичних операцій.

Ще один гібридний метод глобального пошуку (GlobalSearch) базується на множинному запуску оптимізації, що робить його ефективним при використанні паралельних обчислень. Метод GlobalSearch 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. 1.5 [82].

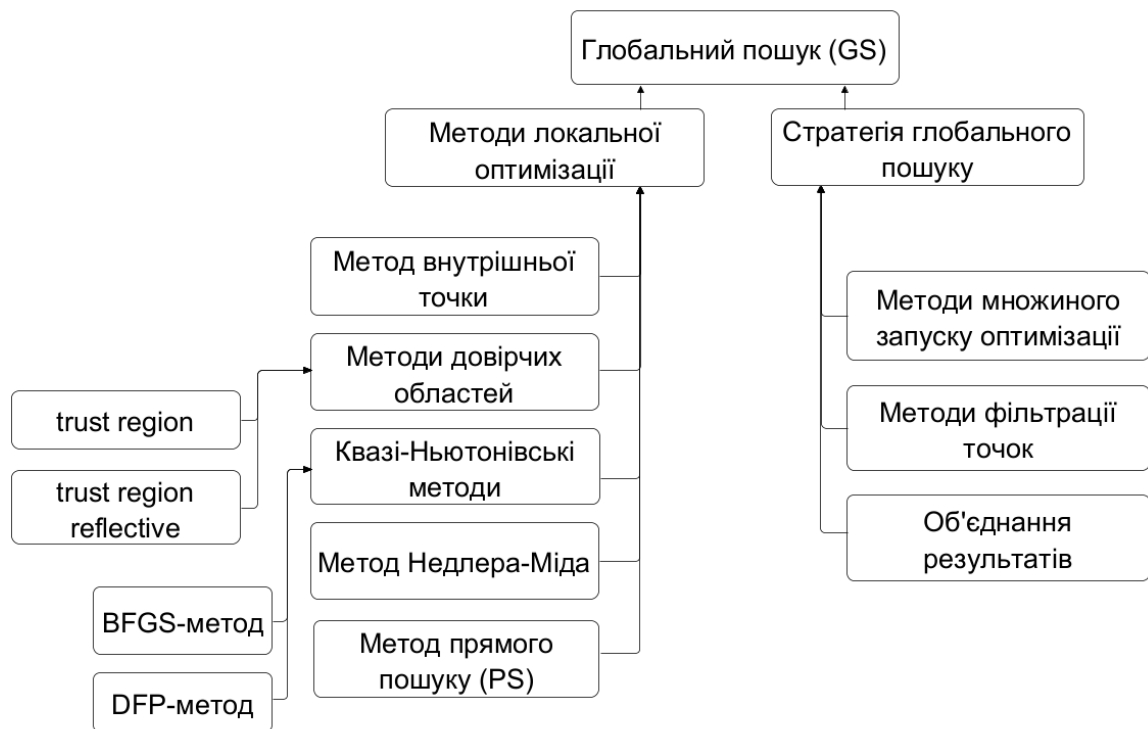


Рис. 1.5. Загальна схема глобальної оптимізації на основі GlobalSearch

Коротко охарактеризуємо основні складові стратегії глобального пошуку.

Метод множинного запуску.

Алгоритм розпочинає локальні оптимізації з багатьох різних початкових точок. Це класичний підхід, який забезпечує покриття великої області пошуку та підвищує ймовірність знаходження глобального мінімуму. Для кожної початкової точки використовується локальний оптимізатор, наприклад, метод довірчих областей (trust-region) або метод Ньютона [9, 11, 163, 226].

Метод фільтрації початкових точок.

Використовується для відбору найбільш перспективних початкових точок для локальної оптимізації. Відсікаються точки, які не мають великого потенціалу для знаходження глобальних мінімумів. Це дозволяє зменшити кількість запусків локальної оптимізації, зосереджуючись на найбільш важливих точках.

Методи локальної оптимізація.

Після фільтрації проводиться локальна оптимізація на основі обраних початкових точок. Використовуються класичні методи локальної оптимізації для знаходження локальних мінімумів.

Об'єднання результатів.

Після завершення виконання процедур методів локальних оптимізацій результати об'єднуються для визначення найкращого (глобального) мінімуму.

Даний метод реалізований в ППП MATLAB [10], що уможлиблює його адаптацію до інтервальної постановки задачі оптимізації та інтеграцію в програмні засоби моделювання статичних систем з нелінійними характеристика на основі аналізу інтервальних даних.

1.3. Аналіз умов застосування методів глобальної оптимізації для задач ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

Класифікація алгоритмів оптимізації, яку розглянуто вище, охоплює широкий спектр методів оптимізації, що можуть застосовуватися до вирішення оптимізаційних задач ідентифікації параметрів та структури інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Проте представлені підходи складають лише незначну частину від усієї множини доступних методів. У цьому пункті ми розглянемо основні питання, які впливають на обчислювальну складність процедур оптимізації при вирішення оптимізаційних задач ідентифікації параметрів та структури інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками.

Деякі чинники стосуються глобальної оптимізації в цілому (наприклад, мультимодальність), інші застосовуються спеціально до еволюційних алгоритмів (наприклад, епістаз і нейтральність) [227].

У контексті оптимізації параметрів та структури інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, важливо розуміти, що вибір алгоритму оптимізації значною мірою залежить від складності цільової функції та розмірності задачі. Розглянемо основні проблеми, з якими можуть зіткнутися при виборі алгоритмів, тобто складність цільової функції та розмірність задачі.

Розмірність оптимізаційної задачі.

Ступінь складності розв'язання оптимізаційної задачі за допомогою конкретного алгоритму тісно пов'язаний з її обчислювальною складністю, тобто з кількістю ресурсів, таких як час і пам'ять, необхідних для цього. Обчислювальна складність залежить від кількості вхідних елементів, необхідних для застосування алгоритму. Зокрема структурна ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками належить до найскладніших задач класу NP, який включає всі задачі прийняття рішення, що можуть бути розв'язані за поліноміальний час на недетермінованих машинах Тюрінга. Один із підходів до отримання близьких до оптимальних рішень для задач із класу NP за прийнятний час полягає у застосуванні метаевристичних та стохастичних процедур оптимізації.

Зі збільшенням кількості параметрів інтервальної моделі (високою розмірністю задачі) ефективність пошукових методів може знижуватися через експоненційне зростання обчислювальних витрат. Це вимагає використання алгоритмів, які можуть ефективно працювати в умовах високої розмірності, наприклад, методів, заснованих на обчисленнях для великих просторів пошуку або застосуванні стохастичних підходів.

Складність цільової функції

Як відомо, алгоритми оптимізації керуються цільовими функціями [227]. В цьому контексті цільова функція є складною з математичної точки

зору, якщо вона не є неперервною, не є диференційованою або якщо вона має велику кількість максимумів і мінімумів.

Неперервність і диференційованість. Якщо цільова функція є неперервною та диференційованою, то можуть бути застосовані методи, що використовують інформацію про її градієнт. Проте для випадків з не диференційованими функціями або наявності розривів потрібні інші підходи, наприклад, методи глобальної оптимізації або еволюційні алгоритми.

Наявність численних локальних екстремумів. При наявності мультимодальності, коли цільова функція має багато локальних максимумів і мінімумів, алгоритм може застрягнути в одному з них, не досягнувши глобального оптимуму. Тому необхідно використовувати методи, здатні виходити з локальних мінімумів, наприклад, гібридні методи та методи ройового інтелекту.

В оптимізації використовують поняття «ландшафту» цільової функції (fitness landscape). На рисунках 1.6 та 1.7 наведено класичні ознаки складності цільової функції, що впливає на роботу оптимізаційних алгоритмів, а відповідно і на можливість їх ефективного застосування [227].

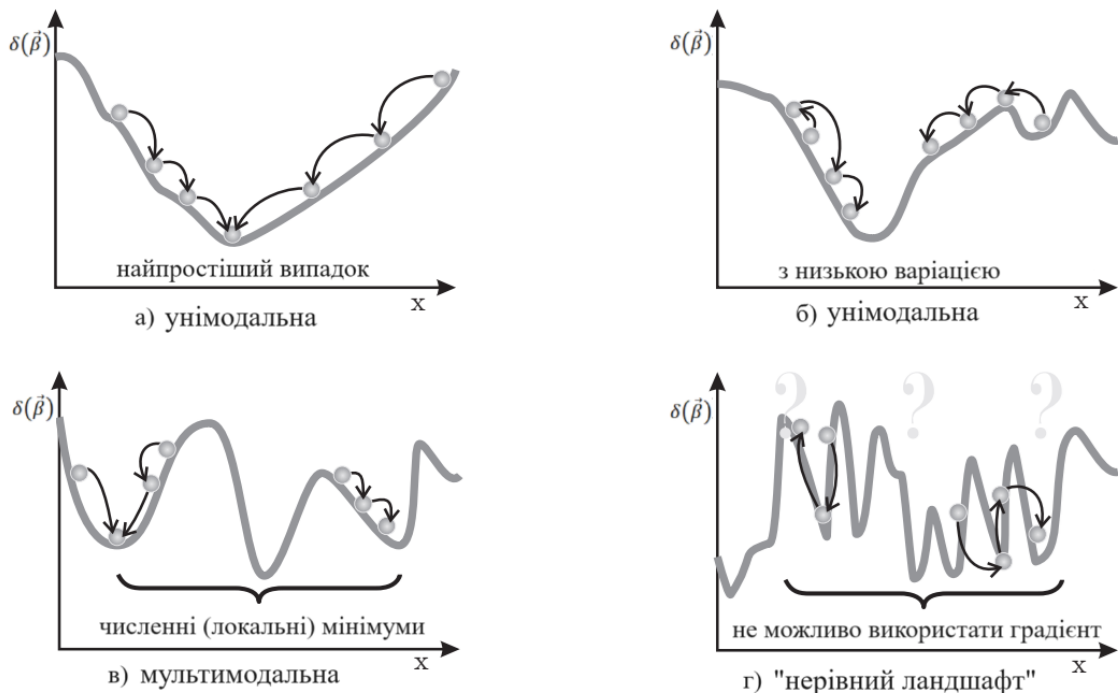


Рис. 1.6. Ілюстрація ознак характеристики складності цільової функції [227]

Рисунок 1.6. ілюструє такі характеристики, як модальність (наявність локальних мінімумів). Відповідно найпростішим випадком для оптимізації є унімодальні цільові функції (рис. 1.6.а. та 1.6.б). Мультимодаьні функції ускладнюють роботу оптимізаційних процедур, оскільки вимагають здатності досліджувати всю область задачі для уникнення локальних мінімумів (рис. 1.6.в. та 1.6.г). В цих випадках необхідно застосовувати стратегії глобального пошуку з використанням евристик та метаевристик.

Іншими ознаками, що ускладнюють процес оптимізації є нейтральні ділянки, які призводять до утруднення збіжності методів оптимізації, та наявність розривів (рис. 1.7.). В першому випадку необхідно оптимізувати систему критеріїв зупинки для зменшення ітерацій оптимізації, а в другому – також застосовувати стратегії глобального пошуку.

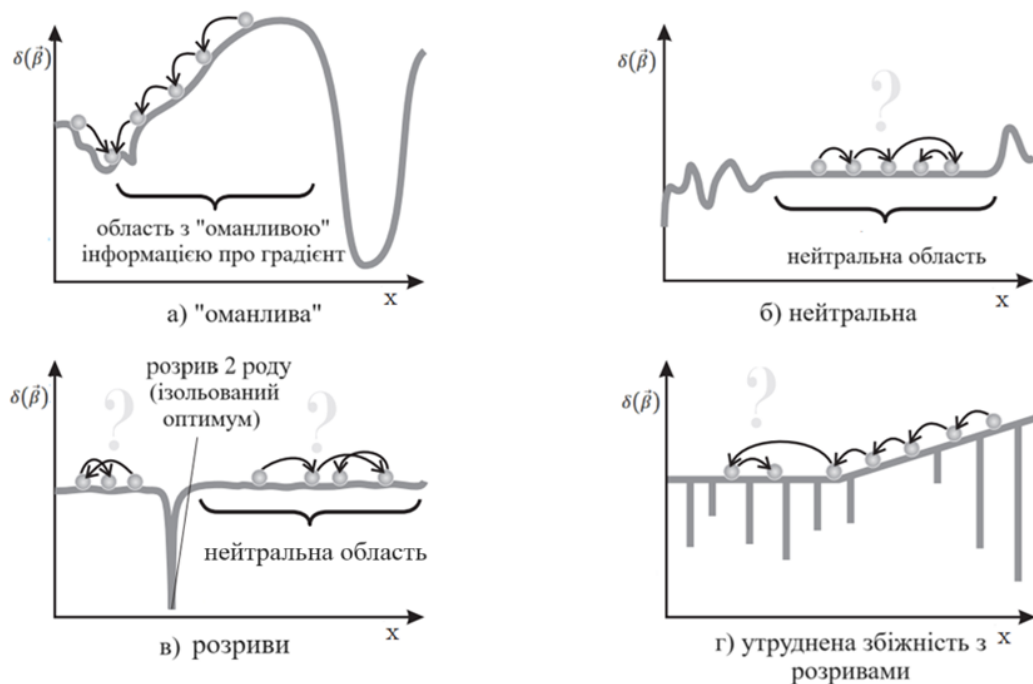


Рис. 1.7. Ілюстрація ознак характеристики складності цільової функції

У багатьох реальних додатках метаевристичної оптимізації характеристики цільових функцій зазвичай невідомі заздалегідь. Найчастіше операції оптимізаційних процедур базуються на запозичені досвіду, емпіричних правил та результатів, заснованих на моделях, отриманих з суміжних областей досліджень, таких як біологія. В ході оптимізації в якості

показників складності «ландшафтів» цільових функцій (або їх загальної складності) запропоновано багато різних метрик. Наведемо декілька з них.

Weinberger [70] запропонував автокореляційну функцію та кореляційну довжину випадкових блудів.

Автокореляційна функція $\rho(d)$ вимірює кореляцію між значеннями цільової функції $f(x)$ на відстані d :

$$\rho(d) = \frac{E[f(x)f(x+d)] - E[f(x)]E[f(x+d)]}{D^2[f(x)]}, \quad (1.23)$$

де $E[f(x)]$ – математичне сподівання та $D^2[f(x)]$ – дисперсія цільової функції $f(x)$.

Кореляційна довжина τ визначається як відстань, на якій автокореляція спадає до $\frac{1}{\varepsilon}$:

$$\tau = -\frac{1}{\log \rho(d)}. \quad (1.24)$$

Джонсом та Форрестом (Jones, Forrest) [212, 213] було запропоновано оцінку кореляції фітнесу та відстані C_{FD} , як кореляцію значення цільової функції для індивіду (претендента) та його відстані до глобального оптимуму. Кореляція фітнес-відстань є мірою складності цільової функції оптимізаційної задачі для генетичних алгоритмів. C_{FD} вимірює кореляцію між значеннями цільової функції на основі індивіда, що досліджується, та відстанню до мети пошуку.

Кореляційний коефіцієнт r розраховується як:

$$r = \frac{C_{FD}}{\sigma_F \sigma_D}, \quad (1.24)$$

де

$$C_{FD} = \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})(d_i - \bar{d}), \quad (1.24)$$

C_{FD} є коваріацією між множиною оцінок цільової функції на основі претендентів $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ та множиною $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ – відповідні відстані цих точок до оптимального розв'язку, а σ_F, σ_D – стандартні відхилення та \bar{f}, \bar{d} – середні значення F і D , відповідно.

Цей показник був розширений такими дослідниками, як Clergue та ін. [133, 125].

Коефіцієнт негативного нахилу (Negative Slope Coefficient, NSC) запропонований Vanneschi та ін. [126, 127] є мірою складності задачі оптимізації, яка пов'язана з евольвованістю (здатністю знаходити нові рішення, які кращі за попередні) та складністю цільової функції. Він використовується для аналізу розподілу значень цільової функції (фітнесу) щодо різних індивідів у просторі пошуку.

Коефіцієнт негативного нахилу визначається за формулою:

$$NSC = \sum_{i=1}^{k-1} \min(0, P_i), \quad (1.25)$$

де для обчислення нахилу P_i цільової функції в просторі, який розбивається на k сегментів, використовують формулу:

$$P_i = \frac{N_{i+1} - N_i}{M_{i+1} - M_i}, \quad (1.25)$$

де N_i, N_{i+1} – середні значення індексів індивідів, що з'єднують сегменти, M_i, M_{i+1} – середні значення цільової функції відповідно

Якщо всі нахили додатні або нульові, це означає, що розподіл фітнесу зростає або є постійним. Це інтерпретується як легка задача, де кожне нове покоління ймовірно має кращий фітнес. Наявність від'ємних нахилів свідчить про складність задачі. Чим більше від'ємне значення NSC, тим складніша задача, оскільки існують області простору пошуку, де фітнес зменшується, що може ускладнювати знаходження глобального оптимуму. NSC є важливим показником складності задачі оптимізації та «ландшафту» цільової функції.

Він дозволяє оцінити, наскільки складно буде знаходити кращі рішення на кожному етапі оптимізаційного процесу.

Диваком М.П. [53, 59], запропоновано метрику, яка використовується для визначення кількості генів для формування нового індивіда в обчислювальних процедурах оптимізації на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії. Дана метрика базується на аналізі значень цільової функції та може характеризувати складність оптимізаційної задачі:

$$n_s = \begin{cases} \text{int} \left(\left(1 - \frac{\min\{\delta(\lambda_s) | s = 1 \dots S\}}{\delta(\lambda_s)} \right) \cdot m_s \right), \\ \text{if } \delta(\lambda_s) \neq \min\{\delta(\lambda_s) | s = 1 \dots S\} \text{ and } n_s \neq 0; \\ 1, \text{ if } \delta(\lambda_s) = \min\{\delta(\lambda_s) | s = 1 \dots S\} \text{ or } n_s = 0, \end{cases} \quad (1.26)$$

де m_s – загальна кількість генів для поточного індивіда.

В загальному випадку складність «ландшафту» цільової функції можна спрогнозувати на основі складності генів. Для задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками – це базисні нелінійні функції. В оптимізації використовують термін «епістаз», що означає залежність внеску одного гена у значення цільових функцій від алельного стану інших генів [227].

На рисунку 1.8 наведено вплив структурного елемента на складність цільової функції оптимізаційної задачі (1.19-1.21).

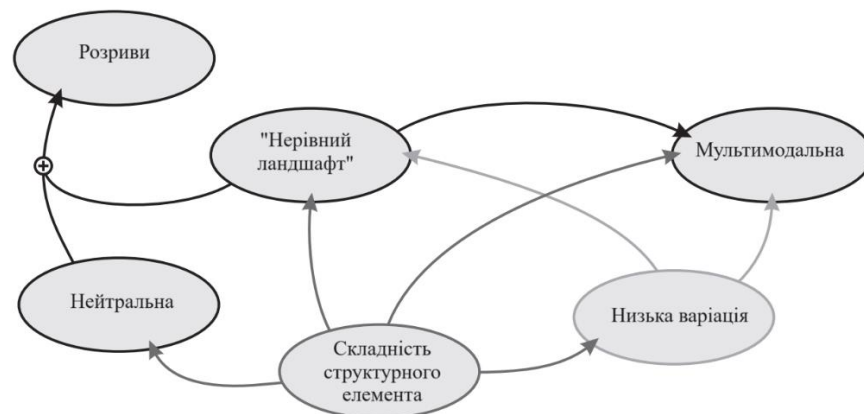


Рис. 1.8. Ілюстрація впливу структурного елемента на складність цільової функції

Відповідно на основі відомого структурного елемента (характеру нелінійності базисної функції) можна зробити висновок про складність цільової функції та найбільш придатний метод оптимізації за цих умов, що може бути основою вибору ефективних методів оптимізації.

На рисунку 1.9 наведено приклади можливої складності цільової функції в залежності від додавання структурного елемента в поточне рішення.

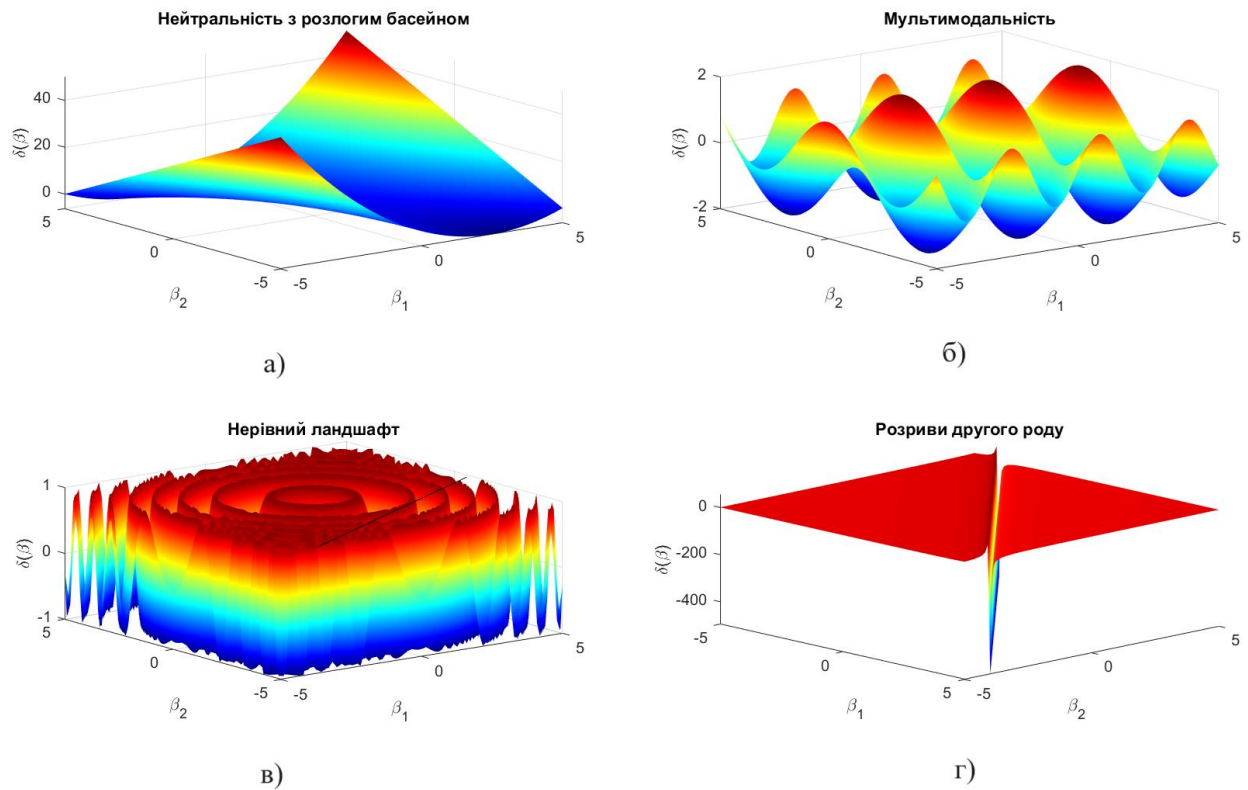


Рис. 1.9. Ілюстрація складності цільової функції в залежності від включення структурного елемента

Нейтральна область з розлогим басейном спричинена додаванням лінійного структурного елемента $\{\beta \cdot x\}$ (рис. 1.9.а). Мультимодальність цільової функції забезпечує вплив структурного елемента тригонометричного базису $\{\beta \cdot \cos(x), \beta \cdot \sin(x)\}$ (рис. 1.9.б). Наявність високочастотної складової для елементів тригонометричного базису $\{\beta_1 \cdot \cos(\beta_2 \cdot x), \beta_1 \cdot \sin(\beta_2 \cdot x)\}$ спричинює «нерівний ландшафт» цільової функції. Відповідно

«ландшафт» з розривами може формуватися на основі структурних елементів такого типу $\left\{ \frac{\beta_1}{\beta_2 - x} \right\}$ (рис. 1.9.г).

В цілому процес вирішення оптимізаційних задач (1.11-1.12) та (1.19-1.21) проілюстровано на рисунку 1.10. З точки зору просторів, які використовуються для оптимізації.

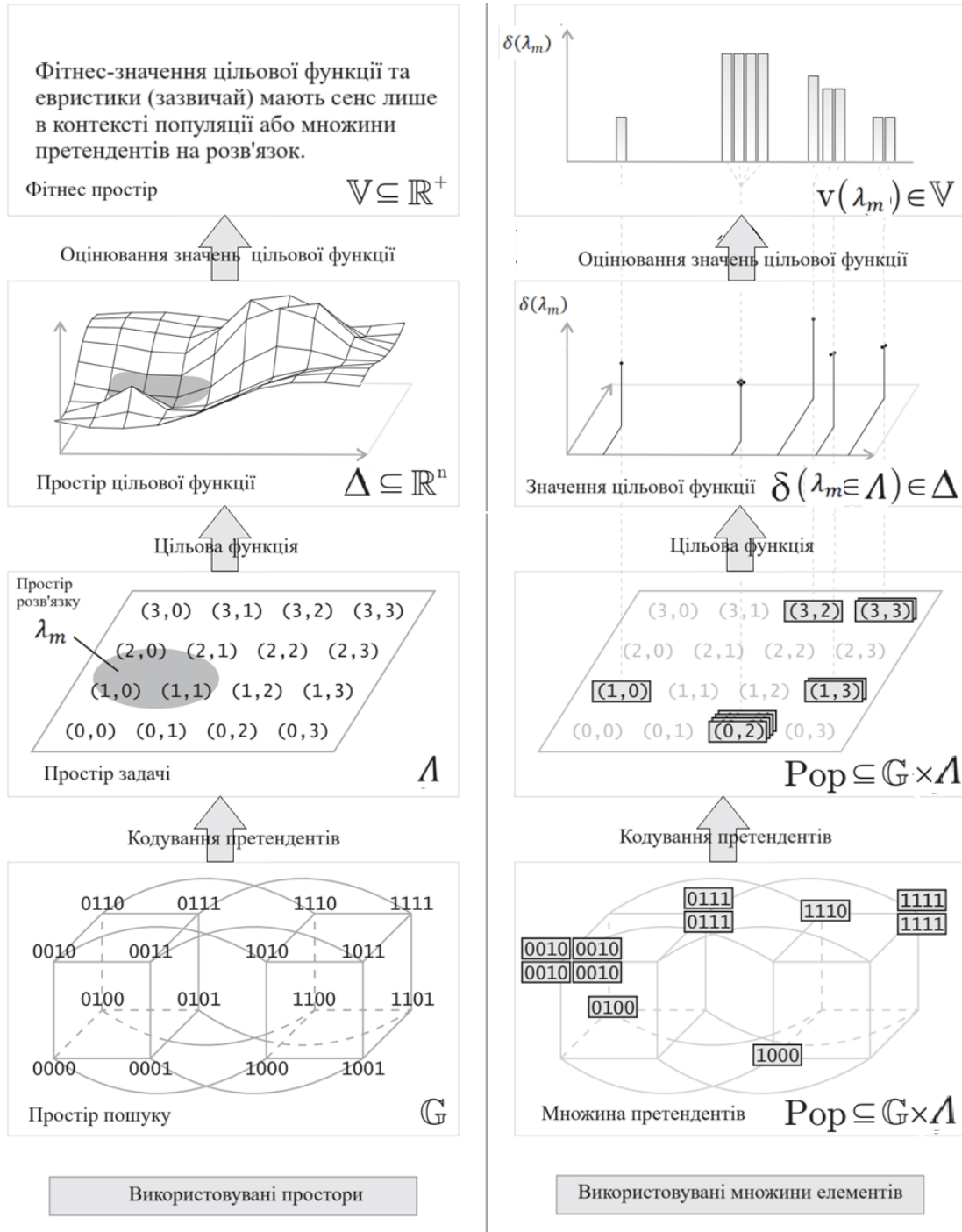


Рис. 1.10. Структура процесу оптимізації в контексті ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

1.4. Огляд сучасних засобів підтримки процесів моделювання із використанням онтологічного підходу

Онтологічні описи є ефективним інструментом для формалізації знань та їх програмної реалізації в різних прикладних програмних середовищах [12, 24, 30, 33, 37, 54, 91]. Ця характеристика відіграє ключову роль у виборі засобів для реалізації онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних.

Під математичними знаннями розуміють різні компоненти математичної науки, такі як теореми, леми, аксіоми, докази тощо. Термін «знання з математичного моделювання» охоплює широкий спектр знань, які формалізуються як у межах конкретної математичної моделі, так і в процесі її побудови, а також включає процедури їх практичного застосування. На відміну від інших форм знань, таких як правила або дерева рішень, математичні знання мають більш абстрактну та структуровану природу [84, 90].

Онтологічний підхід до математичного моделювання зазвичай передбачає використання онтології для опису термінів і взаємозв'язків, пов'язаних з основними процесами моделювання. Однак цей підхід не дозволяє безпосередньо керувати процесами створення математичних моделей, оскільки він зосереджується на описі області математичного моделювання.

З прикладної точки зору, більшість форм математичних знань або інтегровані в конкретні програмні засоби, такі як моделі роботи агрегатів в імітаційному програмному забезпеченні, або потребують формальної інтерпретації в загальні математичні інструменти з дотриманням відповідних синтаксичних правил. Такі знання зазвичай стосуються конкретних завдань моделювання та реалізуються через відповідні процедурні описи, на відміну від декларативних представлень, характерних для філософського підходу до математичного моделювання.

Проте використання існуючих програмних засобів не завжди є достатнім як для дослідників, так і для практиків, оскільки онтологія процесу часто прихована в процедурах і модулях конкретних програмних продуктів. Така специфіка значно обмежує можливості практичного застосування цього інструментарію.

Розглянемо сучасний стан використання онтологій для побудови математичних моделей типу «чорної скриньки», які спрямовані на структурування знань і формалізацію методів, що використовуються для моделювання систем, де внутрішні механізми невідомі або не розглядаються. Такі онтології можуть включати концепції, методи та інструменти, що використовуються для створення і оцінки моделей «чорної скриньки».

Прикладом такої онтології може бути OntoDM (Ontology for Data Mining) [154], яка охоплює концепції, пов'язані з даними та методами їх аналізу, включаючи моделі «чорної скриньки». Вона описує елементи, такі як алгоритми, типи моделей, та оцінки якості. Ще одним прикладом можна назвати EXPO (Ontology for Scientific Experiments) [201], яка може використовуватися для структурування знань про експерименти з моделями «чорної скриньки», включаючи експериментальні установки та результати. Також варто відзначити середовище «SmartOntologyModeler», яке призначене для моделювання складних об'єктів на основі інтервальних даних [51, 54].

Проаналізуємо детальніше дані онтології та прикладні аспекти їх застосування.

OntoDM – онтологія, розроблена для формалізації знань у галузі аналізу даних і, зокрема, для структурування понять, методів і процесів, пов'язаних із видобуванням даних. Вона служить основою для забезпечення семантичної інтероперабельності між різними системами та інструментами в цій області. OntoDM забезпечує стандартизовану термінологію для опису концепцій і методів видобування даних, що сприяє кращому розумінню та комунікації між дослідниками та практиками. Онтологія формалізує знання в галузі аналізу даних, що дозволяє автоматизувати багато аспектів цього процесу, таких як

класифікація методів, опис експериментальних установок, оцінка результатів тощо. Завдяки формалізованому представленню знань, OntoDM сприяє повторному використанню методів і моделей у різних контекстах і дослідженнях.

OntoDM містить детальний опис різних методів видобування даних, таких як класифікація, кластеризація, регресія, і алгоритмів, які реалізують ці методи. Також включає поняття, пов'язані з типами даних, структурами даних, і джерелами даних, що використовуються у видобуванні даних. Забезпечує опис метрик і критеріїв для оцінки точності моделей видобування даних. Описує етапи та процеси видобування даних від підготовки даних до вибору та налаштування моделей, їх оцінки та інтерпретації результатів.

Основні функція запропонованої онтології це – структурування наукових досліджень в області аналізу даних, забезпечення відтворюваності експериментів і автоматизації процесів дослідження. Також надає можливість компаніям стандартизувати процеси видобування даних, зокрема, у великих системах, де важлива інтеперабельність між різними командами та інструментами. Крім того, використовується як ресурс для навчання студентів і спеціалістів основ видобування даних та пов'язаних методів.

Основними класами онтології описуються такі поняття, як задача добування даних, класифікація, кластеризація, асоціативні правила, регресія тощо. Взаємодія між класами включає такі відношення, як «застосовує» (applies), «генерує» (generates), «використовує" (uses), що описують взаємодії між різними компонентами системи.

OntoDM є важливим інструментом для формалізації знань у сфері видобування даних і підтримки процесів, пов'язаних із аналізом даних. Вона забезпечує базу для розробки стандартів і методологій, спрямованих на покращення якості та ефективності видобування даних у різних галузях. На рис. 1.11 наведено представлення задачі видобування даних в OntoDM.

EXPO (Ontology for Scientific Experiments) – онтологія, яка розроблена для опису та формалізації наукових експериментів. Вона забезпечує

структурований спосіб представлення знань про різні аспекти наукового дослідження, включаючи методології, обладнання, дані, результати та інтерпретацію.

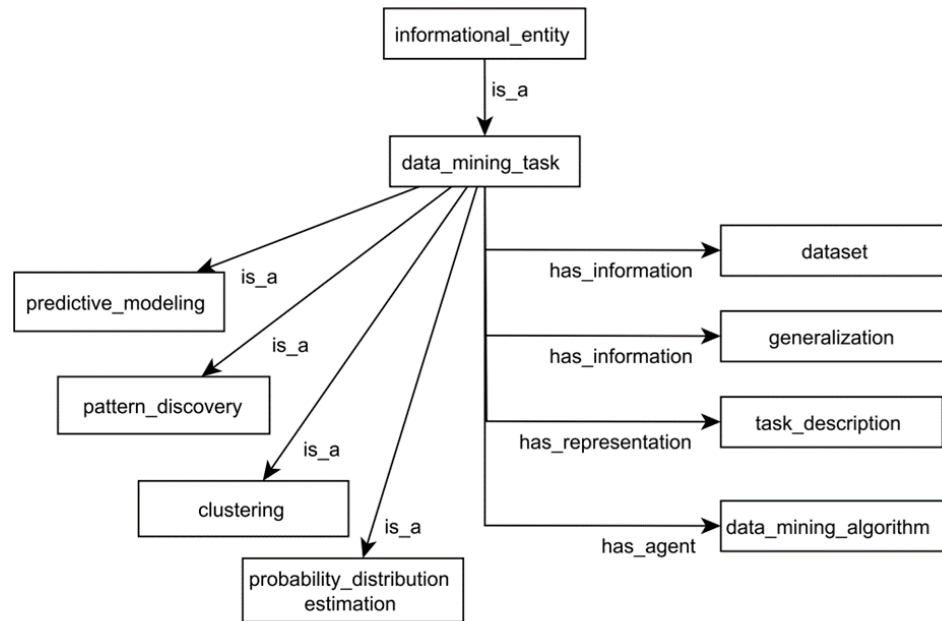


Рис. 1.11. Представлення задачі видобування даних в OntoDM [154]

EXPO спрямована на забезпечення стандартизованого способу опису різних компонентів наукового експерименту, що дозволяє дослідникам спільно та повторно використовувати дані та результати експериментів. EXPO підтримує автоматизацію процесів аналізу даних, обробки результатів та їх інтерпретації, зменшуючи людський фактор у повторюваних завданнях. Сприяє підвищенню відтворюваності наукових експериментів та забезпечує прозорість наукових процесів.

EXPO дозволяє деталізувати різні елементи наукового експерименту, включаючи цілі, гіпотези, методи, використовувані матеріали та обладнання, процедури збору даних і аналізу. Онтологія дозволяє моделювати різні етапи наукового експерименту: від планування до проведення і звітування про результати. Підтримує семантичну інтероперабельність між різними науковими системами та інструментами, забезпечуючи можливість спільного використання та інтеграції даних. EXPO може бути використана для

автоматизації процесів аналізу та візуалізації даних, покращуючи інтерпретацію та представлення результатів.

EXPO є потужним інструментом для формалізації та стандартизації опису наукових експериментів, забезпечуючи інтеоперабельність і підтримку автоматизації в наукових дослідженнях. Вона сприяє підвищенню якості наукових робіт та спрощує процес обміну знаннями між дослідниками. EXPO використовується для опису та документації наукових експериментів у різних галузях науки, таких як фізика, біологія, хімія, соціальні науки тощо. Підтримка процесів дослідження та розробки в індустрії, включаючи стандартизацію методологій, використання лабораторного обладнання та аналізу даних. Також використовується як навчальний інструмент для студентів і молодих дослідників, допомагаючи їм зрозуміти структуру та компоненти наукового експерименту. Онтологія включає такі поняття, як «експеримент (experiment)», «гіпотеза» (hypothesis), «метод» (method), «дані» (data), «обладнання» (equipment), «результати» (results) та відношення, такі як «використовує» (uses), «генерує» (generates), «підтверджує» (supports), що пов'язують різні компоненти експерименту.

В контексті експериментів, що описуються за допомогою EXPO, можуть бути використані статистичні методи, такі як регресійний аналіз, кластерний аналіз, дисперсійний аналіз (ANOVA) та моделі машинного навчання. Також можливе використання математичних моделей для моделювання динамічних систем і процесів, опису систем, що містять випадкові процеси та методів аналізу даних, часових рядів та обробки сигналів. EXPO описує як такі моделі та методи можуть бути інтегровані в структуру наукового експерименту, які дані для них потрібні, як вони застосовуються і які результати можуть бути отримані.

Прикладом застосування онтології є EXPO-RS (робот-науковець) – це фізично реалізована роботизована система, яка застосовує методи штучного інтелекту для проведення циклів наукових експериментів [201]. Робот-науковець автоматично створює гіпотези для пояснення спостережень,

розробляє експерименти для перевірки цих гіпотез, фізично проводить експерименти з використанням лабораторних роботів, інтерпретує результати і потім повторює цикл. Фрагмент опису експерименту робота-науковця за допомогою EXPO-RS проілюстровано на рис. 1.12.

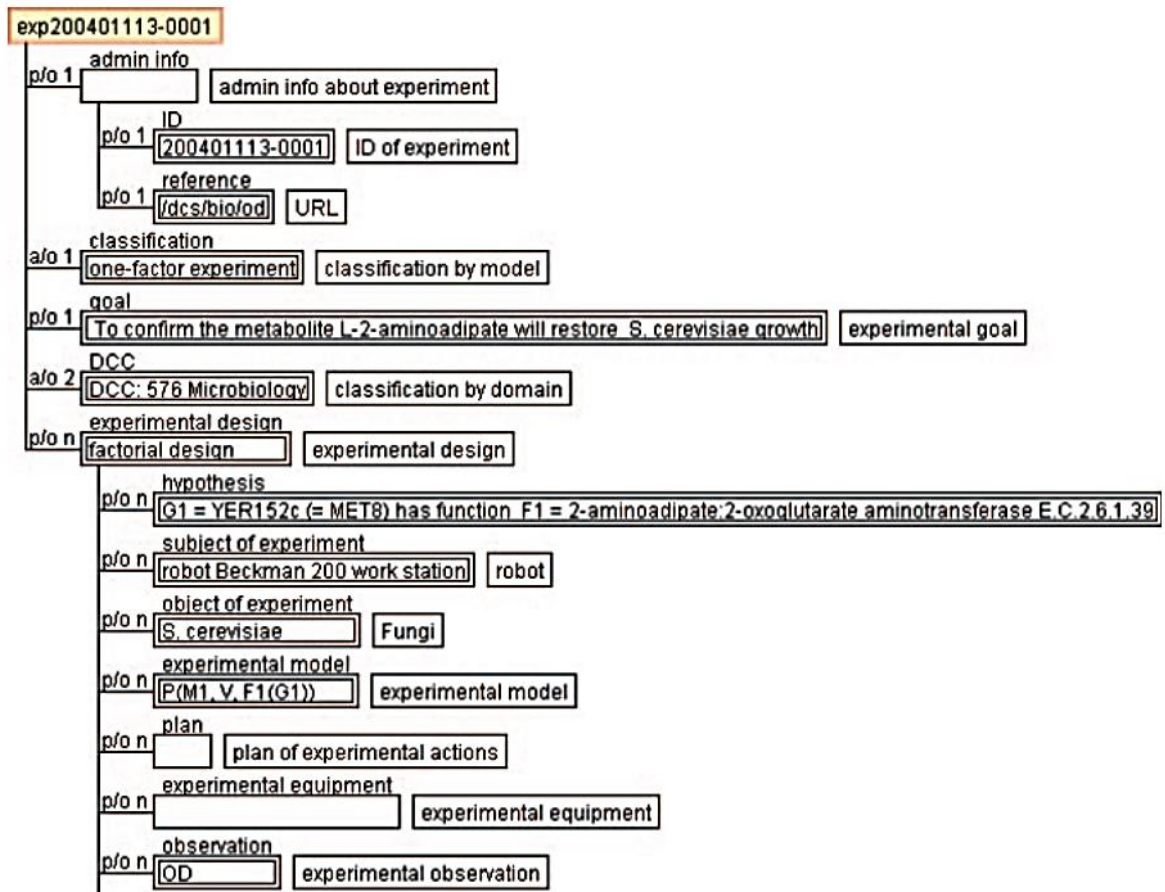


Рис. 1.12. Опис експерименту робота-науковця за допомогою EXPO-RS [201]

До недоліків та складності використання розглянутих онтологій можна віднести постійну необхідність оновлення онтології з урахуванням нових методів і технологій, що з'являються в науці та забезпечення сумісності з іншими онтологіями та стандартами, які використовуються в суміжних областях, таких як біоінформатика, фізика, екологія тощо.

В працях [51, 54] описано онтологію математичного моделювання на основі інтервальних даних, яка дозволяє розширити можливість дослідників об'єктів різної природи, дані з яких отримують в інтервальному вигляді, а

також практиків при застосуванні для моделювання процесів в медичній галузі, галузі екологічного моніторингу та інших.

У запропонованому онтологічному підході для представлення понять, методів та засобів математичного моделювання на основі інтервальних даних, а саме декларативної та процедурної частин, математичні знання відокремлені [51, 54]. Декларативна частина складається з понять, які описують процеси побудови моделі, результати моделювання та математичних описів моделі. Процедурна частина описує відповідні методи та алгоритми їх реалізації, процедури ініціалізації змінних та їх інтерпретації.

На рисунку 1.13 показано взаємозв'язок між декларативною та процедурною частинами знань, що накопичуються в процесі математичного моделювання на основі інтервальних даних у межах запропонованого онтологічного підходу.

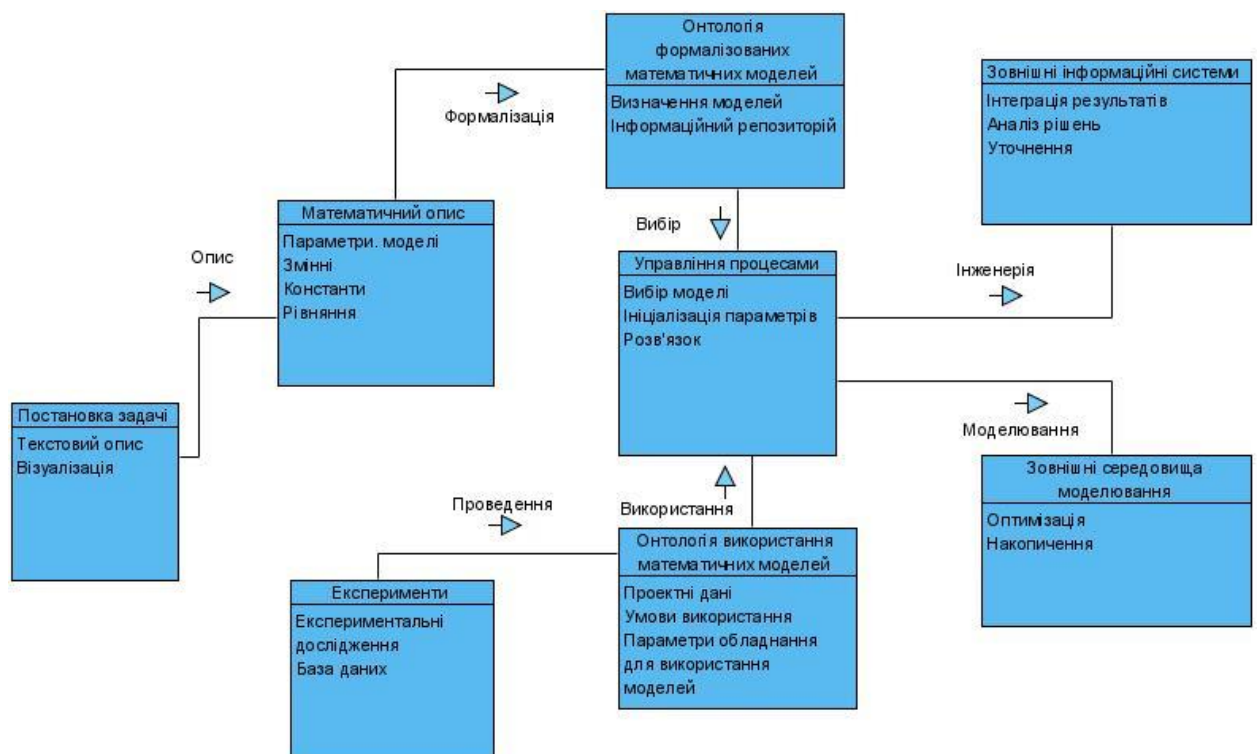


Рис. 1.13 Загальна схема реалізації онтологічного підходу для математичного моделювання на основі інтервальних даних [54]

Декларативна частина цього підходу включає онтологію формалізованих математичних моделей (декларативну онтологію), яка

охоплює визначення моделей та інформаційний репозиторій. Онтологія використання моделей (операційна онтологія) містить проектні дані, умови експлуатації та параметри обладнання, необхідні для реалізації моделей. Онтологічний опис моделі складається з класів, кожен з яких має атрибути та екземпляри. Наприклад, клас рівнянь позначає рівняння моделі (такі як інтегральні рівняння, алгебраїчні рівняння або функції), параметри моделі, залежні та незалежні змінні, а також універсальні класи констант. Усі ці атрибути класу моделі фактично описують знання про модель інтуїтивно зрозумілим і явним чином, що робить представлення моделі більш систематизованим, комп'ютерно-інтерпретованим та узагальненим за своєю суттю.

Особливість пропонованого підходу є те, що компоненти, створеної таким чином моделі, є повністю повторно використовуваними, тобто рівняння, змінні, припущення з однієї моделі можуть бути використані повторно під час створення іншої моделі, або сформована база математичних моделей може бути повторно використана в процесі інтерпретації в інших інформаційних системах [51]. Таким чином, процес створення математичних моделей та їх практичне використання стає більш інтуїтивно зрозумілим та орієнтованим на користувача, який не дуже орієнтується в самому процесі моделювання у порівнянні з існуючими підходами. Кожна модель у цьому підході є конкретним екземпляром класу онтології.

Слід зазначити, що основним недоліком розглянутої онтології є слабка семантична інтероперабельність з точки зору інтеграції та використання методів оптимізації зовнішніх середовищ моделювання. Онтологія переважно орієнтована на внутрішні методи побудови моделей, що обмежує її здатність ефективно взаємодіяти з зовнішніми системами та алгоритмами. Це може створювати труднощі при спробі використовувати зовнішні алгоритми оптимізації або моделі, розроблені в інших середовищах, через несумісність форматів даних, відмінності в термінології або відсутність відповідних перетворювачів. Така обмеженість може призводити до втрати інформації або

вимагати додаткових зусиль для налаштування і адаптації моделей, що знижує ефективність процесу оптимізації та моделювання в цілому.

Висновки до розділу 1

1. Розглянуто 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 одного розв'язку цієї системи отримують оптимізаційну задачу з нелінійною дискретною цільовою функцією, що 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 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.

2. 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 евристичні дослідження глобального простору пошуку та ефективні методи локальної оптимізації.

3. 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 інтегрованими з точки зору інтеграції стандартних 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.

РОЗДІЛ 2.

МЕТОДИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ БАГАТОВИМІРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

За результатами досліджень у попередньому розділі встановлено основні чинники, що впливають на обчислювальну складність процедур ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Зокрема, одним із основних недоліків відомих методів ідентифікації моделей статичних систем на основі аналізу інтервальних даних є дискретна цільова функція оптимізаційної задачі, яку формують на підставі інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР).

Відповідно подальші дослідження, які наведено у цьому розділі, націлено на урахування можливості спрощення процедур ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, акцентуючись на урахуванні вищезазначеного.

Таким чином, у цьому розділі поставлено задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на підставі введення цільової функції, яку подано у вигляді суми квадратів відхилень між прогнозованими значеннями характеристики та значеннями, заданими на вимірних інтервалах для цієї характеристики. Така функція, залежно від набору базисних функцій у алгебраїчному виразі, який задає математичну модель, у більшості випадків буде диференційованою, що уможливить використання методів та алгоритмів, які базуються на аналізі градієнта цільової функції. Перевагою вибору такого напрямку досліджень є той факт, що такі методи та алгоритми ідентифікації (оптимізації) мають доведену поліноміальну обчислювальну складність.

Результати досліджень у цьому розділі опубліковано автором у працях [46, 48, 49, 53, 57, 66, 134, 275, 260, 274, 278, 280].

2.1. Постановка задачі ідентифікації параметрів інтервальних моделей складних об'єктів з нелінійними характеристиками

Як показав аналіз задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей в першому розділі, основними недоліками параметричної ідентифікації інтервальних моделей є:

- висока обчислювальна складність, обумовлена представленням даних в інтервальному вигляді і відповідно дискретною цільовою функцією оптимізаційної задачі, яку формують на підставі ІСНАР;

- обмеження на застосування традиційних методів оптимізації, таких як градієнтні методи чи методи Ньютона.

Можемо також стверджувати, що другий недолік є певною мірою наслідком першого.

Процедури оптимізації інтервальних моделей мають, як правило, комбінаторну складність. Тому ідентифікація параметрів моделей статичних систем з нелінійними характеристиками у вигляді отриманих числових інтервалів вимагає застосування стохастичних чи метаевристичних методів оптимізації.

З іншого боку, представлення результатів ідентифікації параметрів в інтервальному вигляді також може ускладнювати інтерпретацію та аналіз побудованих моделей, оскільки результати моделювання та прогнозування на основі таких моделей є також з невизначеністю. Варто зауважити, ще одну складність застосування методів аналізу інтервальних даних, а саме – більшість традиційних методів оптимізації не пристосовані для роботи з інтервальними даними, тому вимагають розробки спеціальних алгоритмів.

У випадку достатньо складної конфігурації області розв'язків ІСНАР (1.3), що є типовим для задач ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних, доцільно використовувати оцінки параметрів, які належать області Ω .

Враховуючи наведене вище, необхідно сформулювати задачу ідентифікації точкових оцінок $\vec{\beta}$ параметрів інтервальних моделей статичних систем. При цьому необхідно врахувати можливість застосування традиційних методів оптимізації, що забезпечить у порівнянні з метаевристичними чи стохастичними методами зниження обчислювальної складності процедур ідентифікації параметрів.

Враховуючи, основні етапи параметричної ідентифікації у вигляді оптимізаційної задачі (рис. 2.1), розвиток методів параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем повинен бути зорієнтованим на використання ефективних методів оптимізації, зокрема, градієнтних, які вирізняються поліноміальною складністю процедур оптимізації та є ефективними при багатовимірній оптимізації.



Рис. 2.1. Основні етапи параметричної ідентифікації інтервальних моделей у вигляді оптимізаційної задачі

При цьому в переважній більшості задач як структурної, так і параметричної ідентифікації математичних моделей використовується критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення між результатами експерименту та даними, отриманими на основі математичної моделі.

При інтервальній постановці задачі в сенсі розв'язування ІСНАР (1.3) достатньо знайти хоча б одну модель на основі вектора параметрів $\vec{\beta}$. Тоді

умову належності модельованого значення на основі розв'язку $\vec{\beta}$ експериментальному коридору перепишемо у такому вигляді:

$$\hat{y}_i(\vec{X}_i) \in [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}, \quad (2.1)$$

де

$$\hat{y}_i(\vec{X}_i) = f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i), i = \overline{1, N}, \quad (2.2)$$

Вираз (2.2) означає модель на основі точкового розв'язку $\vec{\beta}$ ІСНАР:

$$y_i^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \leq y_i^+, i = \overline{1, N}, \quad (2.3)$$

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

Сформулюємо основні твердження, що визначають оптимізаційну задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей нелінійних характеристик статичних систем як мінімізацію цільової функції у вигляді різниці квадратичної похибки між модельованими значеннями та деяким значенням в межах експериментальних інтервальних даних.

Твердження 1. Якщо існує хоча б один розв'язок ІСНАР (2.3), то він еквівалентний розв'язку такої задачі:

$$\delta(\vec{\beta}) \xrightarrow{\vec{\beta}, \alpha_i} \min \quad (2.4)$$

$$\alpha_i \in [0, 1], i = \overline{1, N}, \quad (2.5)$$

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

У виразі (2.4), цільова функція $\delta(\vec{\beta})$ формується на основі згортки обмежень, які задає інтервальна система нелінійних алгебраїчних рівнянь (2.3).

Цільова функція є функцією квадратичної похибки у такому вигляді:

$$\delta(\vec{\beta}) = \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right)^2, \quad (2.6)$$

де

$$P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) = \alpha_i \cdot y_i^- + (1 - \alpha_i) \cdot y_i^+, i = \overline{1, N}. \quad (2.7)$$

Твердження 2. Хоча б один розв'язок задачі (2.4-2.5) задовольняє умову:

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

Як бачимо, твердження 2 є достатньою умовою для істинності твердження 1. Тому, здійснивши доведення твердження 2, ми одночасно покажемо справедливість твердження 1.

Доведення твердження 2. Перепишемо, вираз 2.4 із врахуванням рівняння (2.7) для $P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i)$:

$$\delta(\vec{\beta}) = \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}(\vec{X}_i) - (\alpha_i \cdot y_i^- + (1 - \alpha_i) \cdot y_i^+) \right)^2. \quad (2.8)$$

Якщо розв'язок ІСНАР (2.3) існує, то це означає, що виконується умова належності модельованих значень вихідної характеристики до числових інтервалів цієї ж характеристики, отриманих експериментально. Відповідно, це означає, що значення $\hat{y}(\vec{X}_i)$ буде в цьому випадку лінійною комбінацією меж:

$$\hat{y}(\vec{X}_i) = \alpha_i \cdot y_i^- + (1 - \alpha_i) \cdot y_i^+, i = \overline{1, N}, \quad (2.9)$$

Підставимо вираз (2.9) у вираз (2.8), отримаємо:

$$\delta(\vec{\beta}) = \sum_{i=1}^N (\alpha_i \cdot y_i^- + (1 - \alpha_i) \cdot y_i^+ - \alpha_i \cdot y_i^- - (1 - \alpha_i) \cdot y_i^+)^2 = 0.$$

Це підтверджує істинність твердження 2 та відповідно твердження 1.

Запропонований підхід до параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, полягає у приведенні цієї задачі ідентифікації до розв'язування стандартної задачі мінімізації квадратичного відхилення між значеннями модельованої характеристики статичного об'єкта та значеннями, які належать до експериментальних інтервалів. Такий підхід призводить до розширення простору розв'язків оптимізаційної задачі за рахунок введення додаткових коефіцієнтів α у цільову функцію, які забезпечують узгодженість обчислених на основі моделі та експериментальних даних. Таким чином, отримуємо задачу багатовимірної оптимізації з нелінійною багатоекстремальною цільовою функцією.

Варто відзначити, що функція (2.6) переважно не має розривів і є диференційованою. Відповідно, для розв'язку оптимізаційної задачі (2.4, 2.5), доцільно застосовувати градієнтні методи [9, 11].

2.2. Властивості цільової функції в задачі ідентифікації параметрів інтервальних нелінійних моделей статичних систем

Для розробки методів ідентифікації параметрів моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які, як впливає із попереднього параграфа, є оптимізаційними задачами, необхідно дослідити властивості запропонованої цільової функції. А також дослідження можливості застосування градієнтних методів для розв'язування задачі багатовимірної оптимізації (2.4)-(2.5). Проведемо ідентифікацію параметрів моделей на основі відомих тестових функцій, які будуть задавати дані та структуру моделі та мають нелінійний характер. Щоб розглянути різні випадки складності

оптимізаційної задачі (2.4)-(2.5) та конвергенції до мінімуму цільової функції (2.4) було використано тестові функції різної складності [79], зокрема:

- унімодальні (рис. 2.2):

- функція сфери (Sphere function), F_1 :

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2, x_i \in [-100, 100];$$

- функція Швевеля (Schwefel's function), F_2 :

$$F_2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2, x \in [-100, 100];$$

- функція Розенброка (Rosenbroc function), F_3 :

$$F_3(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right], x \in [-30, 30];$$

- мультимодальні (рис. 2.3):

- функція Растрігіна (Rastrigin's function), F_4 :

$$F_4(x) = -20e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + 20 + e,$$

$$x \in [-32,768, 32,768];$$

- функція Еклі (Ackley's function), F_5 :

$$F_5(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10\cos(2\pi x_i) + 10), x \in [-5, 5];$$

- мультимодальні з фіксованою розмірністю вхідних даних (рис. 2.4):

$$F_6(x) = \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2, x \in [-5, 5];$$

$$F_7(x) = 4x_1^2 - 2,1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4, x \in [-1, 1].$$

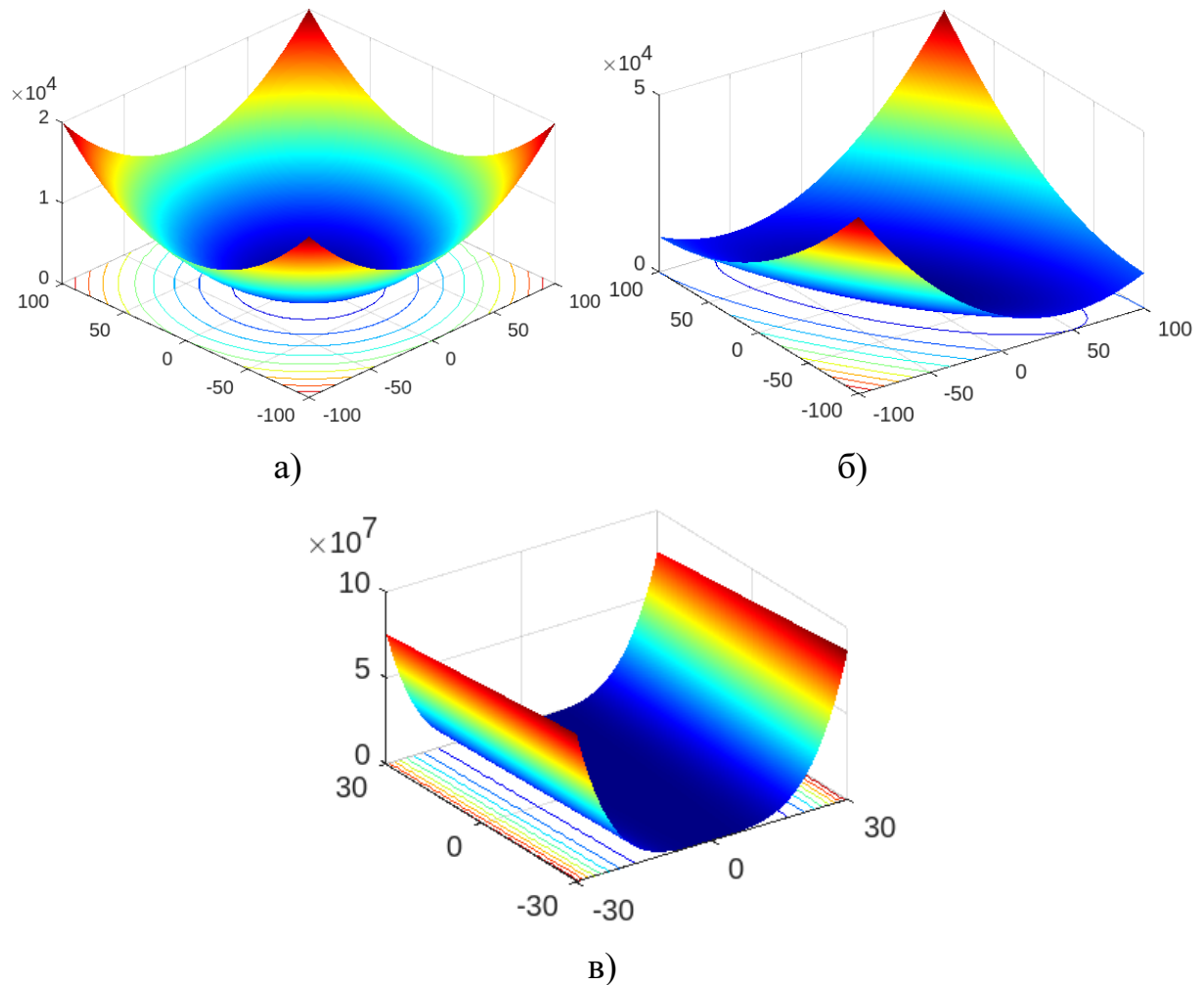


Рис. 2.2. Унімодальні тестові функції: а) – функція сфери, б) – функція Швевеля, в) – функція Розенброка

Тепер актуальним є питання вибору обчислювальних засобів для проведення чисельних експериментів параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем на основі багатовимірної оптимізації.

Порівняльні характеристики засобів Global Optimization Toolbox ППП MATLAB [82] на прикладі пошуку глобального мінімуму функції Растрігіна для двовимірного випадку наведено в таблиці 2.1.

Global Optimization Toolbox крім засобів класичної оптимізації на основі похідних містять метаевристичні алгоритми, такі як генетичні, ройові, випадкового пошук та ін. Генетичні алгоритми (ga) використовують набір

вихідних точок (популяцію) і ітеративно здійснюють селекцію кращих розв'язків. Популяція може мігрувати на ділянках тяжіння до оптимуму, відповідно га може згенерувати розв'язок на основі кращого з них.

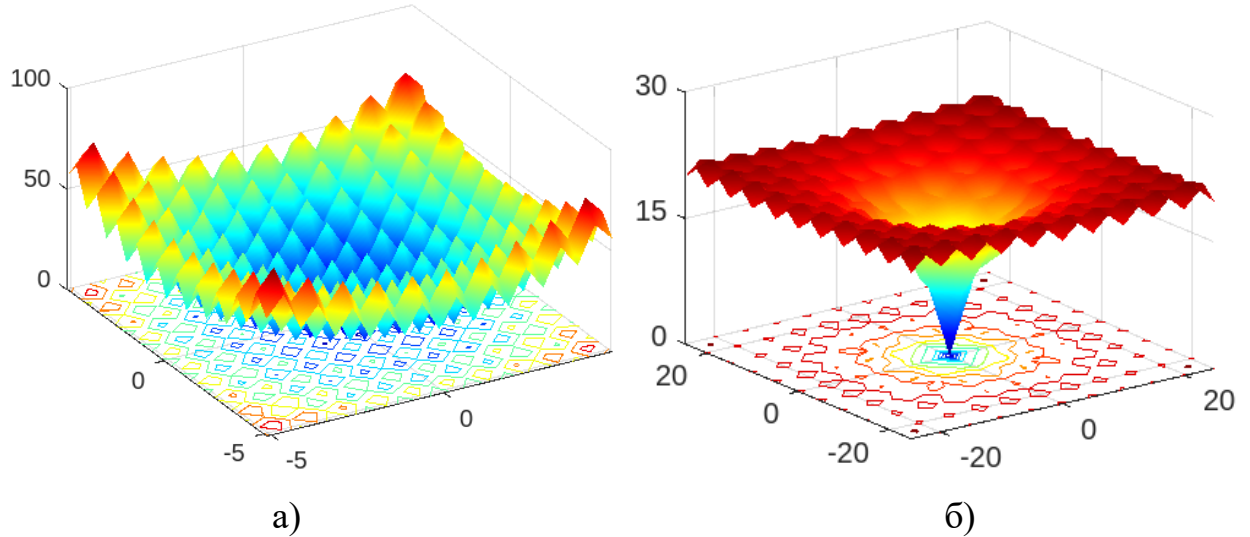


Рис. 2.3. Мультиmodalьні тестові функції: а) – функція Растрігіна, б) – функція Еклі

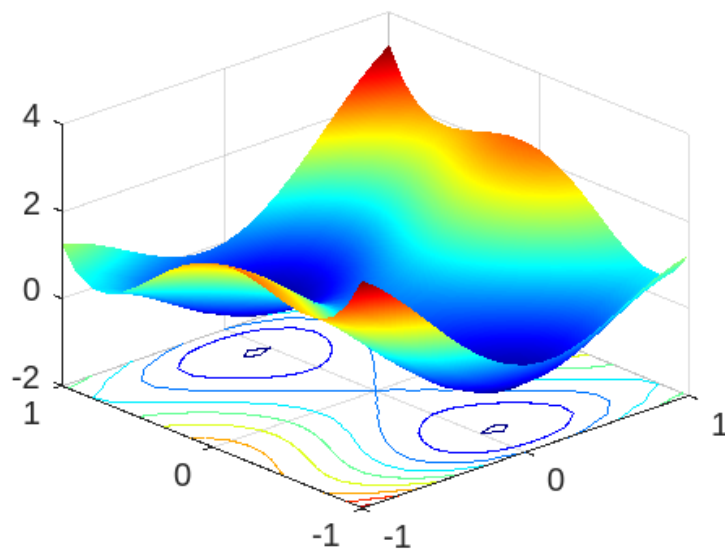


Рис. 2.4. Мультиmodalьна функція $F_7(x)$ з фіксованою розмірністю вхідних даних, $n=2$

Перевагою ройового інтелекту, алгоритм particleswarm (рій частинок), є те, що він може досліджувати одночасно кілька ділянок оптимуму на основі наявності частинок дослідників (скаутів).

Випадковий пошук на основі модуля `simulannealbnd`. Як правило, модуль `simulannealbnd` обирає розв'язок, якщо він кращий за попередній. Іноді приймається гірша точка, для того щоб досягти іншої ділянки тяжіння до оптимуму.

Таблиця 2.1.

Результати компаративного аналізу засобів Global Optimization Toolbox
MATLAB

Модуль	Розв'язок		Значення цільової функції	Кількість обчислень цільової функції
	x_1	x_2		
<code>patternsearch</code>	19.899	-9.9496	4.9748	174
<code>ga</code>	-0.0042178	-0.0024347	4.7054e-05	9453
<code>particleswarm</code>	-5.2496e-06	2.6546e-05	1.4527e-09	1720
<code>simulannealbnd</code>	0.002453	0.0018028	1.8386e-05	1986
<code>surrogateopt</code>	0.0031	-0.0038	4.7922e-05	300
<code>GlobalSearch</code>	0.1096e-07	0.1096e-07	0	2182

Метод `patternsearch` досліджує ряд сусідніх точок, перш ніж прийняти одну з них. За умови належності сусідніх точок різним ділянкам, по суті, відбувається пошук в кількох басейнах одночасно. Оптимізація на основі модуля `surrogateopt` базується на квазівипадковій вибірці розв'язків в заданих межах на основі радіально базисних функцій. Модуль `surrogateopt` використовує функцію ефективності, яка вимірює узгодженість між даними та моделлю при заданих параметрах. Після того, як поточний розв'язок не може бути покращеним відбувається оновлення вибірки для ширшого охоплення в межах. Це – ще один спосіб пошуку глобального рішення на основі модуля `surrogateopt`.

Аналіз отриманих результатів показав, що з точки зору пошуку глобального мінімуму найкращими є `GlobalSearch` та метод рою частинок –

particleswarm. З обчислювальної точки зору, загальноприйнятим в оптимізації критерієм є кількість обчислень цільової функції, також можна відмітити модуль particleswarm – 1720 обчислень. Заслуговує уваги та досліджень оптимізація на основі surrogateopt, яка конкурує з іншими алгоритмами, але при цьому вирізняється обчислювальними характеристиками – 300 обчислень цільової функції забезпечили конкурентний результат: $4.7922e-05$ проти $1.4527e-09$ для particleswarm.

Стосовно третього критерію – незалежності від вхідних даних моделювання, то слід відмітити, що GlobalSearch правомірно застосовувати для гладких цільових функцій, для яких існує похідна просторів пошуку. Багатовимірний простір пошуку параметрів моделей реальних складних об'єктів зазвичай невідомий і дуже складний з великою кількістю локальних оптимумів, тому метаевристики на основі ройового інтелекту є хорошим варіантом для ідентифікації параметрів інтервальних моделей в цьому випадку.

Для обчислювального експерименту було використано модуль Global Optimization Toolbox ППП MATLAB. Зокрема, програмний засіб GlobalSearch, що уможливорює знаходження глобального мінімуму гладких функцій за поліноміальний час. Модуль GlobalSearch використовує алгоритм внутрішньої точки для пошуку локального розв'язку на ділянках тяжіння до оптимуму («басейнах»). Застосовується для оптимізації гладких функцій та має доведену квадратичну конвергенцію [9]. Для цього використовується згенерований набір вихідних точок, що забезпечує дослідження всіх ділянок тяжіння до оптимуму заданої області пошуку та знаходження глобального оптимуму. Застосування модуля GlobalSearch наочно продемонструє модальність цільової функції (2.4).

Умови проведення чисельних експериментів для ідентифікації параметрів на основі оптимізаційної задачі (2.4)-(2.5) та тестових даних на основі функцій наведено у таблиці 2.2, де k – кількість параметрів моделі.

Проаналізуємо отримані результати чисельних експериментів на основі дослідження конвергенції цільової функції та простору параметрів. Для

ідентифікації параметрів використовувалися інтервальні значення в заданому діапазоні, які одержали на основі відносної похибки 5%.

Для дослідження ефективності запропонованого підходу до ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками проаналізуємо конвергенцію цільової функції в визначених точках локальних та глобального оптимумів та наочного представлення розв'язків в просторі пошуку. На рисунках 2.5.а та 2.6.а наведено значення цільової функції $\delta(\vec{\beta})$ в точках оптимумів, останнє значення відповідає глобальному мінімуму функції, для випадку коли вхідні дані та структура нелінійної моделі задавалися унімодальними функціями сфери $F_1(x)$ (рис. 2.2.а) та Швевеля $F_2(x)$ (рис. 2.2.б).

Таблиця 2.2.

Вихідні дані для чисельних експериментів

n	k	Структура моделі
2	2	$y(F_1(x)) = x_1^{\beta_1} + x_2^{\beta_2}$
2	2	$y(F_2(x)) = x_1^{\beta_1} + (x_1 + x_2)^{\beta_2}$
2	3	$y(F_3(x)) = \beta_1(x_{i+1} - x_i^2)^{\beta_2} + (x_i - 1)^{\beta_3}$
2	2	$y(F_4(x)) = -\beta_1 e^{-\beta_2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^2}} - e^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + \beta_1 + e$
2	2	$y(F_5(x)) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - \beta_1 \cos(\beta_2 x_i) + \beta_1)$
4	2	$y(F_6(x)) = \left[\beta_1 - \frac{x_1(\beta_2^2 + \beta_2 x_2)}{\beta_2^2 + \beta_2 x_3 + x_4} \right]^2$
2	11	$y(F_7(x)) = \beta_1 x_1^{\beta_2} + \beta_3 x_1^{\beta_4} + \beta_5 x_1^{\beta_6} + \beta_7 x_1 x_2 +$ $+ \beta_8 x_2^{\beta_9} + \beta_{10} x_2^{\beta_{11}}$

Як видно, для унімодальних функцій кількість оптимумів невелика і метод демонструє високу конвергентність, за винятком випадку, коли вхідні дані та структура формувалися на основі функції Розенброка (рис. 2.2.в), яка

утворює розлогу ділянку біля оптимуму, що утруднює конвергенцію методу (рис. 2.7.а).

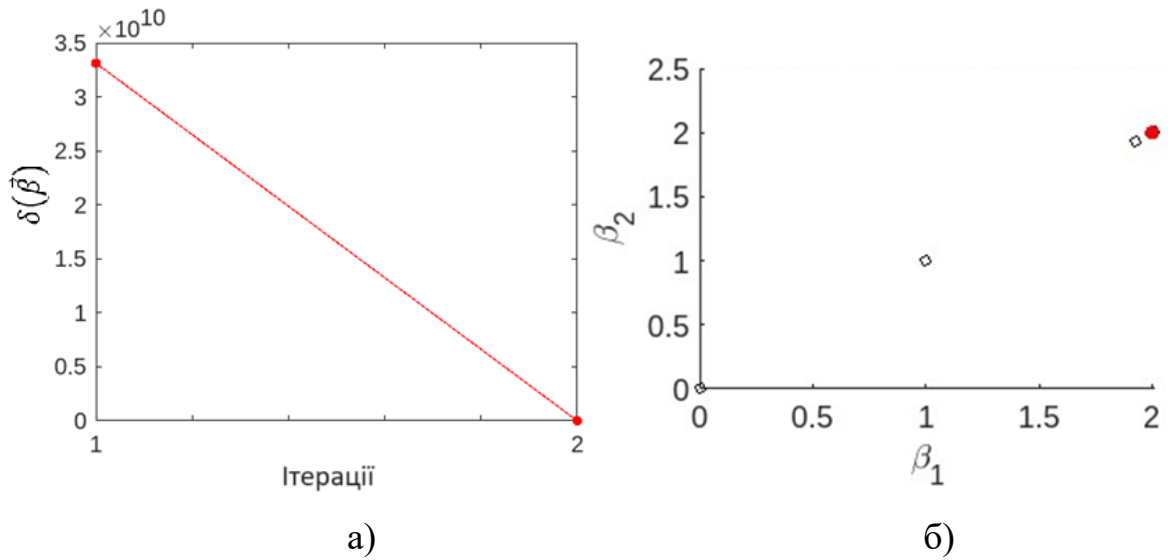


Рис. 2.5. Результати ідентифікації на основі сферичної функції

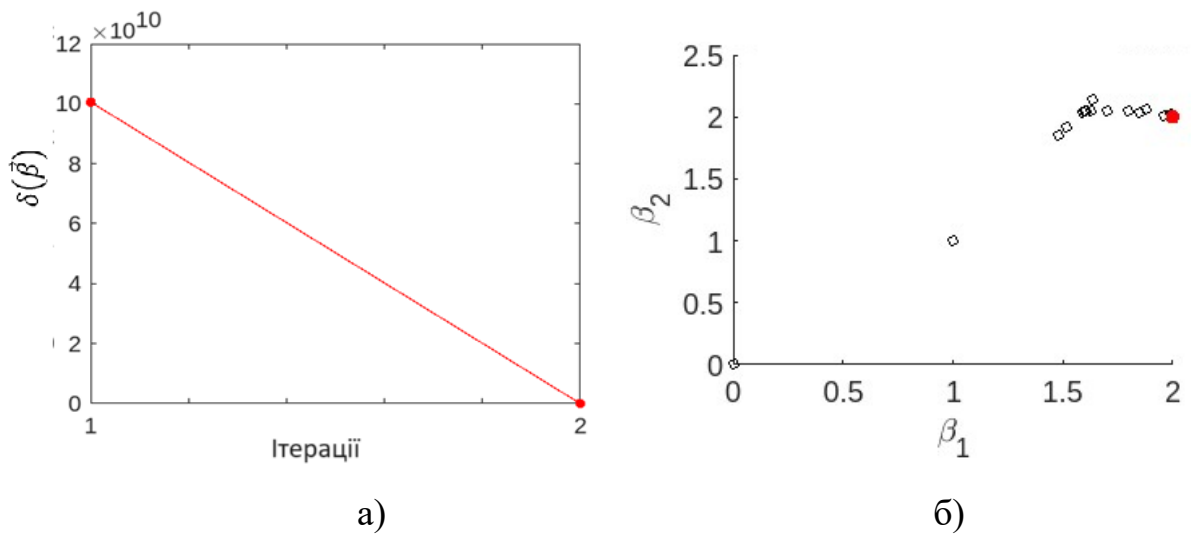


Рис. 2.6. Результати ідентифікації параметрів для моделі на основі функції Швевеля

На рисунках 2.5.б-2.7.б відображено процес пошуку оптимального розв'язку у вигляді послідовності обчислених точок в 2D та 3D просторі параметрів.

Графік цільової функції $\delta(\vec{\beta})$ на основі тестової двовимірної унімодальної функції F_1 (Sphere function): $y(\vec{X}) = x_1^{\beta_1} + x_2^{\beta_2}$ наведено на

рисунку 2.8. Результати обчислення параметрів на основі оптимізації функції свідчать, що значення цільової функції рівне нулю в точці $\vec{\beta}(2.0, 2.0)$ (рис. 2.8.б).

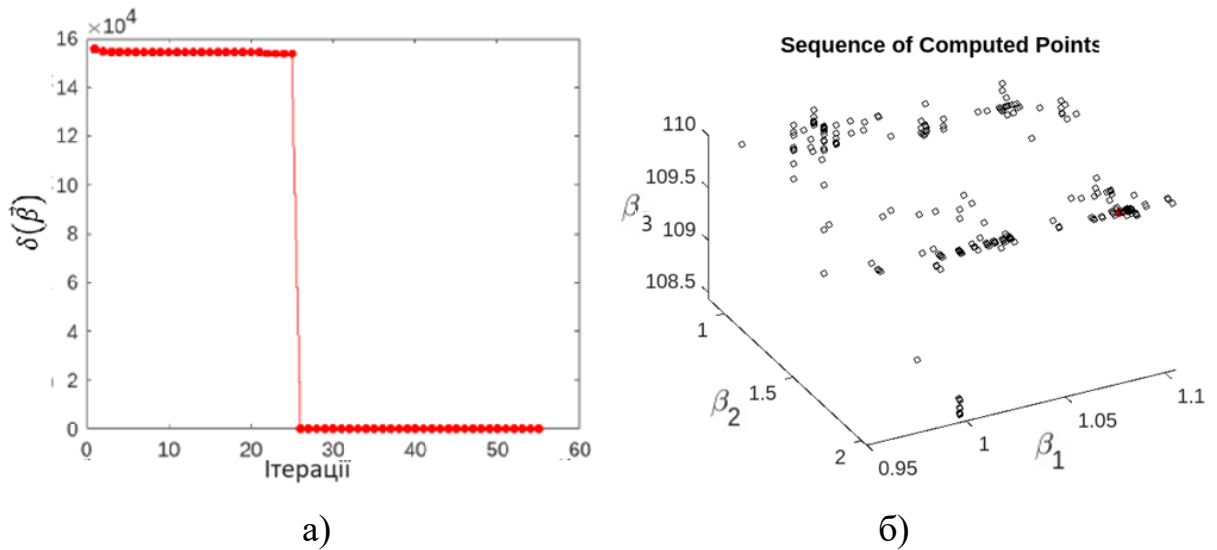


Рис. 2.7. Результати ідентифікації параметрів для моделі на основі функції Розенброка

Отже, для випадку унімодальності функції, яка визначає структуру інтервальної моделі статичних систем з нелінійними характеристиками, обчислювальна складність процедури оптимізації буде однозначно визначатися кількістю ітерацій в ході оптимізації, яка залежатиме від характеру кривизни («розлогості басейну» оптимуму).

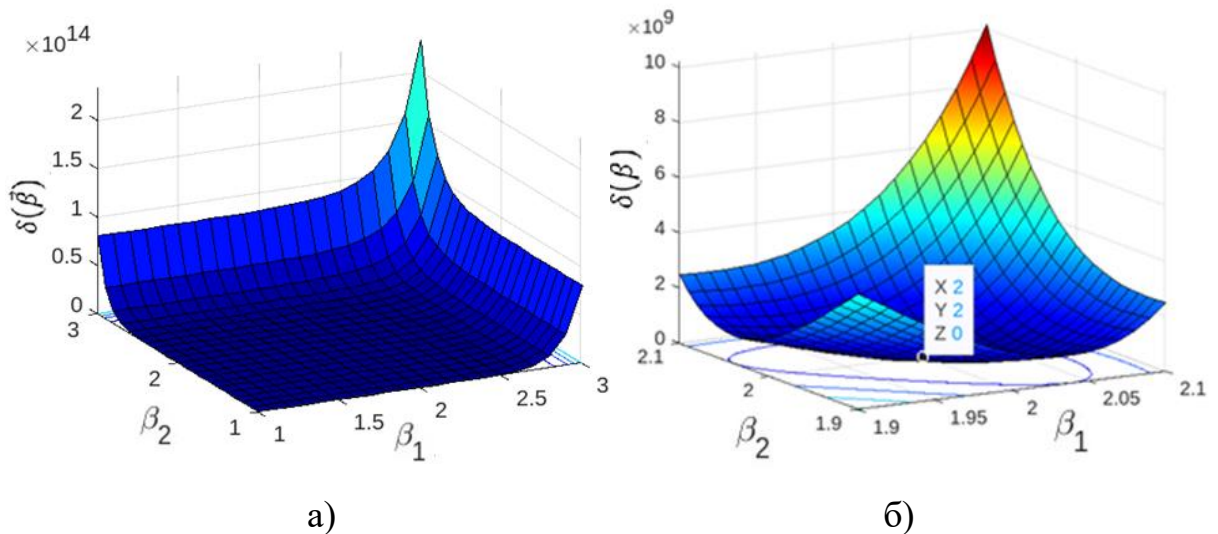


Рис 2.8. Функція $\delta(\vec{\beta})$ для моделі на основі функції F_1

Для випадку, коли дані та структура інтервальної моделі визначається складними мультимодальними функціями з великою кількістю локальних мінімумів, але не «розлогими басейнами» оптимумів, отримані результати також підтверджують ефективність застосування оптимізаційної задачі з цільовою функцією (2.4)-(2.5).

Розв'язок задачі демонструє достатньо високу конвергенцію та прийнятну кількість ітерацій (рис. 2.9.а-2.10.а.). Задовільна складність оптимізації в цих випадка пояснюється швидкою збіжністю в локальних мінімумах.

На рисунках 2.9.б-2.10.б відображено процес пошуку оптимального розв'язку у вигляді послідовності обчислених точок в просторі параметрів для структур моделей на основі функції Растрігіна (рис 2.3.а) та функції Еклі (2.3.б).

На рис. 2.11 наведено графік функції $\delta(\vec{\beta})$, значення якої, одержали в ході оптимізації параметрів моделі на основі даних та структури мультимодальної функції Растрігіна (F_4).

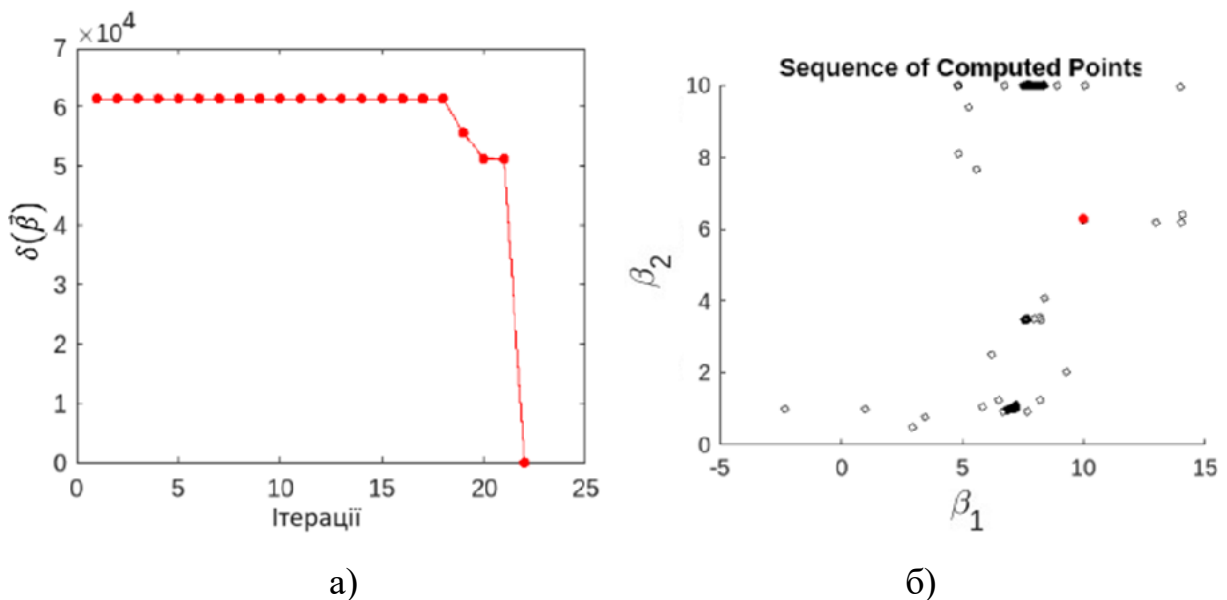


Рис. 2.9. Результати ідентифікації параметрів для моделі на основі функції Растрігіна

Графік демонструє наявності декількох ділянок з локальними мінімумами. Отже, можна зробити висновок про мультимодальний характер цільової функції (2.4) в загальному випадку.

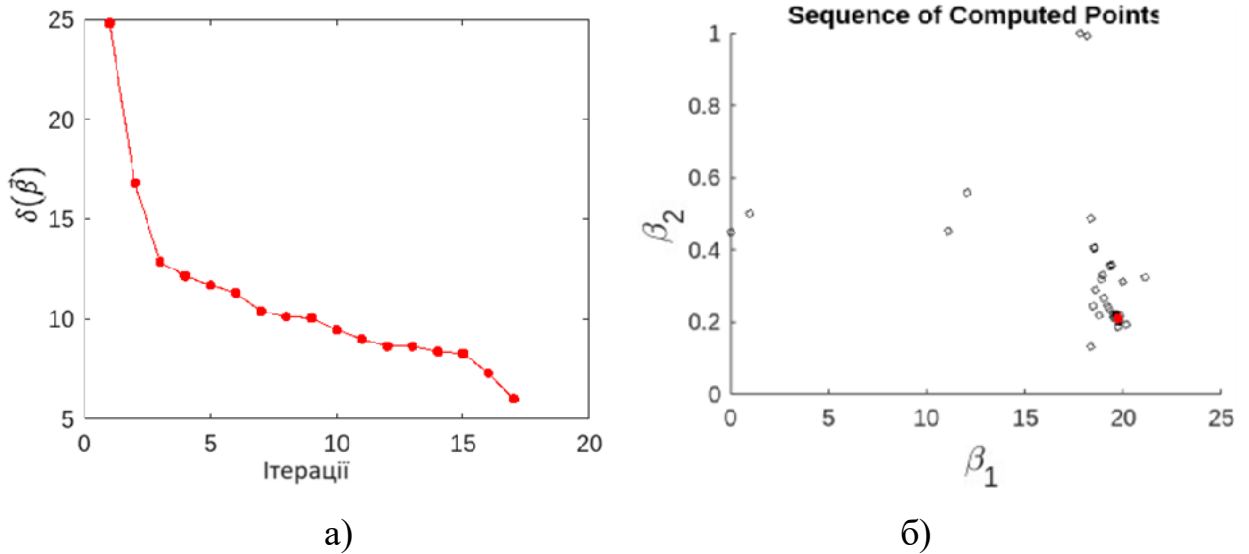


Рис. 2.10. Результати ідентифікації параметрів для моделі на основі функції Еклі

Тестові функції F_6 та F_7 , моделюють випадки наявності «розлогих басейнів» оптимумів (рис. 2.5).

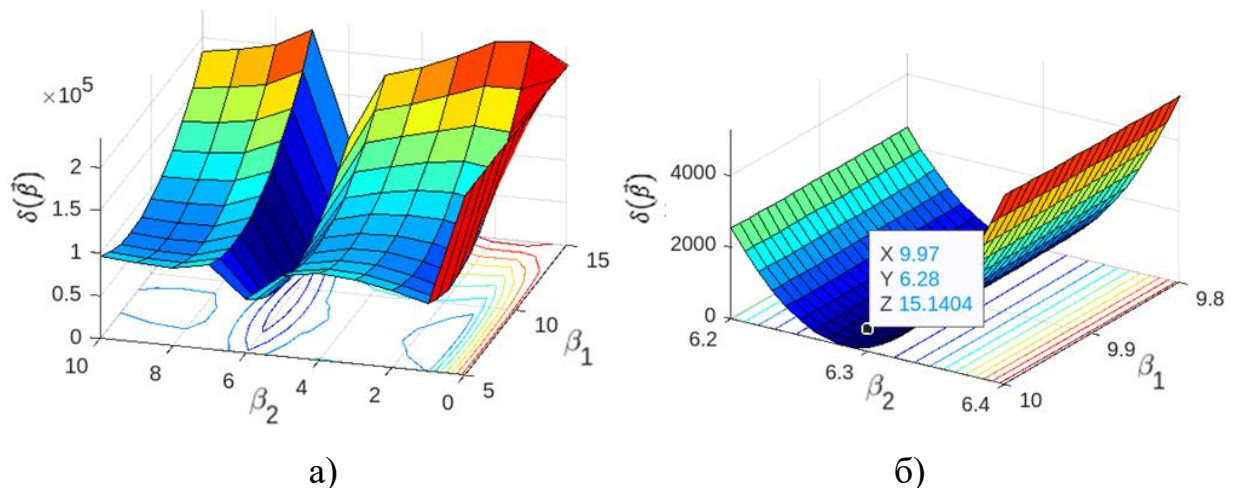


Рис 2.11. Функція $\delta(\vec{\beta})$ для моделі на основі функції Растрігіна

Оптимізація в таких випадках характеризується великою кількістю ітерацій обчислень значення цільової функції (рис. 2.12.a-2.13.a). Характер

нелінійності структури при цьому має більш вагомий вплив на складність оптимізації на відміну від кількості параметрів.

На рисунках 2.11.б-2.12.б відображено процес пошуку оптимального розв'язку у вигляді послідовності обчислених точок в просторі параметрів для структур моделей на основі функцій з фіксованою кількістю змінних. Для моделі, що містить одинадцять параметрів історія пошуку відображає тривимірний простір для 8, 9 та 11 параметрів.

Отже, проведені дослідження продемонстрували можливість ефективного застосування оптимізаційної процедури параметричної ідентифікації із використанням цільової функції (2.4), яка зводить задачу ідентифікації параметрів до задачі багатовимірної оптимізації.

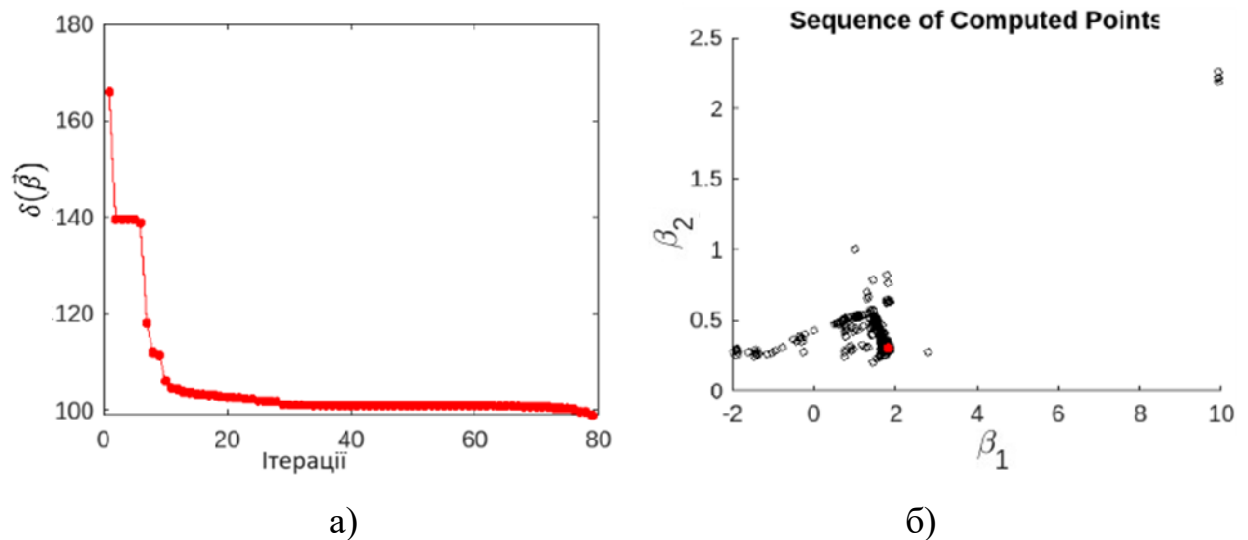


Рис. 2.12. Результати ідентифікації параметрів для моделі на основі мультимодальної функції, що містить чотири змінні та два параметри

Відповідно, подальші дослідження направлено на розробку методів параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які базуються на стандартних процедурах оптимізації гладких функцій.

При цьому, акценти реалізації таких методів повинні бути зміщені в напрямку врахування особливостей побудови інтервальних моделей та визначення їх адекватності на основі множинного коридору.

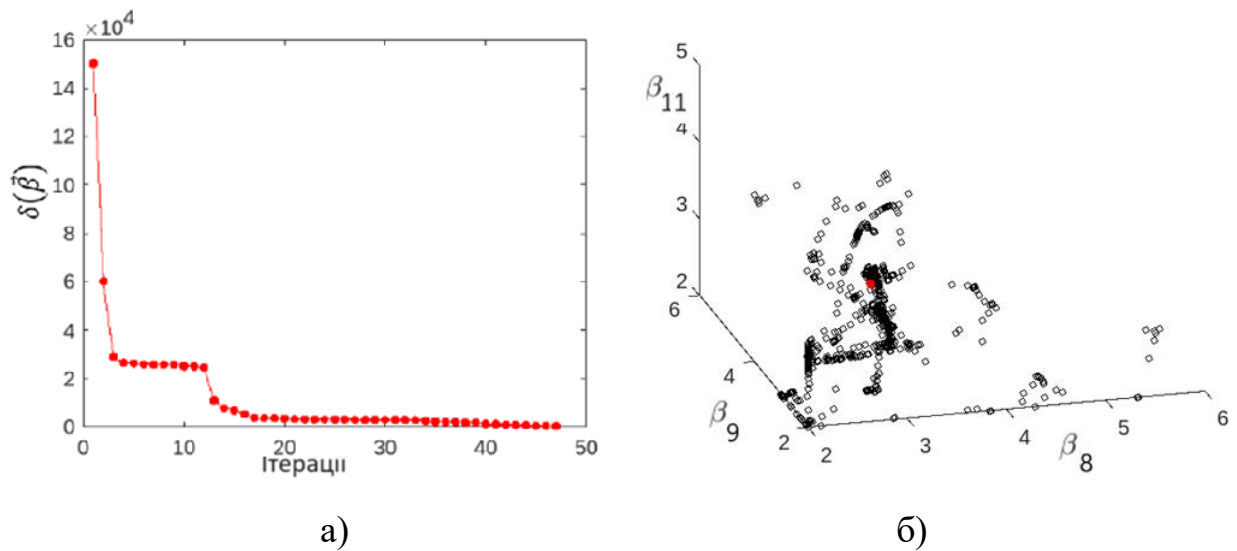


Рис. 2.13. Результати ідентифікації параметрів для моделі на основі мультимодальної функції, що містить дві змінні та одинадцять параметрів

2.3. Метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі багатовимірної оптимізації

Постановка оптимізаційної задачі параметричної ідентифікації, яку було здійснено в пункті 2.1 та дослідження запропонованої цільової функції в попередньому пункті є теоретичним підґрунтям для розробки методу ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Особливістю такого підходу є застосування процедур багатовимірної оптимізації, оскільки розмірність простору пошуку розв'язків зростає за рахунок уведення додаткових змінних $\alpha_i, i = \overline{1, N}$ у цільову функцію. При цьому, отримуємо оптимізаційну задачу без нелінійних обмежень, але з обмеженнями на частину змінних:

$$\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) \xrightarrow{\vec{\beta}, \vec{\alpha}} \min \quad (2.11)$$

$$\alpha_i \in [0, 1], \quad (2.12)$$

$$i = \overline{1, N}.$$

Аналіз методів нелінійної оптимізації показав, що найбільш придатним методом оптимізації у випадку багатовимірної оптимізації є метод внутрішньої точки [226, 228]. У випадку частинних обмежень на змінні, в нашому випадку – це обмеження на коефіцієнти α_i , даний метод, що використовує бар'єрні функції, може бути адаптований для врахування цих частинних обмежень. Це здійснюється шляхом включення бар'єрних функцій лише для змінних з обмеженнями. Запишемо бар'єрну функцію для оптимізаційної задачі (2.11, 2.12) із урахуванням обмежень для значень коефіцієнтів $\alpha_i \in [0,1]$:

$$\Phi(\vec{\beta}, \vec{\alpha}, \mu) = \delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) + \mu \cdot \sum_{i=1}^N (\ln(\alpha_i) + \ln(1 - \alpha_i)), \quad (2.13)$$

де μ – параметр бар'єру.

Ключову роль при розв'язуванні оптимізаційної задачі відіграють критерії зупинки обчислювальної процедури. В нашому випадку система критеріїв базується на базових критеріях задач нелінійної оптимізації із деякою модифікацією, яка враховує особливості, що породжуються розширенням простору параметрів за рахунок коефіцієнтів лінійної комбінації α .

Розглянемо основні критерії зупинки, що можуть використовуватися в запропонованому методі.

Норма градієнта.

Алгоритм зупиняють, якщо норма градієнта цільової функції $\|\nabla\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})\|$ стає меншою за заданий поріг $\epsilon_{\|\nabla\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})\|}$. Це означає, що поточна точка є близькою до точки локального мінімуму, де градієнт є нульовим або майже нульовим:

$$\|\nabla\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})\| < \epsilon_{\|\nabla\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})\|}. \quad (2.14)$$

Приріс цільової функції.

Алгоритм зупиняють, якщо зміна значення цільової функції між двома послідовними ітераціями є меншою за заданий поріг $\epsilon_{\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})}$. Це свідчить, що алгоритмом досягнуто стаціонарної точки, де подальші ітерації не призводять до суттєвого покращення розв'язків:

$$\left| \delta(\vec{\beta}_k, \vec{\alpha}_k) - \delta(\vec{\beta}_{k+1}, \vec{\alpha}_{k+1}) \right| < \epsilon_{\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})}. \quad (2.15)$$

Приріст параметрів.

Алгоритм зупиняють, якщо зміна значень змінних між двома послідовними ітераціями є меншою за заданий поріг $\epsilon_{\vec{\beta}}$. Це вказує на те, що рішення стабілізувалося. В нашому випадку даний критерій повинен враховувати тільки вектор параметрів $\vec{\beta}$, оскільки стабілізація значень коефіцієнтів α не повинна впливати на процес оптимізації. Цей критерій зупинки обчислювальної процедури має такий вигляд:

$$\left\| \vec{\beta}_k - \vec{\beta}_{k+1} \right\| < \epsilon_{\vec{\beta}}. \quad (2.16)$$

Псевдокод алгоритму реалізації параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками для локальної оптимізації наведено нижче.

Алгоритм 2.1. Параметрична ідентифікація інтервальних нелінійних моделей

Ініціалізація:

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

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

цільова функція $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})$;

початкові значення для вектора параметрів $\vec{\beta}$;

початкові значення для коефіцієнтів $\vec{\alpha}$, $\alpha_i = 0.5$, $i = \overline{1, N}$;

початковий параметр бар'єру μ ;

значення критеріїв зупинки;

Поки жоден з критеріїв не задовольняється **виконувати**

Оновлення бар'єрної функції $\Phi(\vec{\beta}, \vec{\alpha}, \mu)$;

Обчислення градієнта:

$$\nabla\Phi(\vec{\beta}, \vec{\alpha}, \mu) = \nabla\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) + \mu \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{1}{1 - \alpha_i} \right);$$

Обчислення матриці Гессе:

$$\nabla^2\Phi(\vec{\beta}, \vec{\alpha}, \mu) = \nabla^2\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) + \mu \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{1}{\alpha_i^2} + \frac{1}{(1 - \alpha_i)^2} \right);$$

Визначення напрямку спуску

$$\nabla^2\Phi(\vec{\beta}, \vec{\alpha}, \mu) \cdot (\Delta\vec{\beta}, \Delta\vec{\alpha}) = -\nabla\Phi(\vec{\beta}, \vec{\alpha}, \mu);$$

Лінійний пошук оптимального кроку s :

$$(\vec{\beta}_{k+1}, \vec{\alpha}_{k+1}) = (\vec{\beta}_k, \vec{\alpha}_k) + s \cdot (\Delta\vec{\beta}, \Delta\vec{\alpha});$$

Оновлення параметра бар'єру μ ;

Перевірка критеріїв зупинки;

Кінець

Повернути вектор параметрів $\vec{\beta}$ та коефіцієнти $\vec{\alpha}$;

На основі запропонованого методу та розробленого алгоритму було здійснено побудову інтервальної нелінійної моделі розподілу амплітуди інформаційного сигналу на області хірургічного втручання під час операції на щитовидній залозі.

Приклад. Стосується застосувань у медичній сфері, зокрема виявлення поворотного гортанного нерву (ПГН) в процесі операції на щитоподібній залозі. Для цього в процесі операції ділянку хірургічного втручання подразнюють змінним чи імпульсним струмом, а реакцію на подразнення фіксують звуковим сенсором, який фіксує коливання повітря через вібрацію голосових зв'язок.

Якщо точка подразнення належить тканині ПГН, то відбувається скорочення голосових зв'язок, якщо ж подразнення зроблено в точці на м'язовій тканині, то реакція на подразнення буде незначною, або ж повністю відсутньою. Отриманий звуковий сигнал промодульований внаслідок скорочення голосових зв'язок. Далі отриманий сигнал перетворюється у електричний інформаційний сигнал, який характеризує наближеність точки подразнення до гортанного нерву. Основною інформативною характеристикою цього сигналу є його максимальна амплітуда [2, 60, 242].

Причому вимірювання інтервального значення амплітуди інформаційного сигналу проводиться в точці з відомими координатами на хірургічній рані, які фіксуються на стерильній сітці, відповідно, розміщеній на ділянці хірургічного втручання. Експериментальні вимірювання на стерильній сітці здійснювалися на основі двох координат:

$$D_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}, i = 1, \dots, 36.$$

Отриманні на основі опрацювання інформаційного сигналу дані в інтервальному вигляді, з врахуванням вимірювальних похибок та шумів, представлено в таблиці 2.3.

Детальний аналіз даних таблиці 2.3 показав, що структуру адекватної моделі розподілу максимальних амплітуд інформаційного сигналу $A(\vec{D}_i)$ на області хірургічного втручання слід шукати із включенням тригонометричних базисних функцій. Для зменшення кількості таких елементів було додано нелінійні базисні функції у вигляді показникових функцій $f(\vec{\beta}, \vec{D}_i) = \beta_1 \cdot \vec{D}_i^{\beta_2}$ та $f(\vec{\beta}, \vec{D}_i) = \beta_1 \cdot \sin^{\beta_2}(\vec{D}_i)$.

Проте, у цьому прикладі питання структурної ідентифікації винесено за межі розгляду. При цьому будемо користуватися попереднім досвідом авторів, наведеним у працях [11, 12].

Таблиця 2.3

Результати експериментальних вимірювань амплітуди інформаційного сигналу

Номер вимірювання	Координати, D_i		Інтервальне значення максимальної амплітуди	
	x_i	y_i	$[A_i^-; A_i^+]$	
1	1	1	8,0974	11,5326
2	1	2	9,5576	13,6124
3	1	3	13,0391	18,5709
4	1	4	15,2955	21,7845
5	1	5	19,8619	28,2881
6	1	6	25,6492	36,5308
7	2	1	9,0626	12,9074
8	2	2	14,421	20,539
9	2	3	21,7099	30,9201
10	2	4	28,5656	40,6844
11	2	5	33,8498	48,2103
12	2	6	43,032	61,288
13	3	1	10,1516	14,4584
14	3	2	18,1335	25,8265
15	3	3	31,5892	44,9907
16	3	4	37,8716	53,9384
17	3	5	47,8912	68,2087
18	3	6	50,7004	72,2096
19	4	1	13,1134	18,6766
20	4	2	23,3475	33,2525
21	4	3	43,1516	61,4584
22	4	4	47,4375	67,5625
23	4	5	49,5001	70,4985
24	4	6	43,3125	61,6875
25	5	1	13,2021	18,8001
26	5	2	32,1750	45,825
27	5	3	43,3125	61,6875
28	5	4	47,0250	66,975
29	5	5	44,5501	63,4495
30	5	6	26,8125	38,1875
31	6	1	16,5001	23,4996
32	6	2	37,5375	53,4625
33	6	3	46,4063	66,0938
34	6	4	42,0750	59,925
35	6	5	24,3375	34,6625
36	6	6	16,9125	24,0875

Відповідно було сформовано множину потенційних структурних елементів у такому вигляді:

$$\lambda_s = \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 \cdot x, \beta_1 \cdot y, \beta_1 \cdot xy, \beta_1 \cdot x^{\beta_2}, \beta_1 \cdot y^{\beta_2}, \beta_1 \cdot \sin^{\beta_2} \left(\frac{\pi}{36} x \right), \\ \beta_1 \cdot \sin^{\beta_2} \left(\frac{\pi}{36} y \right), \beta_1 \cdot \sin^{\beta_2} \left(\frac{\pi}{36} xy \right) \end{array} \right\}.$$

В ході перебору та нарощування структури моделі елементами з множини λ_s було отримано структуру на основі згортки елементів такого вигляду, яка також включає вільний коефіцієнт β_0 :

$$\lambda_m = \left\{ \beta_1 \cdot y, \beta_1 \cdot \sin^{\beta_2} \left(\frac{\pi}{36} xy \right) \right\},$$

на основі якої отримали оптимальний розв'язок. Значення цільової функції в ході обчислень наближається до нуля, що продемонстровано на рисунку 2.14.

На основі обчислених параметрів $\hat{\beta} = (7.7623, 2.0482, 45.2431, 2.1703)$ за допомогою коефіцієнтів $\hat{\alpha}_i$ побудовано модель розподілу амплітуди інформаційного сигналу на поверхні області хірургічного втручання у такому вигляді:

$$\hat{A}(\vec{D}_i) = 7,7623 + 2,0482y + 45,2431 \sin^{2,1703} \left(\frac{\pi}{36} xy \right). \quad (2.17)$$

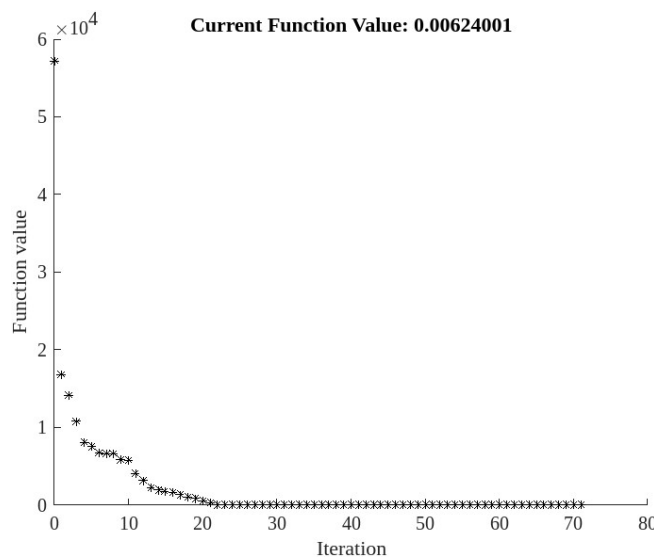


Рис. 2.14 Значення цільової функції $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})$ в ході обчислення параметрів моделі $\hat{\beta}$ та $\hat{\alpha}_i$ для одержаної моделі

В таблиці 2.4 також наведено прогнози значення амплітуди інформаційного сигналу $\hat{A}(\vec{D}_i)$, які отримані на основі моделі та відповідні коефіцієнти $\hat{\alpha}_i$, що були обчислені в ході оптимізації.

Запропонований метод спрощує та відповідно знижує часові затрати на побудову нелінійної моделі на основі інтервальних даних, зокрема, за рахунок диференційованості цільової функції оптимізаційної задачі (2.4).

Таблиця 2.4

Результати побудови інтервальної моделі розподілу
максимальної амплітуди сигналу

Номер вимірювання, i	Прогнозне значення амплітуди, $\hat{A}(\vec{D}_i)$	Коефіцієнт $\hat{\alpha}_i$	Номер вимірювання, i	Прогнозне значення амплітуди, $\hat{A}(\vec{D}_i)$	Коефіцієнт $\hat{\alpha}_i$
1	10,0373	0,4354	19	14,2191	0,41
2	12,8713	0,1975	20	29,1968	0,7892
3	16,3145	0,4089	21	47,0182	0,3897
4	20,3638	0,2261	22	59,7198	0,4161
5	24,9817	0,3916	23	61,7681	0,464
6	30,1031	0,5902	24	53,1629	0,3642
7	10,823	0,5447	25	16,7887	0,3171
8	16,2673	0,6984	26	37,2303	0,3632
9	23,9583	0,7539	27	55,8709	0,8519
10	33,2932	0,609	28	59,7198	0,7099
11	43,3751	0,3362	29	47,348	0,5194
12	53,1629	0,4447	30	30,1031	0,5332
13	12,218	0,5094	31	19,8618	0,353
14	21,9101	0,7275	32	44,9699	0,6086
15	35,2319	0,3041	33	59,1501	0,6397
16	49,0664	0,4059	34	49,0664	0,5615
17	59,9674	0,3207	35	28,0548	0,3171
18	65,2948	0,7971	36	20,0517	0,3632

При цьому ефективними виявилися процедури нелінійної оптимізації з обмеженнями на коефіцієнти $\hat{\alpha}_i$ Optimization Toolbox ППП MATLAB. Дані процедури базуються на алгоритмах, що уможливають знаходження локальних екстремумів складної цільової функції оптимізаційної задачі (14). При цьому значне розширення простору шуканих параметрів, за рахунок

коефіцієнтів $\hat{\alpha}_i$, призводить до появи великої кількості таких локальних мінімумів.

Як показала практика, достатньо визначити локальний мінімум на основі оцінок параметрів моделі $\hat{\beta}$ та коефіцієнтів $\hat{\alpha}_i$ $i = \overline{1, N}$, в якому значення цільової функції $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})$ наближається до нуля та при цьому виконується умова (2.1), що гарантує отримання адекватної інтервальної моделі розподілу амплітуди інформаційного сигналу.

Відповідно, питанню можливості застосування умови (2.1) в якості критерію зупинки процедури оптимізації присвячено наступний параграф.

2.4. Удосконалений метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем із додатковим критерієм зупинки

Як вже було зазначено вище, в загальному випадку розв'язок оптимізаційної задачі (2.4)-(2.5) забезпечує перетворення значення цільової функції до нульового значення, тобто $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) = 0$. В цьому випадку така умова із урахуванням розширення простору параметрів вектора розв'язків на N може призводити до зростання обчислювальної складності задачі параметричної ідентифікації. На практиці виявлено, що оптимізація має надлишкову складність, яка обумовлюється великою кількістю ітерацій при наближенні до оптимального значення, $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) = 0$, цільової функції. Відповідно доцільним є врахування практичних міркувань інтервального підходу, що ґрунтується на множинності розв'язків та дослідження процедур оптимізації цільової функції з метою введення додаткових критеріїв зупинки. Оскільки, наближенні розв'язки оптимізаційної задачі (2.4)-(2.5) уможливають отримання адекватних моделей, тобто, таких для яких виконується умова включення прогнозних значень у експериментальний інтервальный коридор.

Проаналізуємо обчислювальну складність методу параметричної ідентифікації для інтервальних нелінійних моделей статичних систем на основі

розширення простору параметрів. Метод базується на розв'язку оптимізаційної задачі з гладкою цільовою функцією у вигляді згортки інтервальних обмежень методами нелінійної оптимізації, зокрема методу внутрішньої точки.

Для детального аналізу обчислювальної складності будемо спиратися на відомі бібліотеки програмного забезпечення MATLAB для нелінійної оптимізації, оскільки для алгоритмів даних бібліотек обчислювальна складність є дослідженою та доведеною. Відповідно бібліотека Optimization Toolbox містять низку алгоритмів квазі-Ньютона для розв'язування задач нелінійної оптимізації як без обмежень, так і з обмеженнями [226]. Зокрема, алгоритм Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno, BFGS), який використовується у методі внутрішньої точки, належить до квазі-Ньютонівських методів і є ітераційним методом розв'язання задач нелінійної оптимізації без обмежень. Алгоритм BFGS визначає напрямок спуску шляхом попередньої оцінки кривизни на основі градієнта. Оцінка здійснюється шляхом поступового покращення наближення до матриці Гессе цільової функції, отриманої лише з градієнтних оцінок (або наближених градієнтних оцінок) за допомогою узагальненого методу січної. Складність кожної ітерації для методу BFGS становить $O(m^2)$ з додаванням компоненти на вартість обчислення оцінки значення функції та градієнта [9, 11]. Цей алгоритм є складовою методу внутрішньої точки, що в загальному випадку обумовлює його асимптотичну обчислювальну складність для задачі ідентифікації параметрів, яка описується такою залежністю:

$$O(k, m, N) = O(k \cdot m^2), \quad (2.17)$$

де k - кількість ітерації в ході оптимізації.

Особливістю задачі (2.11)-(2.12) є те, що цільова функція побудована на основі згортки обмежень у вигляді ІСНАР (2.3). Така особливість постановки задачі підвищує ефективність застосування методів нелінійної оптимізації, оскільки усуває нелінійні обмеження (мають місце обмеження на значення коефіцієнтів $\alpha_i, i = \overline{1, N}$), за рахунок доповнення простору параметрів моделі

коефіцієнтами α_i . В цьому випадку для вищезазначеного алгоритму отримуємо асимптотичну обчислювальну складність:

$$O(k, m, N) = O(k \cdot (m + N)^2). \quad (2.18)$$

Як правило, кількість ітерацій обчислювального процесу визначається критеріями зупинки, які перевіряються в кінці кожної ітерації. Для методу внутрішньої точки в MATLAB R2023b Update 6 можна обмежити кількість ітерацій (MaxIterations) та кількість обчислень цільової функції (MaxFunctionEvaluations), що не гарантує одержання оптимального значення [13,15]. Також за критерії зупинки обчислювальної процедури оптимізації використовують допуски на норму градієнта цільової функції (OptimalityTolerance), приріст цільової функції (FunctionTolerance) та приріст змінних (StepTolerance). Графічну інтерпретацію цих критеріїв наведено на рис. 2.17.

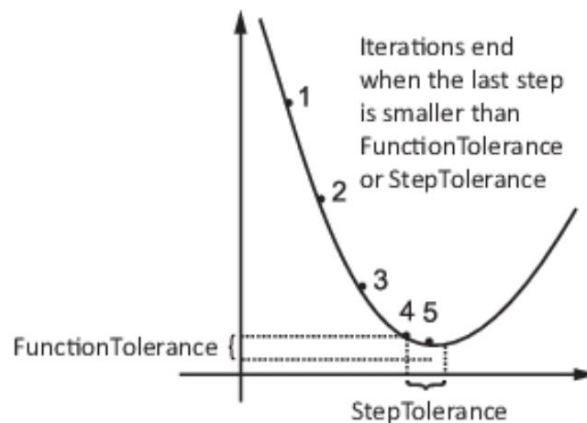


Рис. 2.17. Критерії завершення ітерацій оптимізації в методі внутрішньої точки [218]

В праці [46] зазначено, що мінімізація цільової функції до нуля гарантовано забезпечує оптимальність розв'язку, тобто адекватність побудованої моделі. Виходячи із основних припущень, на яких ґрунтується метод аналізу інтервальних даних, за результатами ідентифікації параметрів моделей будують множину (коридор) інтервальних точкових нелінійних моделей, кожна з яких адекватно відображає нелінійні властивості статичної

системи [241]. Відповідно, можна припустити, що розв'язок задачі (2.11)-(2.12), який є близьким до оптимального, забезпечить побудову адекватної моделі і для цієї моделі будуть виконуватися умови (2.1).

Відповідно, вираз (2.1) можна використати за критерій зупинки оптимізаційної процедури і таким чином зменшити кількість ітерацій. Варто також зазначити, що в ітераційній процедурі оптимізації, за допомогою вище згаданих методів, при наближенні до мінімуму цільової функції кількість ітерацій суттєво зростає.

Із врахуванням наведених вище міркувань, отримуємо асимптотичну обчислювальну складність методу ідентифікації параметрів нелінійних інтервальних моделей статичних систем у такому вигляді:

$$O(k, m, N) = O(k \cdot ((N + m)^2 + N)). \quad (2.19)$$

На рис. 2.18 наведено графіки залежності обчислювальної складності методу ідентифікації параметрів від розмірності оптимізаційної задачі.

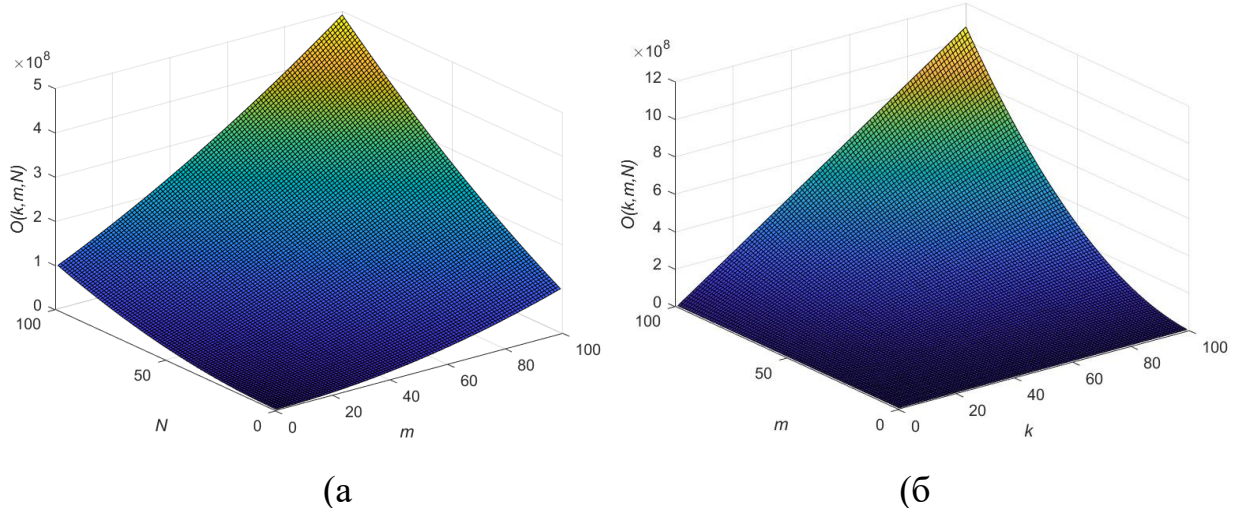


Рис. 2.18. Графіки залежності обчислювальної складності методу ідентифікації параметрів від розмірності оптимізаційної задачі (2.11)-(2.12)

Рис. 2.18.а демонструє квадратичну обчислювальну складність на основі кількості вимірювань вихідної характеристики статичної системи N та кількості параметрів моделі m , що пояснюється включенням коефіцієнта лінійної комбінації для кожного вимірювання (спостереження) у простір

параметрів оптимізації. В той же час, при збільшенні кількості ітерацій k обчислювальна складність зростає лінійно (рис. 2.18.б). Отже, одним із шляхів зниження обчислювальної складності методу є зменшення кількості ітерацій за рахунок використання додаткового критерію зупинки обчислювальної процедури оптимізації параметрів інтервальних моделей у вигляді умов (2.1).

Для дослідження ефективності використання запропонованого додаткового критерію зупинки оптимізації параметрів інтервальних моделей проведено серію обчислювальних експериментів із застосуванням процедур ідентифікація нелінійних інтервальних моделей. В ході чисельних експериментів було досліджено зміну кількості ітерацій та відповідно кількості обчислень значення цільової функції $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})$.

2.5. Метод визначення інтервальних оцінок параметрів на основі точкового розв'язку

Можна охарактеризувати ряд задач, які охоплюють широкий спектр галузей, де прийняття рішень може здійснюватися на основі використання інтервальних моделей саме в сенсі множинних розв'язків. Інтервальні моделі дозволяють враховувати невизначеність та варіативність вхідних даних і параметрів, забезпечуючи більш надійні рішення. Зокрема, управління ризиками та фінансовий аналіз, де інтервальні оцінки використовуються для визначення діапазону можливих збитків або прибутків, що дозволяє краще оцінити ризики інвестиційних рішень. Використання інтервальних прогнозів для моделювання різних економічних сценаріїв та їхнього впливу на фінансовий стан компанії. В управлінні проектами інтервальні оцінки тривалості окремих завдань дозволяють визначити діапазон можливих строків завершення проекту. Також можливість планування та оптимізація використання ресурсів з урахуванням можливих варіацій витрат. В промисловості застосування інтервальних нелінійних моделей для визначення інтервальних допусків на параметри виробничих процесів зі статичними

характеристиками з метою забезпечення відповідності продукції стандартам якості. В медицині використання інтервальних оцінок можливе для визначення діапазону можливих значень біомедичних параметрів пацієнта та відповідних рішень щодо лікування. Також визначення ділянок можливого хірургічного втручання на основі інтервальних оцінок різних характеристик пацієнта [130, 260]. В енергетиці та екології використання інтервальних моделей можливе для оцінки діапазону виробленої потужності енергії з урахуванням невизначеності [262, 265, 290]. Визначення діапазону можливих екологічних впливів проєктів або політик з урахуванням варіативності вхідних даних та багато інших завдань.

Тому виникає актуальна зворотна задача отримання інтервальних оцінок моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Дана задача лежить в площині визначення інтервальних оцінок параметрів. Враховуючи наявність точкового розв'язку для параметрів, задача зводиться до визначення допусккових значень параметрів на основі заданої точки $\vec{\beta}$. Класично такі задачі розв'язуються аналітичним або чисельним методом [41, 61]. Специфіку даної задачі в сенсі інтервальних даних визначає умова включення прогнозних значень на основі моделі в експериментальні значення в кожному спостереженні.

Розглянемо аналітичний підхід визначення інтервальних оцінок параметрів на основі точкового розв'язку у вигляді вектора параметрів $\vec{\beta}$.

Щоб перейти від точкової інтервальної моделі статичної системи з нелінійними характеристиками вигляду:

$$\hat{y}(\vec{X}_i) = f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i), i = \overline{1, N} \quad (2.21)$$

з обчисленими параметрами $\vec{\beta}$ до моделі з інтервальними параметрами вигляду:

$$[\hat{y}(\vec{X}_i)] = f_1([\vec{\beta}], \vec{X}_i) + \dots + f_m([\vec{\beta}], \vec{X}_i) \quad (2.22)$$

слід визначити допуски для кожного параметра. При цьому, це необхідно здійснити таким чином, щоб модель залишалася валідною в межах інтервалів експериментальних даних, тобто, необхідно знайти інтервали параметрів $[\vec{\hat{\beta}}]$, такі що модель

$$[\hat{y}(\vec{X}_i)] \in [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, N}. \quad (2.23)$$

Для нелінійних моделей аналітичний підхід може бути складнішим або навіть неможливим без спрощень або додаткових припущень. В таких випадках аналітичний підхід може потребувати розкладання функції в ряд Тейлора або використання інших математичних методів для лінеаризації та спрощення задачі.

Розглянемо розкладання нелінійної моделі в ряд Тейлора першого порядку в околі обчислених параметрів $\hat{\beta}_j, j = \overline{1, k}$, де k – кількість параметрів моделі:

$$\hat{y}(\vec{X}_i) \approx f_1(\vec{\hat{\beta}}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\hat{\beta}}, \vec{X}_i) + \sum_{j=1}^k \left. \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j} (\beta_j - \hat{\beta}_j). \quad (2.24)$$

В цьому випадку аналіз граничних умов для параметрів моделі ґрунтується на умові належності значень, отриманих на основі моделі, інтервальним значенням, що отримані експериментально, тобто на основі таких умов:

$$y_i^- \leq f_1(\vec{\hat{\beta}}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\hat{\beta}}, \vec{X}_i) + \sum_{j=1}^k \left. \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j} (\beta_j - \hat{\beta}_j) \leq y_i^+, \quad (2.25)$$

$$i = \overline{1, N}$$

Позначимо допусковий приріст j -го параметра $\Delta\beta_j = \beta_j - \hat{\beta}_j, j = \overline{1, k}$. Тоді побудова інтервальних меж для параметрів буде ґрунтуватися на аналізі

граничних умов для приросту кожного параметра із врахуванням обмежень (2.23).

Відповідно запишемо обмеження (2.23) для $\Delta\beta_j, j = \overline{1, k}$:

$$y_i^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \sum_{j=1}^k \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \Big|_{\hat{\beta}_j} \cdot \Delta\beta_j \leq y_i^+, i = \overline{1, N}. \quad (2.26)$$

З отриманих нерівностей можна вивести граничні межі для приросту параметрів $\Delta\beta_j, j = \overline{1, k}$.

Грунтуючись на припущенні про рівномірний розподіл значущості приросту параметрів відносно приросту значень моделі на основі їх показника чутливості, запишемо граничні умови для кожного з параметрів.

Відповідно отримаємо систему інтервальних нерівностей такого вигляду:

$$y_i^- \leq f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \Big|_{\hat{\beta}_j} \cdot \Delta\beta_j \leq y_i^+, i = \overline{1, N}, \quad (2.27)$$

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

$$\leq \frac{\left(y_i^+ - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \Big|_{\hat{\beta}_j}}. \quad (2.28)$$

Граничні умови приросту параметрів відносно меж експериментальних даних запишемо у такому вигляді:

$$\Delta\beta_j^- = \frac{\left(y_i^- - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\left. \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}}; \quad (2.29)$$

$$\Delta\beta_j^+ = \frac{\left(y_i^+ - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\left. \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}}; \quad (2.30)$$

де

$\Delta\beta_j^-$ – приріст j -го параметра відносно нижньої межі експериментальних значень $y_i^-, i = \overline{1, N}$,

$\Delta\beta_j^+$ – приріст j -го параметра відносно верхньої межі експериментальних значень $y_i^+, i = \overline{1, N}$.

Відповідно для знаходження допусккових значень приросту параметрів відносно меж експериментальних даних, що задовольняють умову (2.23) необхідно розв'язати такі задачі:

- для нижньої межі y_i^- :

$$\Delta\beta_j^- = \min_i \frac{\left(y_i^- - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\left. \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}}, j = \overline{1, k}, i = \overline{1, N}; \quad (2.31)$$

- для верхньої межі y_i^+ :

$$\Delta\beta_j^+ = \min_i \frac{\left(y_i^+ - \left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) \right)}{\left. \frac{1}{k} \cdot \frac{\partial \hat{y}(\vec{X}_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}}, j = \overline{1, k}, i = \overline{1, N}. \quad (2.32)$$

На основі отриманих розв'язків інтервальна модель набуде вигляду:

$$[\hat{y}(\vec{X}_i)] = f_1 \left(\left[\vec{\hat{\beta}}_1^-; \vec{\hat{\beta}}_1^+ \right], \vec{X}_i \right) + \dots + f_m \left(\left[\vec{\hat{\beta}}_m^-; \vec{\hat{\beta}}_m^+ \right], \vec{X}_i \right), \quad (2.33)$$

де $[\vec{\hat{\beta}}] = \left(\left[\vec{\hat{\beta}}_1^-; \vec{\hat{\beta}}_1^+ \right], \dots, \left[\vec{\hat{\beta}}_m^-; \vec{\hat{\beta}}_m^+ \right] \right)$ – інтервальні оцінки параметрів нелінійної моделі, отримані на основі $\Delta\beta_j^-$ та $\Delta\beta_j^+$:

$$\hat{\beta}_j^- = \hat{\beta}_j - \Delta\beta_j^-,$$

$$\hat{\beta}_j^+ = \hat{\beta}_j + \Delta\beta_j^+,$$

$$j = \overline{1, k}.$$

Для реалізації алгоритму побудови допускової області параметрів проілюструємо наведений метод на прикладі чисельного експерименту для нелінійної моделі такого вигляду:

$$y(\vec{X}_i) = \beta_1 \cdot e^{\beta_2 \cdot \vec{X}_i}.$$

Для моделі на основі даних таблиці 2.7 обчислено параметри $\vec{\hat{\beta}} = (0.98, 0.5)$, відповідно модель має такий вигляд:

$$y(x_i) = 0.98 \cdot e^{0.5 \cdot x_i}, i = \overline{1, 6}, \quad (2.34)$$

Запишемо граничні умови приросту параметрів відносно меж експериментальних даних:

$$\Delta\beta_j^- = \min_i \frac{(y_i^- - 0.98 \cdot e^{0.5 \cdot x_i})}{\frac{1}{2} \cdot \left. \frac{\partial \hat{y}(x_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}}, i = \overline{1, 6}, \quad (2.35)$$

$$\Delta\beta_j^+ = \min_i \frac{(y_i^+ - 0.98 \cdot e^{0.5 \cdot x_i})}{\frac{1}{2} \cdot \left. \frac{\partial \hat{y}(x_i)}{\partial \beta_j} \right|_{\hat{\beta}_j}}, i = \overline{1, 6}, \quad (2.36)$$

де

$$\left. \frac{\partial \hat{y}(x_i)}{\partial \beta_1} \right|_{\hat{\beta}_1} = e^{0.5 \cdot x_i},$$

$$\left. \frac{\partial \hat{y}(x_i)}{\partial \beta_2} \right|_{\hat{\beta}_2} = 0.98 \cdot x_i \cdot e^{0.5 \cdot x_i}.$$

Таблиця 2.7.

Вихідні дані точкового розв'язку

i	x_i	y_i^-	$\hat{y}(x_i)$	y_i^+
1	1	1.1	1.6157	2.2
2	2	1.8	2.6639	2.8
3	3	3.6	4.3921	4.7
4	4	7.0	7.2413	8.0
5	5	11.6	11.9388	12.8
6	6	19.2	19.6838	20.8

Для аналізу результатів (табл. 2.8) використаємо залишки моделі, які для випадку інтервальних даних обчислимо відносно меж інтервалів експериментальних значень, відповідно:

$$e_i^- = \hat{y}(x_i) - y_i^-,$$

$$e_i^+ = y_i^+ - \hat{y}(x_i), i = \overline{1, N}.$$

На основі отриманих значень приростів параметрів для всіх спостережень, розв'язавши задачі 2.35 та 2.36, вектор інтервальних значень параметрів, що описує допускову область параметрів, матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \left[\vec{\hat{\beta}} \right] &= ([0.98 - 0.012; 0.98 + 0.025], [0.5 - 0.002; 0.5 + 0.0047]) = \\ &= ([0.968, 1.005], [0.498, 0.5047]). \end{aligned}$$

В таблиці 2.9 наведено значення прогнозованого інтервального коридору нелінійних моделей, який побудований на основі моделі (2.34) та інтервальних значень параметрів.

Таблиця 2.8

Результати обчислень приросту параметрів на основі граничних умов

i	$\Delta\beta_1^-$	$\Delta\beta_2^-$	e_i^-	$\Delta\beta_1^+$	$\Delta\beta_2^+$	e_i^+
1	0.1564	0.1922	0.5157	0.1772	0.1543	0.5843
2	0.1564	0.098	0.8639	0.025	0.0125	0.1361
3	0.0884	0.0331	0.7921	0.025	0.0113	0.3079
4	0.0163	0.0042	0.2413	0.025	0.0113	0.7587
5	0.0139	0.0029	0.3388	0.025	0.0070	0.8612
6	0.012	0.002	0.4838	0.025	0.0047	1.1162

Як видно, з порівняння із експериментальними значеннями запропонований підхід на основі рівномірного врахування приросту параметрів із врахуванням чутливості моделі відносно даних параметрів (частинна похідна) забезпечує адекватне відтворення властивостей моделі у всіх точках експерименту.

Таблиця 2.9

Результати обчислень приросту параметрів на основі граничних умов

i	y_i^-	$\hat{y}_i^-(x_i)$	$\hat{y}_i^+(x_i)$	y_i^+
1	1.1	1.5926	1.6647	2.2
2	1.8	2.6203	2.7572	2.8
3	3.6	4.3112	4.5668	4.7
4	7	7.0932	7.564	8,
5	11.6	11.6705	12.5284	12.8
6	19.2	19.2015	20.7510	20.8

Графіки точкової моделі та коридору інтервальних моделей у порівнянні із експериментальним наведено на рисунку 2.23.

Враховуючи проведений аналіз запропонованого підходу наведемо алгоритм визначення допускової області параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі точкового розв'язку отриманого градієнтними методами.

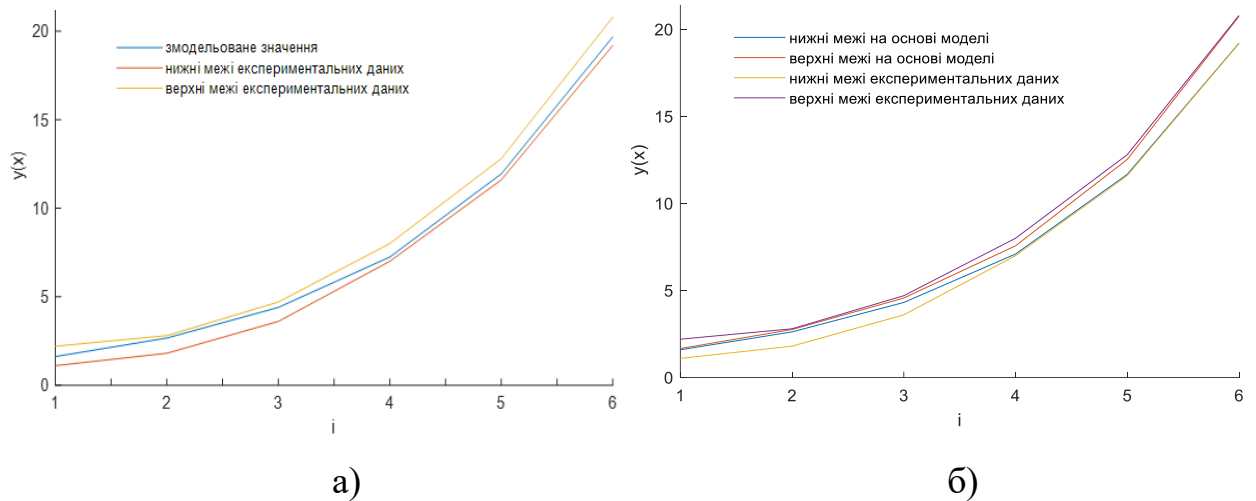


Рис. 2.23. Експериментальні межі та змодельовані значення на основі моделі: а) на основі точкового розв'язку, б) на основі допускової області параметрів

Алгоритм 2.2. 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:

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

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

Оновлення меж інтервалів

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

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

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

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 $[\vec{\beta}]$;

Запропонований алгоритм має поліноміальну складність $O(k \cdot N)$, де k – кількість параметрів моделі та уможлиблює, в цілому, одержання множинного розв'язку задачі параметричної ідентифікації статичних систем з нелінійними характеристиками за поліноміальний час.

Отже, запропонований підхід та алгоритм отримання інтервальних оцінок параметрів моделей статичних систем з нелінійними характеристиками забезпечує можливість побудови коридору інтервальних моделей на основі

допускової області параметрів та прийняття рішень на основі множинного розв'язку в різних сферах діяльності.

Висновки до розділу 2

1. Вперше при розв'язуванні задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками запропоновано та обґрунтовано представлення цієї задачі у вигляді оптимізаційної задачі з цільовою функцією, яка мінімізує квадратичного відхилення між значеннями модельованої характеристики статичного системи та значеннями, вибраними на експериментальних числових інтервалах цієї характеристики. 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. Таким чином, отримано задачу багатовимірної оптимізації з нелінійною багатоекстремальною цільовою функцією, яка уможливорює застосування гібридних методів оптимізації із використанням алгоритмів з квадратичною збіжністю.

2. 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 оптимізаційних процедур розв'язування задачі ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Визначено, що за умови диференційованості цільової функції оптимізації ефективним є гібридний глобальний пошук на основі методу внутрішньої точки.

3. Вперше запропоновано та розроблено метод параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками,

який ґрунтується на розв'язуванні оптимізаційної задачі з диференційованою цільовою функцією та гібридній стратегії глобального пошуку із використанням квазі-Ньютонівських методів (алгоритм Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно, BFGS), що у сукупності забезпечило гарантовану квадратичну збіжність та зниження обчислювальної складності до квадратичної.

4. Удосконалено метод параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який використовує додатковий критерій зупинки на поточній ітерації оптимізаційної процедури на основі перевірки адекватності моделі, що забезпечило зниження часової складності цієї процедури. На тестових прикладах продемонстровано зменшення кількості ітерацій у 4.5 рази, що є співрозмірним такому ж зменшенню кількості обчислень цільової функції. При цьому отримані нелінійні моделі статичних систем відображають властивості статичної системи із заданою точністю. Застосування методу із запропонованим критерієм зупинки також уможливить зниження часової складності алгоритмів структурної ідентифікації.

5. Запропоновано алгоритм отримання інтервальних оцінок параметрів моделі статичної системи з нелінійними характеристиками на основі допускового оцінювання області визначення параметрів, що ґрунтується на аналізі граничних умов приросту кожного параметра із врахуванням інтервальних значень експериментального коридору.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕЛІНІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ ГРАДІЄНТНИХ МЕТОДІВ

У попередньому розділі розглянуто задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Такі задачі сформульовано як оптимізаційні з нелінійною багатоекстремальною функцією, де невідомими є параметри моделі. Задачі структурної ідентифікації математичних моделей є набагато складнішими, оскільки при формулюванні оптимізаційної задачі невідомими є структурні елементи моделі, хоча і означено їх можливий набір. Зазвичай процедури ідентифікації передбачають формування наборів моделей-претендентів із заданими структурними елементами, якість та адекватність кожної із яких оцінюють за допомогою методів параметричної ідентифікації. На відміну від відомих методів структурної ідентифікації інтервальних моделей, які ґрунтуються на метаевристичних алгоритмах пошуку оптимальної структури моделі, в цьому розділі розглянуто обчислювальні схеми із використанням процедур аналізу градієнта кожен раз, коли змінюємо структуру моделі-претендента. Також наведено методологічні аспекти розробки нових методів ідентифікації структури інтервальних нелінійних моделей статичних систем, у яких вибір структурних елементів при синтезі структури моделі здійснюється на основі аналізу градієнта цільової функції в поточній точці простору параметрів, яка визначається оціненим вектором параметрів для поточної структури моделі, із проекцією на дискретну множину структурних елементів.

Основні результати досліджень, які наведено в цьому розділі, опубліковано автором у працях [45, 63, 67, 245, 246, 247, 257, 276].

3.1. Постановка задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

Запропонований у другому розділі підхід до параметричної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних систем полягає у перетворенні цієї задачі ідентифікації до розв'язування стандартної задачі мінімізації квадратичного відхилення між значеннями модельованої характеристики статичного об'єкта та значеннями, які належать до експериментальних інтервалів. Такий підхід призводить до розширення простору параметрів нелінійних моделей за рахунок введення додаткових коефіцієнтів α у цільової функції, які забезпечують узгодженість обчислених на основі моделі та експериментальних даних. Таким чином отримуємо задачу багатовимірної оптимізації з нелінійною багатоекстремальною функцією мети.

Нехай, на основі базисних функцій задано множину структурних елементів λ_s :

$$\lambda_s = \{f_1(\vec{\beta}, X), f_2(\vec{\beta}, X), \dots, f_s(\vec{\beta}, X)\}. \quad (3.1)$$

За базисні функції у виразі (3.1), в залежності від специфіки досліджуваних об'єктів можуть бути використані різні нелінійні функції [148].

Наприклад:

- показникові

$$f(\vec{\beta}, X) = \beta_1 \cdot X^{\beta_2};$$

- гаусівські

$$f(\vec{\beta}, X) = \beta_1 \cdot e^{\left[-\left(\frac{X-\beta_2}{\beta_3}\right)^2\right]};$$

- тригонометричні:

$$f(\vec{\beta}, X) = \beta_1 \cdot \cos(\beta_3 \cdot X) + \beta_2 \cdot \sin(\beta_3 \cdot X);$$

- інші нелінійні функції, які є неперервними та диференційованими.

Задача структурної ідентифікації полягає у визначенні структури моделі, тобто множини структурних елементів λ_m :

$$\lambda_m = \{f_1(\vec{\beta}, X), f_2(\vec{\beta}, X), \dots, f_m(\vec{\beta}, X)\}, \quad (3.2)$$

$$\lambda_m \in \lambda_s,$$

та параметрів моделі $\vec{\beta}^m$ на її основі, які забезпечують адекватність інтервальної нелінійної моделі (2.2) статичної системи, що визначається умовами (2.1). Істинність такого твердження гарантує адекватність та задану точність (в межах точності експериментальних даних) побудованої моделі.

Перепишемо задачу структурної ідентифікації на основі оптимізаційної задачі (2.11-2.12) у такому вигляді:

$$\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}) \xrightarrow{\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}} \min \quad (3.3)$$

$$\lambda_m \in \lambda_s, \quad (3.4)$$

$$\alpha_i \in [0, 1], \quad (3.5)$$

$$i = \overline{1, N}.$$

Цільова функція оптимізаційної задачі (3.3-3.5) має такий вигляд:

$$\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}) = \sum_{i=1}^N \left(\left(f_1(\vec{\beta}, \vec{X}_i) + \dots + f_m(\vec{\beta}, \vec{X}_i) \right) - P([y_i^-, y_i^+], \alpha_i) \right)^2. \quad (3.6)$$

За критерій зупинки оптимізаційних процедур використовуємо умови (2.1).

Складність цієї задачі, на відміну від задачі параметричної ідентифікації, полягає в тому, що функція мети є дискретною відносно множини структурних

елементів (3.1). Тому її розв'язок будують на основі багаторазового розв'язку задач параметричної ідентифікації (2.6) з напрямленим перебором множин λ_m на основі елементів множини λ_s .

Треба відзначити, що оптимізаційна задача структурної ідентифікації інтервальних моделей є обчислювальною NP-складною задачею. Особливостями задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками є те, що в процесі оптимізації доводиться здійснювати пошук глобального мінімуму цільової функції і при цьому здійснювати обхід чи вихід з багаточисленних локальних мінімумів. Тому для їх розв'язування переважно застосовують метаевристичні методи або методи стохастичного пошуку. Разом з тим, дослідниками таких оптимізаційних задач широко використовуються відомі програмні рішення, наведені в ряді стандартних пакетів прикладних програм, зокрема у Global Optimization Toolbox ППП MATLAB [24].

Результати аналізу методів структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей, які наведено у першому розділі показали, що основною проблемою, яка породжує комбінаторну складність оптимізації, є вибір структурних елементів з множини λ_s для формування вектора $\vec{\lambda}_m$. Основний підхід базується на оціненні параметрів (оптимізації параметрів на основі задачі (2.4-2.5)) для кожного вектора $\vec{\lambda}_m$, який був сформований внаслідок комбінації, а у випадку застосування генетичних алгоритмів: схрещування, селекції або мутації. Фактично, пошук оптимального розв'язку задачі структурної ідентифікації (3.3-3.5) здійснюємо в двох просторах, як це проілюстровано на рис.3.1.

Як бачимо на рис. 3.1 простір структурних елементів є дискретним, а простір параметрів моделей – неперервний. Тому, стоїть завдання розробки процедур ідентифікації структури інтервальних нелінійних моделей статичних систем зі зниженням їх обчислювальної складності.

Одним із шляхів вирішення цього завдання є розроблення методу вибору структурних елементів, який би уможливив зменшення кількості

процедур параметричної ідентифікації як на етапі формування структур моделей-претендентів, так і на етапі їх аналізу. Зазначена задача у цьому розділі розв'язується у спосіб уведення процедур аналізу градієнта кожен раз, коли модифікується структура моделі-претендента.

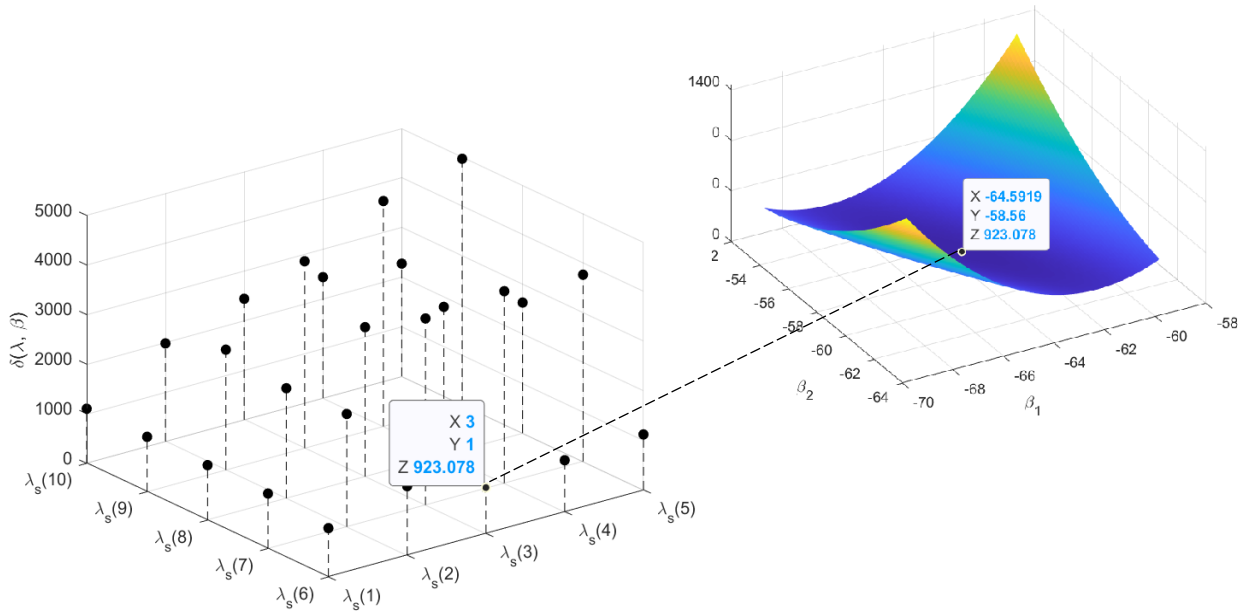


Рис.3.1. Ілюстрація до постановки задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

Такий підхід можемо застосувати, оскільки для фіксованого набору структурних елементів у моделі-претендента цільова функція (3.6) переважно є диференційованою, хоча і багатоекстремальною.

3.2. Теоретичні аспекти розробки методів структурної ідентифікації на основі аналізу градієнта цільової функції

Оскільки цільова функція (3.6) оптимізаційної задачі (3.3) є диференційованою для деякого фіксованого вектора $\vec{\lambda}_m$, то для її дослідження, з точки зору вибору структурних елементів, які б уможливили її мінімізацію, можна використати градієнтні методи.

Нехай задано деяку модель-претендента зі структурою на основі вектора

$\vec{\lambda}_m$ та вектора параметрів $\vec{\beta}^m$. Для дослідження якості структури моделі-претендента запропоновано використовувати антиградієнт цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})$ на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^m$. Для моделі-претендента на основі вектора $\vec{\lambda}_m$, із розмірністю m величина норми вектора антиградієнту $-\nabla$ відносно вектора параметрів $\vec{\beta}^m$ вказує на можливість мінімізації цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})$ на множині структурних елементів λ_s . Відповідно, для структури $\hat{\lambda}_m$ заданого розміру m , вектор антиградієнту позначимо так:

$$-\nabla\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}) = \left(\frac{d\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)}{d\beta_1^m}, \frac{d\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)}{d\beta_2^m}, \dots, \frac{d\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)}{d\beta_m^m} \right). \quad (3.7)$$

Спираючись на властивість частинних похідних багатовимірних функцій по їх змінних, можемо стверджувати, що базуючись на нормі вектора антиградієнта (3.7) цільової функції (3.6) $\|-\nabla\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})\|$ на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^m$, можна робити висновок про оптимальність множини структурних елементів $\hat{\lambda}_m$ моделі-претендента в сенсі задачі (3.3).

Відповідно сформулюємо таке правило оптимальності набору структурних елементів в ході синтезу структури при реалізації методу структурної ідентифікації на основі аналізу градієнта цільової функції.

Правило 1. Необхідною умовою оптимальності множини структурних елементів λ_m моделі-претендента в сенсі задачі (3.3-3.5) є мінімум норми вектора антиградієнта $\|-\nabla\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})\|$ цільової функції (3.6) на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^m$ на всій множині структурних елементів.

Виконання цього правила породжуватиме два випадки.

Випадок 1. Якщо інтервальна модель на основі вектора структури $\vec{\lambda}_m$ є адекватною, що підтверджується умовами (2.1), то це означає, що знайдено розв'язок оптимізаційної задачі (3.3-3.5), у вигляді вектора структури $\vec{\lambda}_m$ та вектора параметрів $\vec{\beta}^m$.

Випадок 2. «Вичерпаність» розмірності моделі, оскільки 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 .

Останній випадок вимагає розширення простору пошуку, відповідно нарощування структурних елементів у структурі на один $(m + 1)$, та обчислення нової точки в просторі параметрів на основі вектора $\vec{\beta}^{m+1}$ для проведення процедури вибору структурних елементів з множини λ_s .

У другому випадку виникає два види завдань вибору структурного елемента для нарощування структури $\vec{\lambda}_m$ та вибору структурних елементів з множини λ_s з метою заміни існуючих елементів вектора $\vec{\lambda}_m$ для забезпечення зменшення значення цільової функції (3.6) і в кінцевому випадку для її мінімізації. Для нарощування структури моделі можна використовувати випадковий вибір елемента або ж на основі аналізу градієнта цільової функції за умови доповнення в структуру моделі-претендента відповідного елемента на попередньому етапі.

Для селекції структурних елементів з множини λ_s з метою заміни існуючих елементів вектора $\vec{\lambda}_m$ дослідимо можливість використання аналізу частинної похідної цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})$ на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^m$.

Для цього проведемо чисельний експеримент, який полягає у синтезі структури моделі на основі експериментальних даних із вибором структурних елементів на основі антиградієнту згідно правила 1.

Спочатку визначимо умови проведення чисельного експерименту. Для спрощення демонстрації селекції структурних елементів розглянемо випадок лінійної, відносно параметрів, моделі на основі даних у такому вигляді:

$$\vec{X}_i \rightarrow [y_i^-; y_i^+], i = \overline{1, 21}.$$

За тестові інтервальні дані використаємо експериментальні дані, які наведено в праці [241]:

$$X = \begin{pmatrix} 0,91 & 0,923 & 0,709 & 0,933 \\ 0,91 & 0,912 & 0,564 & 0,482 \\ 0,91 & 0,931 & 0,621 & 0,784 \\ 0,62 & 0,754 & 0,518 & 0,421 \\ 0,62 & 0,703 & 0,619 & 0,521 \\ 0,62 & 0,603 & 0,354 & 0,245 \\ 0,65 & 0,922 & 0,803 & 0,954 \\ 0,65 & 0,902 & 0,622 & 0,655 \\ 0,65 & 0,784 & 0,735 & 0,921 \\ 0,7 & 0,442 & 0,423 & 0,421 \\ 0,7 & 0,456 & 0,385 & 0,327 \\ 0,7 & 0,431 & 0,356 & 0,435 \\ 0,23 & 0,342 & 0,318 & 0,423 \\ 0,23 & 0,255 & 0,267 & 0,196 \\ 0,23 & 0,248 & 0,225 & 0,247 \\ 0,34 & 0,521 & 0,359 & 0,343 \\ 0,34 & 0,347 & 0,277 & 0,288 \\ 0,34 & 0,351 & 0,290 & 0,412 \\ 0,75 & 0,358 & 0,443 & 0,364 \\ 0,75 & 0,276 & 0,337 & 0,294 \end{pmatrix}, [\vec{y}^-; \vec{y}^+] = \begin{bmatrix} 38; 48 \\ 30; 38 \\ 51; 66 \\ 46; 56 \\ 72; 90 \\ 39; 48 \\ 44; 55 \\ 43; 53 \\ 57; 72 \\ 63; 78 \\ 60; 75 \\ 83; 97 \\ 115; 135 \\ 99; 20 \\ 78; 96 \\ 93; 111 \\ 84; 99 \\ 54; 69 \\ 64; 80 \\ 66; 82 \end{bmatrix}.$$

Відповідно, сформуємо множину можливих структурних елементів використовуючи прості поліноміальні функції:

$$\lambda_s = \left\{ \beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_2, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_4, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_2, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_3, \right. \\ \left. \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_4, \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_4, \beta_1 \cdot x_3 \cdot x_4 \right\},$$

та приведемо множину λ_s до векторного вигляду на основі дискретних значень, що відповідають порядковим індексам елементів у множини λ_s , $l_i = \lambda_s(l_i)$:

$$\vec{\lambda}_s = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}.$$

В якості критерію зупинки оптимізації структури моделі використаємо умови (2.1).

Для обчислення антиградієнта запишемо аналітичний вираз частинних похідних на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^k$ та на основі відповідних до цих параметрів заданих структурних елементів:

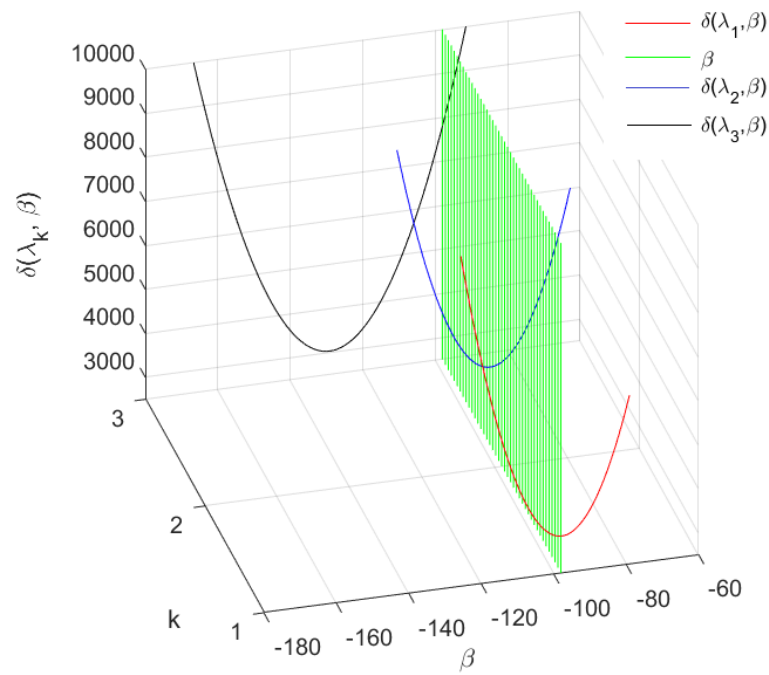
$$\begin{aligned}
& \frac{d}{d\beta_v} \delta \left(\beta_v^k, f_w^s \left(\vec{\beta}^k, X \right), \vec{\alpha} \right) = \\
& = \frac{d}{d\beta_v} \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) + \beta_v^k \cdot f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right) \right)^2 = \\
& = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) + \beta_v^k \cdot f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right) \right)^2 \times \\
& \quad \times \frac{d}{d\beta_v} \sum_{i=1}^N \left(\beta_v^k \cdot f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right) \right) = \\
& = 2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) + \beta_v^k \cdot f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right) \right)^2 \times \\
& \quad \times \sum_{i=1}^N f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right), \tag{3.8}
\end{aligned}$$

де

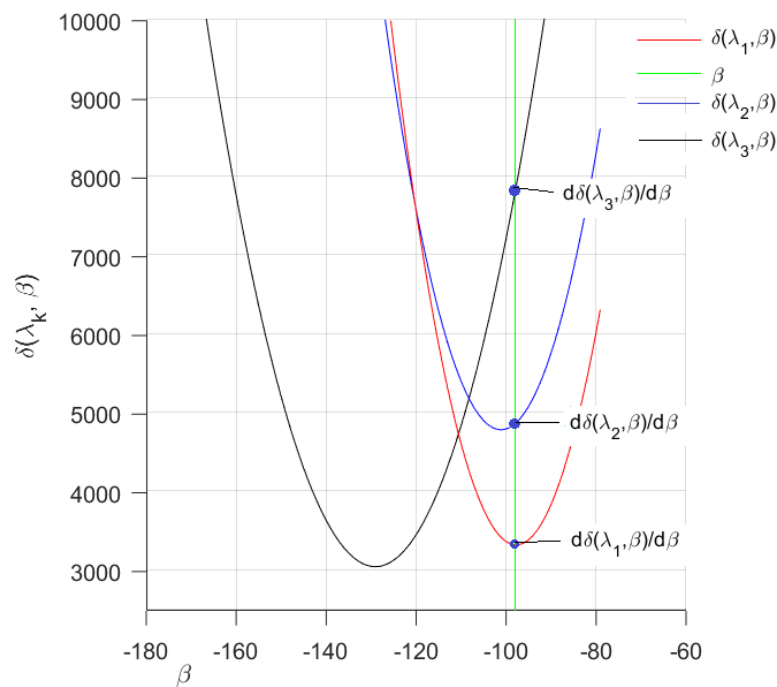
$$\hat{y}_i(\vec{X}_i) = \sum_{q=1}^{m_k} \beta_q^k \cdot f_q^k \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right), q \neq v; \tag{3.9}$$

$f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right)$ – структурний елемент, що не входить в модель-претендент,
 $f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right) \in \lambda_s \wedge f_w^s \left(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i \right) \notin \lambda_m^k$.

На рисунку 3.2 а) відображено графіки цільової функції (3.6) оптимізаційної задачі структурної ідентифікації на основі трьох моделей зі структурою $\lambda_1^1 = \{x_1\}$, $\lambda_1^2 = \{x_2\}$, $\lambda_1^3 = \{x_3\}$.



а)



б)

Рис. 3.2. Ілюстрація аналізу структурних елементів базуючись на оцінці похідної цільової функції для вектора параметрів β_v^k

При цьому обчислили мінімум цільової функції для λ_1^1 , отримавши вектор параметрів $\vec{\beta}^1 = (127.7143, -97.7381)$. Відповідно аналіз

необхідності нарощування структури включенням додаткового елемента може здійснюватися на основі обчислення частинної похідної цільової функції по ν -му параметру β_ν^k :

$$\frac{d}{d\beta_\nu} \delta(\beta_\nu^k, f_w^s(\vec{\beta}^k, X), \vec{\alpha}) \Big|_{\beta=\hat{\beta}_\nu^k}. \quad (3.10)$$

На рисунку 3.1 б) продемонстровано можливий принцип вибору структурних елементів на основі аналізу похідних цільової функції для вектора параметрів, що відповідає мінімуму цільової функції для першого структурного елемента, заданого множиною λ_1^1 . Відповідно, значення похідної цільової функції узалежене від значення параметра β_1^1 :

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\beta_1^1} \delta(\lambda_1^1, \beta_1^1, \vec{\alpha}) \Big|_{\beta=-97.7381} &= 0, \\ \frac{d}{d\beta_1^1} \delta(\lambda_2^1, \beta_1^2, \vec{\alpha}) \Big|_{\beta=-97.7381} &= 138.56, \\ \frac{d}{d\beta_1^1} \delta(\lambda_3^1, \beta_1^3, \vec{\alpha}) \Big|_{\beta=-97.7381} &= 2135.6. \end{aligned}$$

На підставі антиградієнта, згідно правила 1, структурний елемент з множини λ_3^1 може забезпечити зменшення цільової функції та його обираємо для побудови нової структури моделі-претендента.

Тепер задамо початкову розмірність моделей претендентів $m_1 = 2$ та сформуємо випадковим чином початкову структуру на основі вектора $\vec{\lambda}_1 = (4, 8)$, що відповідає множині елементів $\lambda_1 = \{x_4, x_2 \cdot x_3\}$.

Покладемо $\alpha_i = 0,5, i = 1, \dots, 21$ для функції $P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i)$, що відповідатиме центрам числових інтервалів характеристики системи, які отримано експериментально. Для розв'язку оптимізаційної задачі (3.3-3.5), на основі цільової функції (3.6), використовували модуль GlobalSearch, що належить до бібліотеки Global Optimization Toolbox ППП MATLAB.

В якості модуля оптимізації використовувалася функція `fmincon` та алгоритм внутрішньої точки.

Провівши параметричну ідентифікацію, із використанням вказаних засобів, отримали вектор оцінок параметрів $\vec{\beta}^1 = (99,2842 - 13,6265 - 81,4928)$ для інтервальної моделі на основі структури $\vec{\lambda}_1$. Значення цільової функції для отриманої структури та набору параметрів моделі:

$$\delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\beta}^1, \vec{\alpha}) = 3,7696e + 03.$$

Отже, модель не адекватна, оскільки значення цільової функції далеке від нульового і при цьому не задовольняються умови (2.1), що продемонстровано на рис. 3.3.

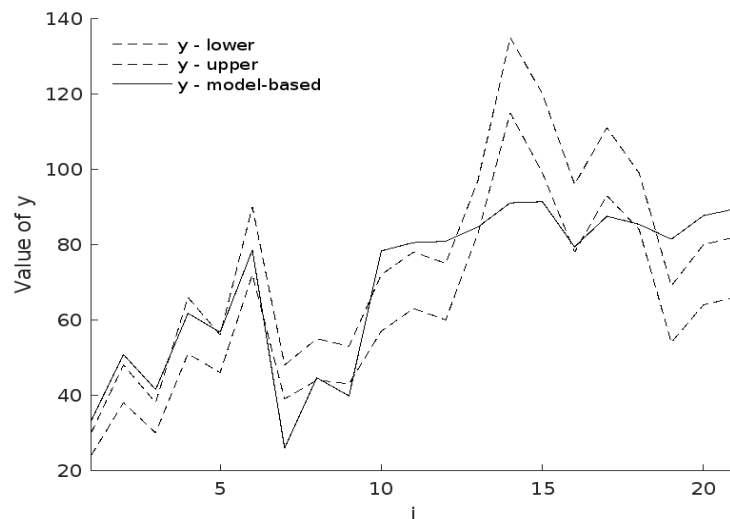


Рис. 3.3. Візуалізація співвідношення інтервального коридору, отриманого експериментально, та прогнозу на основі однієї інтервальної моделі, яку побудовано на основі структури $\vec{\lambda}_1$ та значень параметрів $\vec{\beta}^1$

Як бачимо з рис. 3.3. прогнозовані значення на основі моделі виходять за межі експериментального коридору на основі інтервальних даних.

Тепер обчислимо антиградієнт цільової функції для вектора параметрів $\vec{\beta}^1$ на основі вибору структурних елементів. Результати обчислення частинних

похідних для компонент вектора параметрів $\vec{\beta}^1$ для усіх відповідних структурних елементів наведено в таблиці 3.1.

Як бачимо з таблиці 3.1., для структурного елемента зі значенням 1, якому відповідає $\lambda_s(1) = x_1$, отримано найменше значення частинної похідної на основі другого параметра $\frac{d\delta}{d\beta_2^1} = -13301$.

Таблиця 3.1.

Результати обчислень векторів антиградієнта на основі $\vec{\lambda}_1 = (4, 8)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{X}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^1}$	-913,07	-559,04	103,51	0	473,3	632,69	612,59	-	606,84	670,87
$\frac{d\delta}{d\beta_2^1}$	-13301	-10620	-5318,8	-	-1947,9	-68,684	-357,99	0	-435,28	733,42
β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}), \vec{\alpha})$									
β_1^1	2810,2	3799,4	3681,2	3769,6	3402,1	3470,6	3504,9	-	3976,3	4056,6
β_2^1	15599	13777	7375,2	-	3023,9	2220,3	2819,3	3769,6	5158,5	5407,6

Відповідно цей структурний елемент є претендентом для заміни структурного елемента з номером 8, який має такий вигляд:

$$\lambda_s(8) = x_2 \cdot x_3.$$

Для структурного елемента з номером 2, відповідно,

$$\lambda_s(2) = x_2,$$

відносно першого параметра при виключенні стовпця 1 та рядка $\frac{d\delta}{d\beta_2^1}$ з аналізу, значення частинної похідної є від'ємне та мінімальне:

$$\frac{d\delta}{d\beta_1^1} = -559,04.$$

Отже, четвертий структурний елемент є претендентом для редукції та заміни структурним елементом 2 для першого параметра.

На рисунку 3.4 проілюстровано вибір структурних елементів базуючись на аналізі антиградієнту на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^1$ для формування нової моделі-претендента у вигляді пелюсткової діаграми, що відображає простір структурних елементів.

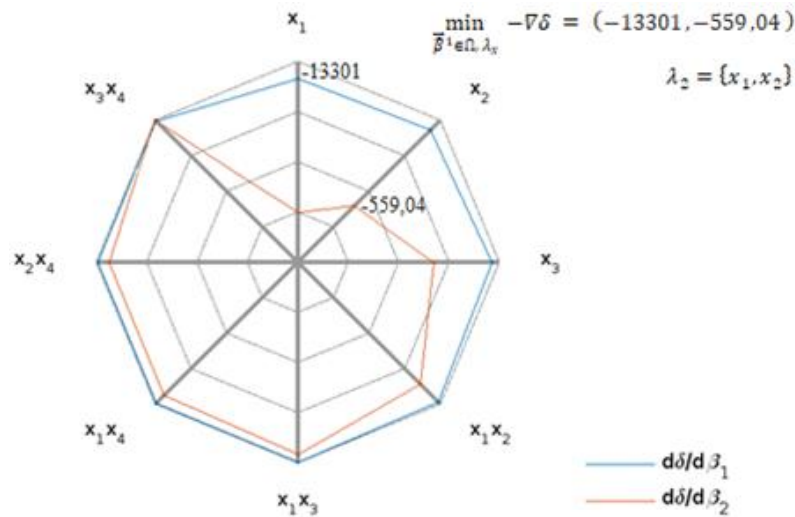


Рис. 3.4. Ілюстрація вибору структурних елементів базуючись на аналізі антиградієнту на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^1$

На діаграмі відображено значення частинних похідних в просторі структурних елементів: синім кольором відображено значення на основі першого параметра моделі, червоним – на основі другого параметра. Також наведено значення частинних похідних для вибраних структурних елементів на основі відповідних параметрів.

Як бачимо, для цих елементів одержали значення антиградієнта на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^1$:

$$-\nabla\delta = (-13301 ; -559,04),$$

що є основою для формування нової моделі-претендента.

На основі проведених обчислень сформуємо нову множину $\lambda_2 = \{x_1, x_2\}$ для моделі-претендента та здійснимо процедуру оптимізації вектора оцінок параметрів $\vec{\beta}^2$. В результаті, отримали такі значення параметрів $\vec{\beta}^2 = (2.135, 6231 - 65,7504 - 48,6644)$. Відповідно, значення цільової функції на основі $\vec{\lambda}_2 = (1, 2)$ та вектора параметрів $\vec{\beta}^2$:

$$\delta(\vec{\lambda}_2, \vec{\beta}^2, \vec{a}) = 1,1741e + 03.$$

Як бачимо з рис. 3.5. прогнозовані значення на основі досліджуваної моделі виходять за межі експериментального коридору на основі інтервальних даних, отже, модель неадекватна.

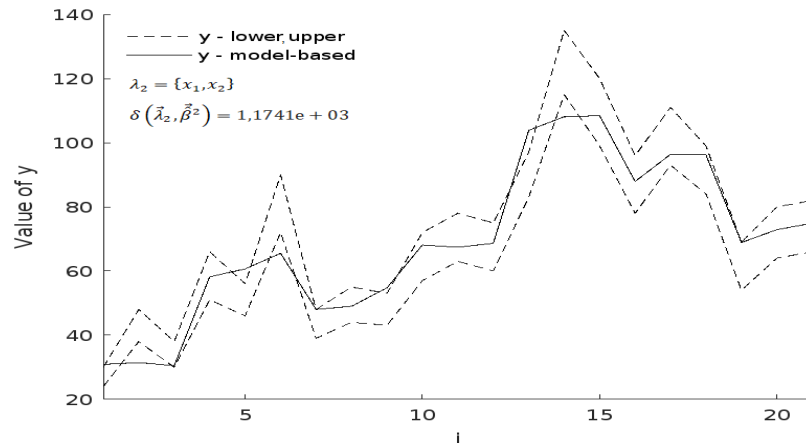


Рис. 3.5. Візуалізація співвідношення інтервального коридору, отриманого експериментально та прогнозу на основі однієї інтервальної моделі, яку побудовано на основі структури $\vec{\lambda}_2$ та значень параметрів $\vec{\beta}^2$

При цьому спостерігаємо вичерпність розмірності моделей, оскільки норма антиградієнта дорівнює 0.

Відповідно нарощуємо структуру моделі на один елемент. Для цього обираємо структурний елемент з номером 4, значення частинної похідної цільової функції для якого на основі другого параметра забезпечує мінімум, як це видно із отриманого градієнта:

$$\nabla \delta = (0 \ 0 \ 1697,1),$$

та формуємо множину $\lambda_3 = \{x_1, x_2, x_4\}$. Результати селекції структурних елементів та нарощування структури проілюстровано в таблиці 3.2 та на рис. 3.6.

Таблиця 3.2

Результати обчислень векторів антиградієнта на основі $\vec{\lambda}_2 = (1, 2)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{X}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
$\frac{d\delta}{d\beta_1^2}$	0		3836,3	3476	4969	5217,7	5215,8	5215,2	5212,2	5079,6
$\frac{d\delta}{d\beta_2^2}$		0	1998,8	1697,1	3001,3	3316,5	3291,1	3320,6	3282,4	3295,5
β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}))$									
β_1^2	1174,1	-	5090,4	5744	8743,5	10418	10355	13113	13140	15399
β_2^2	-	1174,1	1793,1	1333,4	3639	5175,6	4610,1	4512,7	4056,6	5884,1

Мінімум цільової функції при оптимізації параметрів для моделі на основі структури λ_3 :

$$\delta(\vec{\lambda}_3, \vec{\beta}^3, \vec{\alpha}) = 695,8426$$

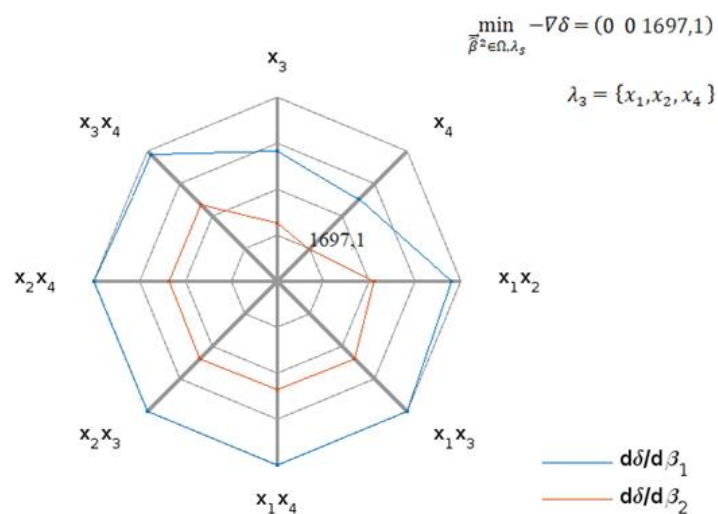


Рис. 3.6. Ілюстрація вибору структурних елементів на основі антиградієнту на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^2$

досягається на основі вектора параметрів:

$$\vec{\beta}^3 = (137,6467 - 65,2712 - 22,9995 - 35,0753).$$

Як бачимо з рисунку 3.7, отримана інтервальна модель не адекватна, оскільки прогнозовані значення виходять за межі експериментальних даних.

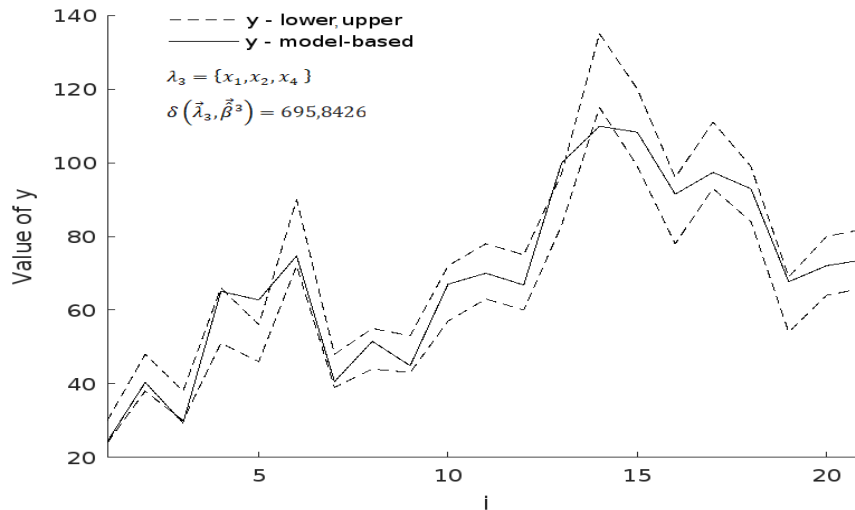


Рис. 3.7. Візуалізація співвідношення інтервального коридору, отриманого експериментально та прогнозу на основі однієї інтервальної моделі, яку побудовано на основі структури $\vec{\lambda}_3$ та значень параметрів $\vec{\beta}^3$

Результати обчислень для моделі-претендента на основі λ_3 наведено в таблиці 3.3.

Тому повторюємо процедуру нарощування структурних елементів на один структурний елемент у поточній структурі моделі-претендента.

Результати обчислень для отриманих структур на подальших ітераціях наведено в таблицях 3.4-3.5 та рисунках 3.8-3.9. З таблиці 3.4 видно, що претендентом для нарощування структури моделі є третій структурний елемент з мінімальним значенням частинної похідної на основі третього параметра $\frac{d\delta}{d\beta_3^3} = 266,44$.

Відповідно, рис. 3.8 ілюструє процедуру вибору структурного елемента на основі сформованого вектора антиградієнта $-\nabla\delta = (0 \ 0 \ 266,44 \ 0)$ та формування структури нової моделі претендента.

Таблиця 3.3

Результати обчислень векторів антиградієнту на основі $\vec{\lambda}_3 = (1, 2, 4)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{X}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^3}$	0	-	3808,3	-	4932,8	5179,7	5177,8	5177,2	5174,2	5042,6
$\frac{d\delta}{d\beta_2^3}$	-	0	944,66	-	1418,5	1567,4	1555,4	1569,4	1551,3	1557,5
$\frac{d\delta}{d\beta_3^3}$	-	-	266,44	0	1218,3	1628,6	1576,8	1639,9	1562	1726,9
β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}), \vec{\alpha})$									
β_1^3	695,84	-	5252,5	-	8174,7	10299	10959	13091	13933	16233
β_2^3	-	695,84	913,03	-	1309,8	1679,9	1728,5	1561,5	1651,9	2040,8
β_3^3	-	-	860,94	695,84	1894,4	1982,1	1788,1	1835,4	1714,6	2132,8

Таблиця 3.4

Результати обчислень векторів антиградієнту на основі $\vec{\lambda}_4 = (1, 2, 3, 4)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{X}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^4}$	0				4673,2	4907,1	4905,3	4904,7	4901,9	4777,2
$\frac{d\delta}{d\beta_2^4}$		0			834,08	921,67	914,62	922,81	912,19	915,83
$\frac{d\delta}{d\beta_3^4}$			0		1038,5	1505,9	1444,5	1519,6	1427,2	1634,2
$\frac{d\delta}{d\beta_4^4}$				0	719,93	962,37	931,8	969,07	923,06	1020,5
β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}), \vec{\alpha})$									
β_1^4	638,56	-	-	-	7261,8	9323,3	9794,3	11873	12531	14703
β_2^4	-	638,56	-	-	855,6	996,24	1008,2	967,65	1000	1145,3
β_3^4	-	-	638,56	-	1512,6	1540,5	1659	1612,6	1846,8	2127,1
β_4^4	-	-	-	638,56	1064,1	1114,4	1039	1082	1041,3	1204

В результаті обчислень отримали для моделі-претендента зі структурними елементами $\lambda_4 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$:

$$\vec{\beta}^4 = (140,0055 - 61,8362 - 13,5241 - 36,2849 - 20,7271),$$

$$\delta(\vec{\lambda}_4, \vec{\beta}^4, \vec{\alpha}) = 638,5644.$$

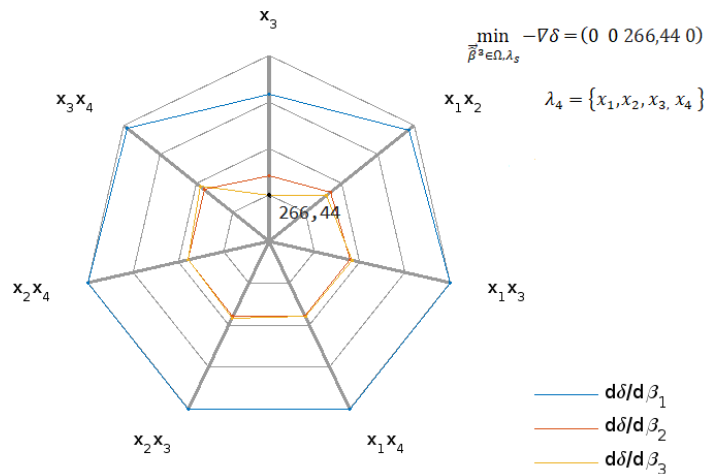


Рис. 3.8. Ілюстрація щодо вибору структурних елементів на основі антиградієнту на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^3$

Дана модель також виявилася не адекватною, оскільки не задовольняє умови (2.1), що проілюстровано на рисунку 3.9.

Відповідно було здійснено нарощування структури структурним елементом $\lambda_5(5) = x_1 \cdot x_2$, оскільки частинна похідна на основі четвертого параметру зі значенням $\frac{d\delta}{d\beta_4^4} = 719,93$ (табл. 3.4) забезпечила формування мінімального антиградієнта $-\nabla\delta = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 719,93)$. Вибір структурного елемента та нарощування структури на основі аналізу градієнта цільової функції проілюстровано на рис. 3.10.

Для моделі-претендента зі структурними елементами $\lambda_5 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 \cdot x_2\}$ отримано результати оптимізації цільової функції у такому вигляді:

$$\vec{\beta}^5 = (152,5511 - 85,3696 - 55,7219 - 9,4951 - 31,7986 \ 49,6086),$$

$$\delta(\vec{\lambda}_5, \vec{\beta}^5, \vec{a}) = 557,055.$$

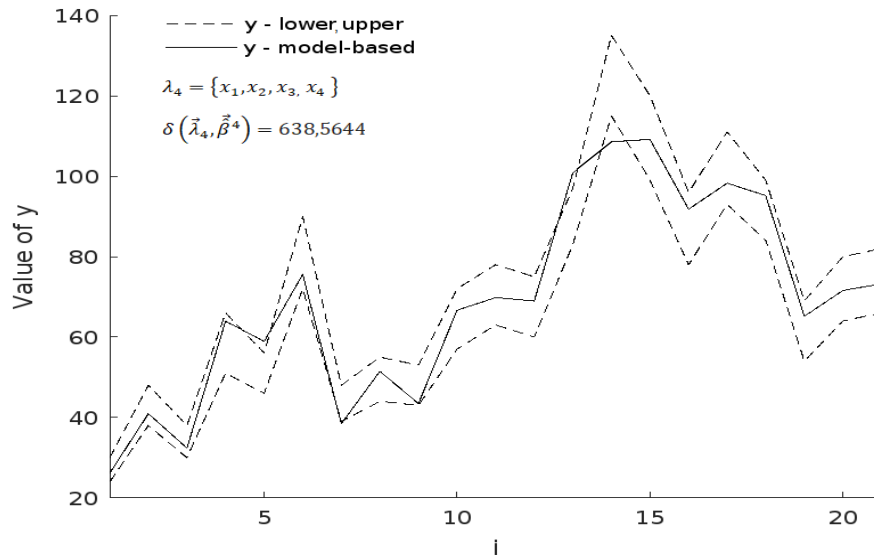


Рис. 3.9. Візуалізація співвідношення інтервального коридору, отриманого експериментально та прогнозу на основі однієї інтервальної моделі, яку побудовано на основі структури $\vec{\lambda}_4$ та значень параметрів $\vec{\beta}^4$

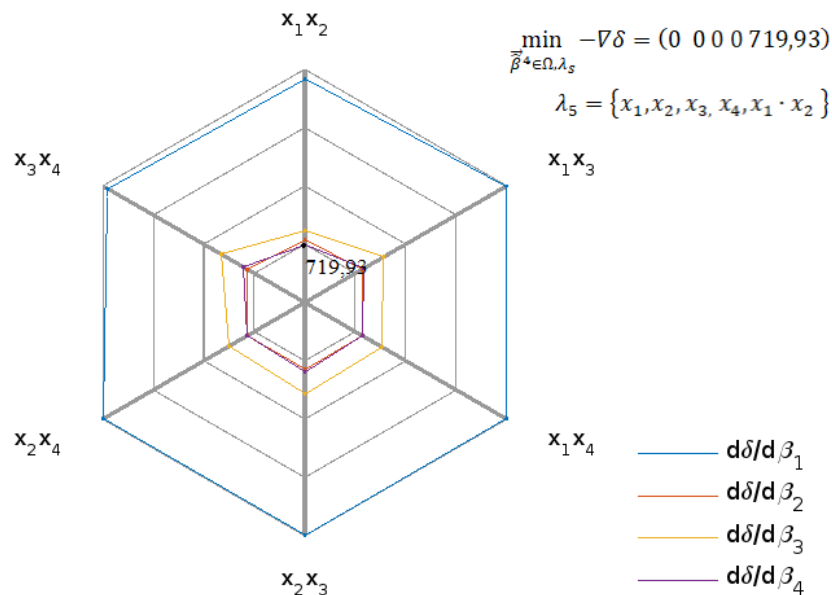


Рис. 3.10. Ілюстрація щодо вибору структурних елементів на основі градієнту на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^4$

Модель не адекватна. Рис. 3.11 ілюструє наявність точок спостережень для яких не виконується умова (2.1).

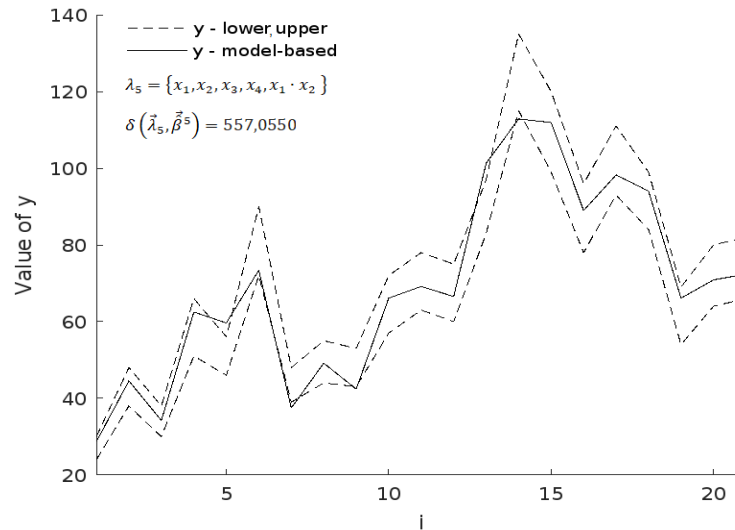


Рис. 3.11. Візуалізація співвідношення інтервального коридору, отриманого експериментально та прогнозу на основі однієї інтервальної моделі, яку побудовано на основі структури $\vec{\lambda}_5$ та значень параметрів $\vec{\beta}^5$

Як бачимо з таблиці 3.5 претендентом для редуції та заміни п'ятого структурного елемента у моделі є елемент $\lambda_5(10) = x_3 \cdot x_4$, для якого отримали мінімальне від'ємне значення частинної похідної на основі п'ятого параметра $\frac{d\delta}{d\beta_5^5} = -1260,1$. Відповідно, на шостій ітерації реалізації обчислювальної схеми на основі антиградієнта $-\nabla\delta = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1260,1)$ сформовано модель-претендент зі структурними елементами $\lambda_6 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_3 \cdot x_4\}$, що проілюстровано на рис. 3.12.

Таблиця 3.5

Результати обчислень градієнту на основі $\vec{\lambda}_5 = (1, 2, 3, 4, 5)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{x}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^5}$	0					6774,6	6772,1	6771,3	6767,4	6595,3
$\frac{d\delta}{d\beta_2^5}$		0				3797,4	3768,4	3802,1	3758,4	3773,4

$\frac{d\delta}{d\beta_3^5}$			0			394,07	378,01	397,65	373,48	427,65
$\frac{d\delta}{d\beta_4^5}$				0		1476,4	1429,5	1486,7	1416,1	1565,5
$\frac{d\delta}{d\beta_5^5}$					0	-914,17	-780,02	-945,48	-743,63	-1260,1
β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}), \vec{a})$									
β_1^5	557,06	-	-	-	-	16909	17692	21793	22920	27160
β_2^5	-	557,06	-	-	-	6245,6	6027,6	5586,2	5625,2	8271,6
β_3^5	-	-	557,06	-	-	614,06	633,51	634,92	666,34	688,74
β_4^5	-	-	-	557,06	-	1594,2	1362,7	1521	1363,5	1787,8
β_5^5	-	-	-	-	557,06	1361,5	1270,1	1341,6	1522,5	2387,6

Як показано на рис 3.13, модель задовольняє умови (2.1) для обчислених значень параметрів:

$$\vec{\beta}^6 = (2.177, 2073 \quad -54,4447 \quad 1,9872 \quad -123,1516 \quad -129,6978 \quad 163,8513).$$

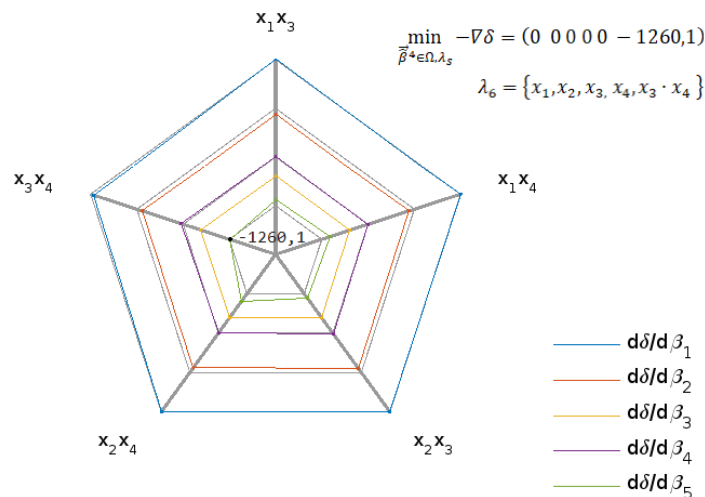


Рис. 3.12. Ілюстрація щодо вибору структурних елементів на основі градієнту на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^5$

Для цього випадку отримане значення цільової функції оптимізаційної задачі:

$$\delta(\vec{\lambda}_6, \vec{\beta}^6, \vec{\alpha}) = 235,2256.$$

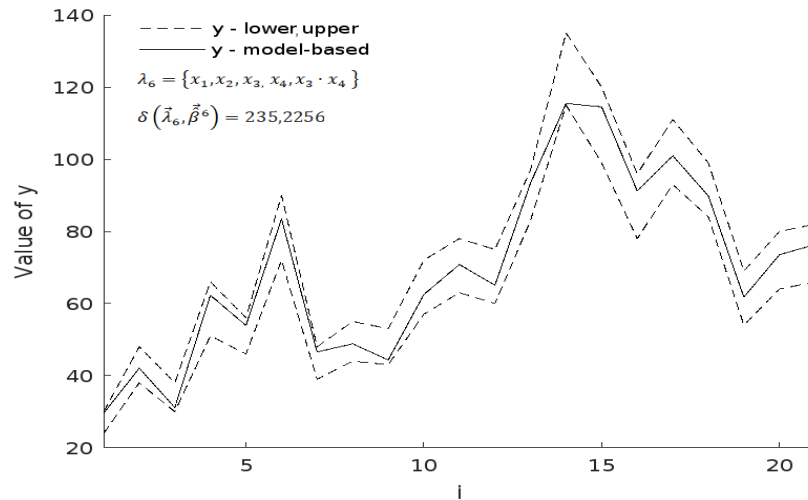


Рис. 3.13. Візуалізація співвідношення експериментального коридору та прогнозу на основі моделі зі структурою $\vec{\lambda}_6$ та вектором параметрів $\vec{\beta}^6$

Отже, проведені чисельні експерименти підтвердили правило 1, про необхідну умову оптимальності множини структурних елементів λ_m . Водночас, чисельні експерименти продемонстрували, що використання значення похідної цільової функції (3.6) в залежності від зміни значень параметрів при нарощенні структури відповідними структурними елементами дає можливість обирати в структуру необхідні структурні елементи і забезпечувати збіжність процедури структурної ідентифікації.

Слід також відмітити, що виконання умови оптимальності множини структурних елементів за правилом 1 є недостатнім, оскільки не уможливорює відсіювання структурних елементів, що не забезпечують мінімізацію цільової функції. Наприклад, додатковий структурний елемент в моделі, яку побудовано на основі структурних елементів з множини λ_2^1 , редукували, оскільки мінімум цільової функції на основі цієї структури з доданим елементом перевищує мінімум для структури без цього елемента. Відповідно, це не забезпечує оптимальну збіжність процедури структурної ідентифікації. Цей факт ураховано у наступному підрозділі.

3.3. Метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей на основі аналізу градієнта цільової функції

Враховуючи результати досліджень, які наведено у попередньому підрозділі, розроблено процедури структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі селекції структурних елементів із використанням аналізу градієнта цільової функції.

Отже, в основу процедури вибору структурних елементів в ході синтезу структури інтервальної моделі покладено аналіз частинних похідних цільової функції відносно вектора параметрів та оцінювання значення оптимуму цільової функції для поточної структури. Відповідно вибір структурних елементів з множини λ_s для заміни існуючих елементів вектора $\vec{\lambda}_m$ повинен здійснюватися на основі аналізу похідної цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m)$ для обчислених значень параметрів β_v^m із врахуванням структурного елемента $f_w^s(\vec{\beta}^m, X)$, що є претендентом на редукцію чи нарощування структури моделі. Параметри моделі є розв'язками такого рівняння:

$$\sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) + \beta_v^m \cdot f_w^s(\vec{\beta}^m, \vec{X}_i) \right)^2 = \delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha}), \quad (3.11)$$

де

β_v^m – параметр для знаходження частинної похідної цільової функції при врахуванні структурних елементів множини λ_s , $v = \overline{1, s}$;

$f_v^s(\vec{\beta}^m, \vec{X}_i)$ – структурний елемент з множини λ_s , $f_w^s(\vec{\beta}^m, \vec{X}_i) \in \lambda_s \wedge f_w^s(\vec{\beta}^m, \vec{X}_i) \notin \lambda_m$, $w = \overline{1, s}$.

Відсутність розв'язків β_v^m наведеного рівняння (3.11) для деякого структурного елемента $f_w^s(\vec{\beta}^m, \vec{X}_i)$ означає, що введений структурний елемент не забезпечує мінімізації цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha})$. Такі структурні

елементи необхідно виключати із процедури синтезу структури моделі на поточній ітерації.

Для кількісної оцінки «якості», в сенсі мінімізації цільової функції, нових структурних елементів, для яких існує розв'язок рівняння (3.11), запропоновано використовувати значення частинної похідної цільової функції

$$\left. \frac{d}{d\beta_v} \delta \left(\hat{\beta}_v^m, f_w^s \left(\vec{\beta}^m, X \right), \vec{\alpha} \right) \right|_{\beta = \hat{\beta}_v^m, \delta = \min \delta \left(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha} \right)} \quad (3.12)$$

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

Відповідно сформулюємо правило для визначення найбільш придатного претендента, в сенсі мінімізації цільової функції, серед елементів множини λ_s .

Правило 2. Найбільш придатним претендентом серед усіх структурних елементів для структури $\vec{\lambda}_m$ є той, який при нарощуванні структури моделі забезпечує найменше значення цільової функції (3.6), що визначається максимальним значенням похідної цільової функції $\delta \left(\vec{\lambda}_m, \vec{\beta}^m, \vec{\alpha} \right)$ для обчисленого значення параметра $\beta_v^m \in \vec{\beta}^m$ на основі поточного мінімуму цільової функції.

Такий підхід забезпечить редукцію структурних елементів, що погіршують «якість» моделі, оскільки для них не існує значення похідної на основі вектора оцінених параметрів та можливість вибору найкращого структурного елемента для поточної моделі з метою мінімізації цільової функції. При цьому числове значення похідної для обчислених параметрів моделі надає оцінку «якості» доданого структурного елемента, в сенсі забезпечення зменшення значення цільової функції (3.6). Відповідно необхідно обирати структурний елемент із максимальним значенням похідної в точці простору параметрів, яка відповідає мінімуму цільової функції для

структури поточної моделі-претендента.

Для визначення значень параметрів β_v^k для структурних елементів з множини λ_s при знайденому мінімумі цільової функції на основі структури $\vec{\lambda}_m^k$ розв'яжемо рівняння (3.11).

Відповідно, рівняння (3.11) набуде такого вигляду:

$$\sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) + \beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2 = \delta(\vec{\lambda}_m^k, \vec{\beta}^k, \vec{\alpha}); \quad (3.13)$$

Розкриваючи квадрат суми, зведемо рівняння до такого вигляду:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \left(\left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right)^2 + 2 \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right) \times \right. \\ & \quad \left. \times \beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) + \left(\beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2 \right) = \delta(\vec{\lambda}_m^k, \vec{\beta}^k, \vec{\alpha}); \\ & \sum_{i=1}^N \left(\left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right)^2 + \sum_{i=1}^N 2 \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right) \times \right. \\ & \quad \left. \times \beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) + \sum_{i=1}^N \left(\beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2 \right) = \delta(\vec{\lambda}_m^k, \vec{\beta}^k, \vec{\alpha}); \\ & \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right)^2 + \sum_{i=1}^N 2 \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right) \times \\ & \quad \times \beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) + \sum_{i=1}^N \left(\beta_v^k \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2 - \delta(\vec{\lambda}_m^k, \vec{\beta}^k, \vec{\alpha}) = 0. \quad (3.14) \end{aligned}$$

Уведемо такі позначення:

$$A = \sum_{i=1}^N \left(f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2;$$

$$B = 2 \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right) \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i);$$

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

$$A \cdot (\beta_v^k)^2 + B \cdot \beta_v^k + C = 0;$$

Отримаємо розв'язки:

$$\beta_v^k = \frac{-B \pm \sqrt{4AC}}{2A}.$$

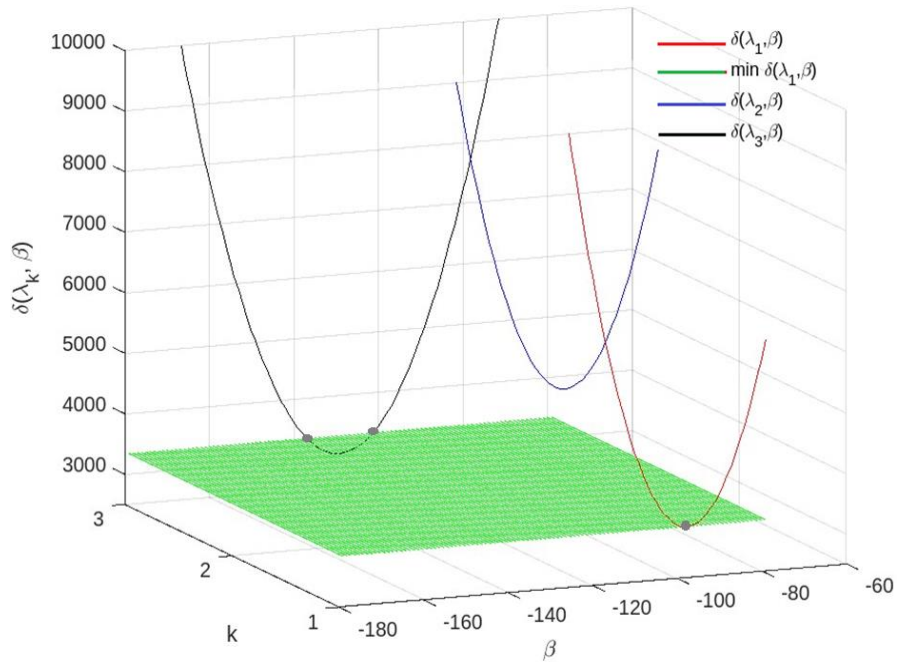
Зробивши зворотну підстановку, отримаємо:

$$\beta_v^k = \left(2 \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right) \cdot f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \pm \sqrt{4 \sum_{i=1}^N \left(f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\vec{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) \right)^2 - \delta(\vec{\lambda}_m^k, \vec{\beta}^k, \vec{\alpha})} \right) /$$

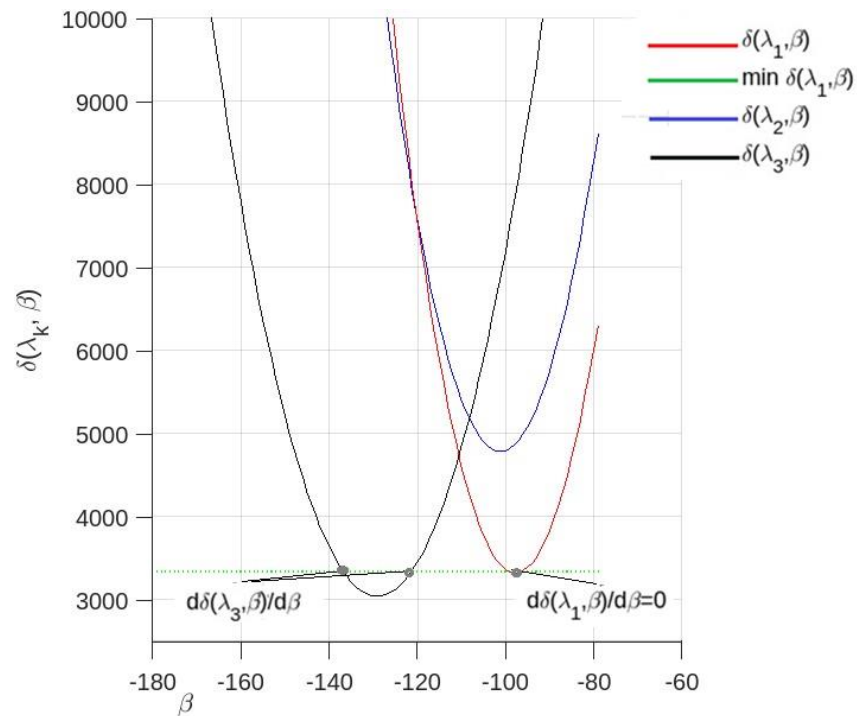
$$/ 2 \sum_{i=1}^N \left(f_w^s(\vec{\beta}^k, \vec{X}_i) \right)^2, v = \overline{1, s}. \quad (3.15)$$

Для підтвердження правила 2 проведемо чисельний експеримент, використовуючи умови з п. 3.2. З цією метою продемонструємо вибір структурного елемента для розмірності моделей претендентів $m_1 = 1$ та сформуємо структуру на основі першого структурного елемента $\lambda_1^1 = (1)$, що відповідає множині елементів $\lambda_1 = \{x_1\}$.

На рисунку 3.14 (а) відображено графіки цільової функції на основі трьох моделей зі структурами $\lambda_1^1, \lambda_1^2, \lambda_1^3$ відповідно.



(a)



(б)

Рис. 3.14. Ілюстрація вибору структурного елемента на основі оцінки похідної цільової функції.

При цьому на основі моделі зі структурою λ_1^1 обчислено вектор

параметрів $\vec{\beta}^1 = (127.7143 \quad -97.7381)$ та визначено глобальний мінімум цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\beta}^1, \vec{\alpha}) = 3.3370e + 03$.

Значення мінімуму цільової функції для поточної структури моделі-претендента використовується для обчислення частинної похідної цільової функції з доданими до поточної моделі-претендента структурними елементами з метою вибору (селекції) нових структурних елементів, які забезпечать її подальше зменшення. Як бачимо на рисунку 1(б), структурний елемент, який формує структуру λ_1^2 не забезпечує мінімізацію цільової функції та відповідно не використовується для формування поточної структури.

Відповідно структурний елемент, що формує структуру λ_1^3 , є претендентом для нарощування структури поточної моделі-претендента.

Для порівняння збіжності методу на основі правила 2 із числовими експериментами в п. 3.2, аналогічно, задамо початкову розмірність моделей претендентів $m_1 = 2$ та сформуємо початкову структуру на основі вектора $\vec{\lambda}_1 = (4, 8)$, що відповідає множині елементів $\lambda_1 = \{\beta_1 \cdot x_4, \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_3\}$.

Результати мінімізації цільової функції на основі множини структурних елементів:

$$\vec{\beta}^1 = (109.2967, 0.2834, -136.8730);$$

$$\delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\beta}^1, \vec{\alpha}) = 1.1094e + 03.$$

Таблиця 3.6 містить результати обчислень в ході оптимізації структури розмірності $m_1 = 2$ у вигляді вектора $\vec{\beta}_w^k$, $w = \overline{1, s}$, який сформований на основі обчислених коренів рівняння (3.13) для відповідних структурних елементів множини λ_s та значень частинної похідної цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\beta}^1, \vec{\alpha})$ у відповідних точках, що визначаються вектором $\vec{\beta}_w^k$ для відповідних структурних елементів $f_w^s(\vec{\beta}^k, X)$. Як бачимо, претендентами на нарощування поточної структури є перший структурний елемент, який при включенні

забезпечує максимальне значення частинної похідної цільової функції для першого параметра $\frac{d\delta}{d\beta_1^1} = 7547.9$, та шостий – для другого параметра зі значенням $\frac{d\delta}{d\beta_2^1} = 1137.7$.

Таблиця 3.6.

Результати обчислень векторів антиградієнта на основі $\vec{\lambda}_1 = (4, 8)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{\beta}^k, X)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^1}$	7547.9	–	2816.9	0	1367.8	–	1187.8		2642.9	1085.8
$\frac{d\delta}{d\beta_2^1}$	–	–	–	–	–	1137.7	–	0	–	–
β_v^k	$\vec{\beta}_w^k$									
	β_1^1	β_2^1	β_3^1	β_4^1	β_5^1	β_6^1	β_7^1	β_8^1	β_9^1	β_{10}^1
β_1^1	23.986	–	14.524	0.2834	11.948	–	14.636		31.383	20.066
β_2^1	–	–	–	–	–	-251.613	–	-136.873	–	–

Знаходження мінімуму функції зі сформованою структурою на основі вектора $\vec{\lambda}_1 = \{1,6\}$, для якої отримали: $\vec{\beta}^1 = (115.3435, -20.9745, -114.2609)$, $\delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\beta}^1, \vec{\alpha}) = 983.6042$, показало, що оптимальна модель-претендент з поточною розмірністю є не адекватною, що вимагає нарощування структури моделі-претендента. При цьому претендентом на включення в множину λ_2 є третій елемент, відповідно $\lambda_2 = \{\beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_3\}$.

Отже, модель-претендент на основі цієї структури виявилася найкращою серед поточних з однаковою кількістю елементів (однакової розмірності), проте, ця модель-претендент не задовольняє умовам (2.1). Результати обчислень, які отримано для цієї моделі-претендента:

$$\vec{\beta}^2 = (143.4542, -61.4537, -85.7580, 4.9531),$$

$$\delta(\vec{\lambda}_2, \vec{\beta}^2, \vec{\alpha}) = 743.09.$$

Для нарощування структури моделі використаємо додатково дев'ятий структурний елемент, який на першій ітерації уможливив найбільше зменшення значення цільової функції. На цій підставі, на наступній ітерації отримали такі результати:

$$\lambda_3 = \{\beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_4\},$$

$$\vec{\beta}^3 = (149.0446 \quad -62.5025 \quad -70.1324 \quad -39.6015 \quad 26.1853),$$

$$\delta(\vec{\lambda}_3, \vec{\beta}^3, \vec{\alpha}) = 468.09.$$

В таблиці 3.7 наведено результати аналізу частинних похідних цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_3, \vec{\beta}^3, \vec{\alpha})$.

Таблиця 3.7.

Результати аналізу похідної на основі структури $\vec{\lambda}_3 = (1, 3, 6, 9)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{\beta}^k, X)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^3}$	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$\frac{d\delta}{d\beta_2^3}$	-	-	0	-	-	-	-	-	-	-
$\frac{d\delta}{d\beta_3^3}$	-	-	-	-7425.4	-	0	-	-	-	-
$\frac{d\delta}{d\beta_4^3}$	-	-	-	-	-	-	-	-	0	4625.4
β_v^k	$\vec{\beta}_w^k$									
	β_1^3	β_2^3	β_3^3	β_4^3	β_5^3	β_6^3	β_7^3	β_8^3	β_9^3	β_{10}^3
β_1^3	-62.5025	-	-	-	-	-	-	-	-	-
β_2^3	-	-	-70.1324	-	-	-	-	-	-	-
β_3^3	-	-	-	-94.8341	-	-39.6015	-	-	-	-
β_4^3	-	-	-	-	-	-	-	-	26.1853	115.7528

Як бачимо, претендентами на заміну є шостий та дев'ятий структурні елементи, при цьому сформований вектор $\vec{\lambda}_4 = (1, 3, 4, 10)$, на основі якого отримали адекватну модель з такими результатами:

$$\lambda_4 = \{\beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_4, \beta_1 \cdot x_3 \cdot x_4\},$$

$$\vec{\beta}^4 = (183.9680 \quad -52.6150 \quad -145.1816 \quad -131.8135 \quad 180.5750 \quad),$$

$$\delta(\vec{\lambda}_4, \vec{\beta}^4, \vec{\alpha}) = 3.0233e - 09,$$

$$\vec{\alpha} = (0.9371, 0.1761, 0.063, 0.6019, 0.504, 0.6289, 0.7521, \\ 0.245, 0.0897, 0.3593, 0.5249, 0.4052, 0.8023, 0.0859, 0.8418, 0.7212, \\ 0.517, 0.4829, 0.4886, 0.6699, 0.7426).$$

Адекватність моделі демонструє рис. 3.15.

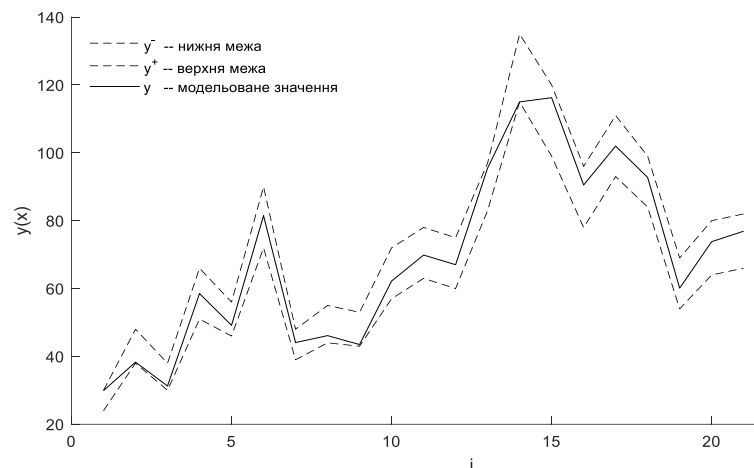


Рис. 3.15. Візуалізація співвідношення інтервального коридору, отриманого експериментально та прогнозу на основі адекватної інтервальної моделі, яку побудовано на основі структури λ_4

Отже, отримані результати чисельних експериментів підтверджують правило 2 для нарощування структури моделей-претендентів із селекцією структурних елементів на основі аналізу градієнта цільової функції. Порівняння збіжності методу структурної ідентифікації на основі правила 1 та 2 із чисельним експериментом з п. 3.2. наведено на рис. 3.16.

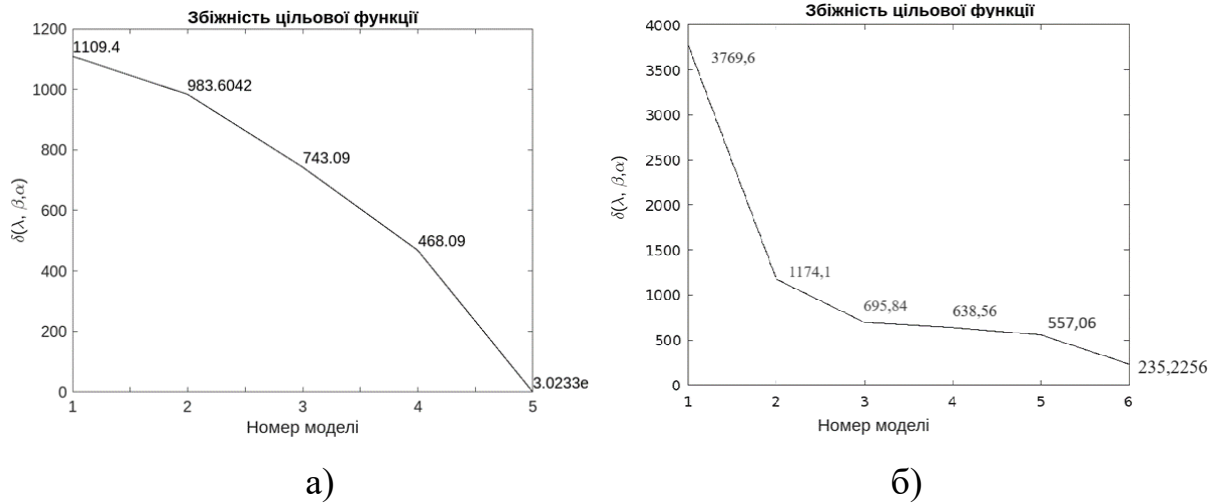


Рис. 3.16. Збіжність методу структурної ідентифікації інтервальної моделі: а) на основі правила 1 та правила 2, б) на основі правила 1

Як продемонстровано на рис. 3.16, кількість оцінених моделей є меншою та при цьому отримана модель в останньому випадку є простішою з точки зору складності.

3.4. Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації та його апробація

На основі вище викладеного розроблено алгоритм структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей статичних систем, який базується на мінімізації цільової функції в просторі параметрів із напрямленим вибором дискретних значень з множини структурних елементів на основі аналізу градієнта цільової функції.

Псевдокод алгоритму структурної ідентифікації наведено нижче.

Алгоритм 3.1. Структурна ідентифікація інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

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

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

Кінець для v

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

Якщо модель адекватна:

$Stop_Criterion = TRUE;$

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 $\vec{\beta}^k;$

Для обчислення антиградієнта можна використовувати чисельний метод або аналітичний вираз для значень частинних похідних на основі вектора параметрів $\vec{\beta}^k$ на основі заданих структурних елементів:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\beta_v^k} \delta \left(\beta_v^k, f_w^s(\vec{\beta}^k, X) \right) &= \frac{d}{d\beta_v} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{y}_i(\lambda_k, \vec{\beta}^k) - P([y_i^-, y_i^+], \alpha_i) +}{f_v^s(\vec{\beta}_v^k, \vec{X}_i)} \right)^2 = \\ &2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{y}_i(\lambda_k, \vec{\beta}^k) - P([y_i^-, y_i^+], \alpha_i) +}{f_v^k(\beta_v^k, \vec{X}_i)} \right) \cdot \frac{d}{d\beta_v} \sum_{l=1}^N f_v^s(\beta_v^k, \vec{X}_l), \quad (3.16) \end{aligned}$$

де

$$\hat{y}_i(\lambda_k, \vec{\beta}^k) = \sum_{q=1}^{m_k} f_q(\vec{\beta}_q, \vec{X}_i), \quad q \neq v;$$

β_v^k – параметр моделі за яким здійснюється диференціювання цільової функції, $\beta_v^k \in \vec{\beta}_v^k;$

$f_v^s(\vec{\beta}_v, \vec{X}_i)$ – структурний елемент, що не є елементом моделі-претендента, $f_v^s(\beta_v^k, \vec{X}_i) \in \lambda_s \wedge f_v^s(\vec{\beta}_v, \vec{X}_i) \notin \lambda_k.$

Приклад. Для апробації розробленого алгоритму структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей побудовано інтервальну модель характеристик гідроелектростанції з метою дослідження та забезпечення максимальної ефективності використання гідроенергетичних ресурсів.

Об'єктом досліджень є МГЕС «Топольки», яку побудовано на річці Стрипа в Тернопільській області. Зазначена МГЕС має дві турбіни, які з'єднано з генераторами потужністю 70 та 90 кВт. Робота генераторів в системі вимагає постійної оцінки стану характеристик гідроресурсів та прогнозування можливої генерованої електроенергії з метою заощадливого використання обладнання станції. Зокрема, необхідним є прогнозування кожен раз при зміні погодних умов та сезонних коливань наявних гідроресурсів, з метою прийняття рішень про доцільність використання двох турбін одночасно або використання однієї з двох турбін. В такому випадку, одну із турбін можливо виводити на ремонт. Таким чином, виникає необхідність розробки та використання моделі, яка пов'язує кількість потенційно можливої згенерованої електроенергії в залежності від характеристик гідротехнічного обладнання та наявних гідроресурсів.

У результаті досліджень цієї МГЕС було отримано експериментальні дані [25]. Як бачимо з таблиці 3.8, кількість виробленої за добу електроенергії представлено в інтервальному вигляді внаслідок похибок оцінювання цієї величини технічними засобами.

Сформовано допустиму множину структурних елементів для моделі залежності генерованої електроенергії від умов функціонування МГЕС:

$$\lambda_s = \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_2, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_3^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_3^{\beta_2}, \\ \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_3^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2} \cdot x_2^{\beta_3}, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3}. \end{array} \right\}$$

Із використанням методу структурної ідентифікації, наведеного вище, отримано таку структуру інтервальної моделі добового генерування електроенергії:

Експериментальні дані генерування електроенергії МГЕС

№	Реактивна потужність, Вт	Напір води (різниця б'єсів), м	Рівень води на гідропості, м	Вироблена електроенергія, кВт
1	182,5	4,6	6,5	[1096,4; 1202,1]
2	182,7	4,7	5,5	[1078,1; 1182,1]
3	182,7	4,7	4,97	[1078,1; 1182,1]
4	182,7	4,7	5,45	[1096,4; 1202,1]
5	182,9	4,7	7,5	[1078,1; 1182,1]
6	183	4,7	11,9	[1096,4; 1202,1]
7	183,1	4,7	12,5	[1114,6; 1222,1]
8	183,1	4,7	9,8	[1132,9; 1242,2]
9	183,1	4,55	10,4	[1096,4; 1202,1]
10	183,1	4,6	13,7	[1151,2; 1262,2]
11	184,6	4,6	14,9	[1169,5; 1282,2]
12	184,6	4,6	14	[1169,5; 1282,2]
13	184,6	4,7	12,8	[1169,5; 1282,2]
14	184,7	4,65	12,5	[1151,2; 1262,2]
15	184,8	4,6	11,6	[1169,5; 1282,2]
16	184,8	4,7	10,4	[1169,5; 1282,2]
17	184,8	4,7	10,1	[1187,7; 1302,3]
18	184,8	4,8	7,3	[1059,8; 1162]
19	187,2	4,8	7,5	[1096,4; 1202,1]
20	187,2	4,7	7,1	[1114,6; 1222,1]
21	187,2	4,8	7,3	[1114,6; 1222,1]
22	187,2	4,75	8,3	[1096,4; 1202,1]
23	187,2	4,7	8,3	[1078,1; 1182,1]
24	189,1	4,6	7,24	[1059,8; 1162]
25	189,1	4,7	5,74	[1114,6; 1222,1]
26	189,2	4,7	4,64	[1023,3; 1122]
27	189,4	4,6	4,78	[1041,6; 1142]
28	189,4	4,8	5,74	[1114,6; 1222,1]
29	189,4	4,8	4,11	[1023,3; 1122]
30	189,5	4,75	5,01	[1114,6; 1222,1]

$$y(\lambda_5, X) = \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_2^{\beta_2} + \beta_2 \cdot x_3^{\beta_4} \quad (3.17)$$

та оцінки параметрів для отриманої моделі:

$$\hat{\beta} = (88.619, 0.4256, 2.5533, 0.4914),$$

$$\hat{\alpha} = (0.1985, 0.273, 0.1713, 0.0865, 0.6162, 0.9991, 0.8814, 0.397, \\ 0.7368, 0.5845, 0.5823, 0.4998, 0.4427, 0.5582, 0.2692, 0.1964, 0.0002, \\ 0.9202, 0.675, 0.3728, 0.4643, 0.7596, 0.9164, 0.9667, 0.2294, 0.9564, \\ 0.7288, 0.3038, 0.9127, 0.1438)$$

Відповідно, побудовано математичну модель на основі інтервальних даних та структури (3.17) у такому вигляді:

$$y(X) = 88.619 \cdot x_1 \cdot x_2^{0.4256} + 2.5533 \cdot x_3^{0.4914}. \quad (3.18)$$

Графічне представлення виконання умови (2.1) для отриманої моделі, тобто включення прогнозованих на основі моделі (3.18) значень у експериментальний коридор, що отриманий на основі вимірювань, наведено на рис. 3.17.

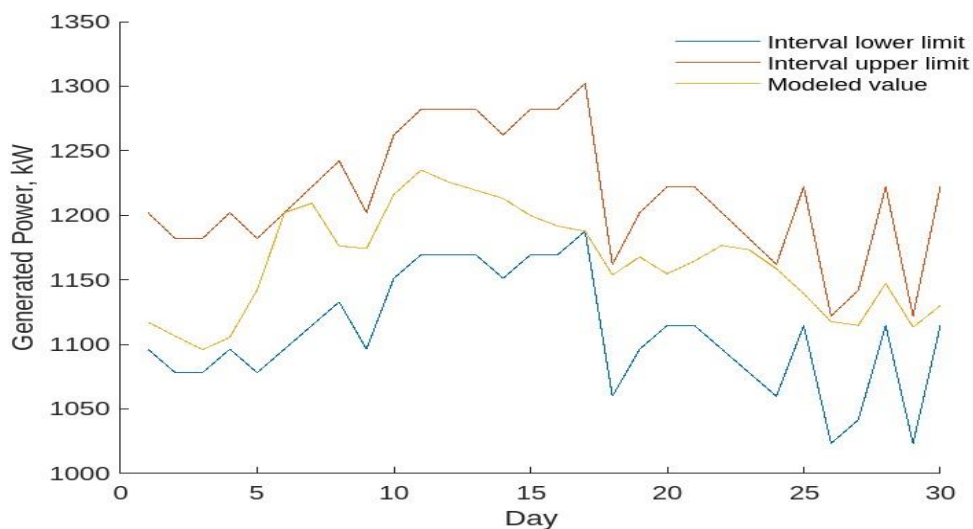


Рис. 3.17. Інтервальна модель (3.18) генерованої електроенергії МГЕС та її зіставлення з експериментальними даними

Ефективність запропонованого методу та алгоритму його реалізації демонструє збіжність даного алгоритму в ході структурної ідентифікації моделі (3.18). Графік збіжності цільової функції наведено на рисунку 3.18.

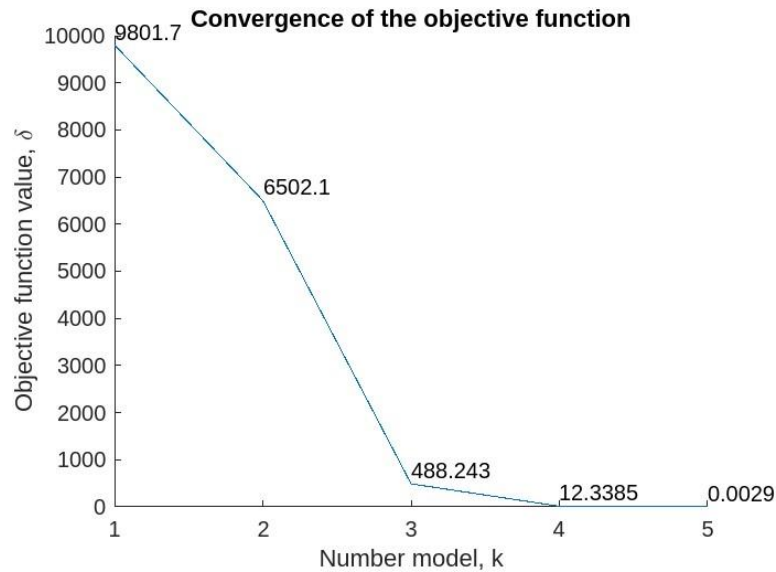


Рис. 3.18. Ілюстрація збіжності алгоритму структурної ідентифікації для моделі (3.18)

Як бачимо, для вхідної множини λ_s із 12 структурних елементів кількість оцінених моделей склала п'ять, що свідчить про ефективність даного методу не зважаючи на додаткові обчислювальні затрати щодо аналізу похідної цільової функції та градієнта.

Висновки до розділу 3

1. Розглянуто задачу структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Показано, що зазначена задача є оптимізаційною задачею з нелінійною цільовою функцією, яка мінімізує квадратичне відхилення між значеннями модельованої характеристики статичної системи та значеннями, вибраними на експериментальних числових інтервалах цієї характеристики. Встановлено, що мінімізація багатоекстримальної цільової функції здійснюється в просторі дискретних елементів, які визначають структуру моделі та її параметрів, значення яких є розв'язками оптимізаційної задачі (3.3-3.5).

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

3. 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 частинної похідної по параметру моделі для редукованого чи доданого структурного елемента, що забезпечило не стохастичний, а напрямлений вибір елементів і відповідно зниження кількості ітерацій обчислюваних процедур структурної ідентифікації. На тестових прикладах підтверджено збіжність запропонованого методу.

4. Розроблено алгоритм структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, який апробовано на прикладі побудови інтервальної моделі генерованої електроенергії МГЕС в залежності від характеристик гідротехнічних споруд.

РОЗДІЛ 4.

МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ

Онтологічний підхід уможливорює створення формального представлення знань в певній області, що є важливим для систематизації та структурування інформації. Однак, в контексті моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних, існуючі методи на основі онтологічного підходу не забезпечують достатніх засобів для активного управління процесом моделювання. Причиною цьому є те, що існуючі методи орієнтовані на опис структури та взаємозв'язків між елементами системи, а не на обчислювальні процедури реалізації алгоритмів моделювання.

В прикладній площині більшість відомих методів побудови математичних моделей вбудовано в конкретні програмні засоби або потребують формальної інтерпретації для використання в загальних математичних інструментах. Наприклад, для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками необхідним є спеціалізоване програмне забезпечення для аналізу інтервальних даних. Формалізація таких моделей включає в себе чітке визначення синтаксичних та семантичних правил, які є підставою для ідентифікації моделей із застосуванням різних програмних середовищ.

Процедурна частина онтологічного опису визначає набір процедур для реалізації методів побудови математичних моделей, які належать до конкретних програмних модулів та бібліотек модулів. Своєю чергою, це обмежує можливість адаптації та переносу таких процедурних знань до інших контекстів або програмних середовищ. Наприклад, алгоритми для обробки інтервальних даних можуть бути реалізовані в одному програмному продукті, але не доступні для використання в іншому. Декларативні представлення, що

описують, завдання можуть забезпечити більшу гнучкість, але їх реалізація вимагає більшої формалізації та інтеграції в існуючі системи.

Створення онтологічних описів для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних дає можливість подолати обмеження в існуючих програмних засобах. Такі онтологічні описи забезпечують більшу гнучкість процесу моделювання, уможливаючи використання різних програмних інструментів в інтегрованому середовищі. Наприклад, онтологічна модель може описувати різні методи обробки інтервальних даних та їх застосування в моделюванні, що спрощує вибір та комбінування методів для конкретних задач.

Зважаючи на викладене вище, виникає необхідність розробки онтологічних описів предметної області моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних для забезпечення автоматизованого управління процесом моделювання, особливо в контексті застосування різних методів побудови інтервальних моделей. Як відомо з попередніх розділів, ці методи ґрунтуються на розв'язуванні різних типів оптимізаційних задач структурної та параметричної ідентифікації таких моделей. Такий підхід уможливує автоматизований вибір методу оптимізації, формалізуючи знання про задачі та методи, і пропонуючи адаптивні рекомендації на основі аналізу характеристик оптимізаційних задач.

У розділі обґрунтовано та побудовано уніфікований метод ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, що базується на знання-орієнтованому підході до опису предметної області стосовно класу задач ідентифікації та правил комбінування методів оптимізації для їх розв'язування.

Розроблено правила застосування методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які базуються на характеристиках класу задач ідентифікації, таких як розмірність оптимізаційних задач та властивості цільової функції. Формалізація запропонованих правил уможливила

автоматизований вибір найбільш ефективних методів та алгоритмів ідентифікації в рамках процедурної частини онтології моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками.

Переваги запропонованого підходу проілюстровано на прикладі задачі моделювання генерованої електроенергії денного циклу модуля сонячної електростанції.

Основні результати досліджень, які наведено в цьому розділі, опубліковано автором у працях [257, 272, 290].

4.1. Характеристики задачі моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками

В другому розділі було розглянуто постановку задачі параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, як оптимізаційну задачу, що є базовою для ідентифікації статичних систем в цілому. Зазначену задачу вирішують у спосіб використання багатовимірної оптимізації.

Дослідження та розробка методів ідентифікації на основі градієнтних методів пошуку у комбінації з методами глобального пошуку, показали достатню ефективність та прийнятну обчислювальну складність. Проте, розроблені методи чутливі до типу та характеристик оптимізаційної задачі. До таких характеристик можна віднести нелінійність цільової функції, яка може впливати на її диференційованість та появу точок розриву першого та другого роду. Також важливою характеристикою є розмірність вхідних даних задачі ідентифікації статичних систем з нелінійними характеристиками. Наведені характеристики в сукупності породжують численні локальні мінімуми, які суттєво ускладнюють оптимізацію параметрів інтервальних нелінійних моделей. Поточний параграф присвячений саме цьому актуальному питанню обґрунтування характеристик задач ідентифікації статичних систем з

нелінійними характеристиками для вибору ефективного методу нелінійної оптимізації.

Розглянемо основні характеристики багатовимірного простору пошуку, які можуть зумовлювати переваги та обмеження застосування відповідних методів оптимізації. На підставі аналізу в першому розділі та практичних міркувань виділимо дві загальні характеристики задачі оптимізації параметрів інтервальних нелінійних моделей, що обумовлюють вибір відповідних методів:

- розмірність простору оптимізації;
- складність цільової функції.

Кожна характеристика може містити декілька ознак (рис. 4.1), відповідно розглянемо їх детально.



Рис. 4.1. Характеристики оптимізаційної задачі ідентифікації статичних систем з нелінійними характеристиками

Розмірність простору оптимізації.

На підставі практичного досвіду розв'язування численних прикладів окреслимо ознаки розмірності оптимізаційної задачі ідентифікації параметрів інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками:

- низька розмірність, ($n < 50$);

- середня розмірність, ($50 < n \leq 100$);
- висока розмірність, ($n > 100$),

де, $n = N + m$, N – кількість спостережень, m – кількість параметрів моделі.

Варто зауважити, що такий спосіб визначення розмірності задачі параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, пов'язаний із способом представлення цільової функції (2.6).

Складність цільової функції.

Наявність численних локальних мінімумів може значно ускладнює пошук глобального мінімуму. Наявність властивостей диференційованості та неперервності цільової функції в задачі ідентифікації моделі дає можливість знизити обчислювальну складність процесу оптимізації, оскільки уможливорює застосування градієнтних методів оптимізації в комбінації з методами глобального пошуку. Наявність розривів першого або другого роду у цільовій функції суттєво ускладнюють процедури оптимізації. У такому випадку використовують метаевристичні алгоритми чи алгоритми стохастичного пошуку.

Для оцінки ефективності застосування різних методів оптимізації для розв'язування задач ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками критеріями є часова складність та масштабованість.

Таким чином у роботі запропоновано дослідити за зазначеними критеріями ряд відомих методів глобального пошуку, які процедурно реалізовані у практично усіх відомих програмних інструментаріях: метод Global Search в комбінації з різними методами локального пошуку, метод на основі рою частинок (Particle Swarm Optimization, PSO) та метод на основі поведінкових моделей бджолиних колоній (Artificial Bee Colony, ABC). Ці методи можуть бути ефективними в умовах складного «ландшафту» цільової функції та за наявності її розривів.

Масштабованість алгоритму визначає його здатність ефективно працювати зі збільшенням розмірності задачі. Деякі алгоритми можуть добре

працювати в низькорозмірних просторах, але бути менш ефективними у високорозмірних.

Для дослідження можливостей методів нелінійної оптимізації розв'язувати задачу ідентифікації статичних систем враховуючи наведені характеристики проведемо чисельні експерименти на основі тестових функцій. Обираючи тестові функції для чисельних експериментів дослідження впливу характеристик задачі оптимізації на вибір методу, сформулюємо такі вимоги до них:

- функції повинні мати певний рівень складності обчислювальної складності, які відповідають реальним задачам оптимізації.
- функції повинні мати різні властивості, такі як диференційованість, або розриви, наявну множинну мінімумів.

Відповідно, було обрано функції Розенброка, Растрігіна та функції з розривами першого та другого роду.

Функція Розенброка (2.12) широко використовується для оцінки ефективності чисельних методів оптимізації. Вона має «вузькі довгі басейни», що робить її складною для знаходження глобального мінімуму. Зазначена функція також демонструє властивості парності мінімумів, що робить її ефективною для тестування збіжності різних алгоритмів оптимізації.

Функція Растрігіна (2.13) відома своїми «глибокими басейнами тяжіння» до оптимумів, а також великою кількістю локальних мінімумів. Вона дає можливість перевіряти ефективність та здатність методів оптимізації знаходити глобальний мінімум через наявність численних локальних мінімумів.

Обираючи функції з розривами для тестування чисельних методів оптимізації, важливо обрати такі, що відображають реальні сценарії або властивості задач, де можуть виникати особливості у роботі методів. Для оцінки здатності методів оптимізації знаходити оптимальні значення в умовах, коли функція має розриви, використано функцію з розривами першого роду такого вигляду:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \begin{cases} (x_i - 2)^2 + (x_i - 3)^2, \text{ якщо } x_i < 0, \\ (x_i + 2)^2 + (x_i + 3)^2, \text{ якщо } x_i \geq 0. \end{cases} \quad (4.1)$$

Для оцінки здатності методів оптимізації шукати розв'язки цільових функцій з більш складними розривами, які можуть породжувати високу обчислювальну складність було використано функцію з розривами другого роду такого вигляду:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i^2 - 1)^2}{(x_i - 2)^2}. \quad (4.2)$$

В таблиці 4.1 наведено результати чисельних експериментів з оптимізації на основі функції Розенброка за допомогою різних методів:

- GlobalSearch із використанням базового методу внутрішньої точки;
- GlobalSearch із використанням методу Nelder-Mead [227] (у випадках неможливості обчислення похідних цільової функції),
- PSO (Particle Swarm Optimization),
- ABC (Artificial Bee Colony).

Як зазначалося вище, для аналізу результатів було обрано два показники: час виконання (t , с) та значення цільової функції ($fval$). Значення розмірності задачі моделює дослідження задач з різною складністю і вимогами до обчислювальних ресурсів. При цьому для всіх методів були визначені рівні умови:

- кількість точок (розмір популяції):
 - низька розмірність, ($n < 50$) – $2n$;
 - середня розмірність, ($50 < n \leq 100$) – n ;
 - висока розмірність, ($n > 100$) – 200.
- максимальна кількість ітерацій – 2000, що уможливить дослідження як часових характеристик методів, так і збіжність методів на основі значення цільової функції.

Аналізуючи результати таблиці 4.1, бачимо, що процедури оптимізації на основі методу GlobalSearch показують досить стабільні результати з точки зору часу виконання і значень цільової функції для всіх задач, розглянутих розмірностей.

Таблиця 4.1

Результати чисельних експериментів оптимізації
на основі функції Розенброка

Розмірність задачі, n	GlobalSearch		GlobalSearch +Nelder-Mead	
	t, c	fval	t, c	fval
10	0.2022	6.41287e-11	0.02189	21.7808
50	0.3653	41.9778	0.136469	9072.6192
100	0.2827	0.2253	0.3103	101024.575
500	0.6365	32.9266	17.25212	6217893.878
1000	0.8115	212.398	67.68573	13441705.706
	PSO		ABC	
	t, c	fval	t, c	fval
10	0.3814	0.2852	0.0748	6561.5031
50	1.0445	46.1405	0.24062	320237.5139
100	2.5327	111.379	0.54522	757218.484
500	14.6704	11160.4341	3.4393	5145465.71
1000	42.236	293637.61	6.27198	11356482.67

Час виконання процедур методу відносно невеликий і значення цільової функції в більшості випадків близьке до нуля, що є глобальним мінімумом функції Розенброка. GlobalSearch разом з методом Недлера-Міда, що реалізує багатовимірний пошук для нелінійних функцій, показав прийнятних час обчислень для малих та середніх розмірностей ($n = 100$), але при цьому дуже низьку збіжність.

Застосування методу PSO, до розв'язування оптимізаційних задач із зазначеними тестовими цільовими функціями також показує конкурентоспроможні результати, але його час виконання зростає зі збільшенням розмірності задачі. При зростанні розмірності задачі ці методи

показують низьку збіжність. Методи на основі ABC демонструють вищу часову складність у порівнянні з методами GlobalSearch і PSO, крім випадку задач низької розмірності.

Отже, для задач із цільовою функцією, оптимізація якої має низьку конвергенцію, метод GlobalSearch виявився найефективнішим за критеріями часу виконання та досягнення оптимуму цільової функції, особливо для середніх та високих розмірностей задач.

У таблиці 4.2. наведено результати чисельних експериментів з оптимізації на основі функції Растригіна, яка відзначається великою кількістю локальних мінімумів.

Таблиця 4.2

Результати чисельних експериментів оптимізації
на основі функції Растригіна

Розмірність задачі, n	GlobalSearch		GlobalSearch +Nelder-Mead	
	t, c	fval	t, c	fval
10	0.2129	-0.0459	0.0318	92.0783
50	0.1513	-0.3534	0.0828	401.2185
100	0.146	-0.1379	0.3029	1210.8273
500	1.8609	-0.0392	17.8538	8171.5758
1000	2.1907	-0.2216	65.5429	18203.07
	PSO		ABC	
	t, c	fval	t, c	fval
10	0.0552	13.8957	0.0917	91.6063
50	0.1103	197.8292	0.3428	637.5112
100	0.5769	339.6717	0.9878	1494.5734
500	20.095	2481.0978	7.4179	8283.9717
1000	44.5976	6433.64	12.076	17337.654

Аналіз показав, що метод GlobalSearch демонструє дуже малий час виконання для всіх розглянутих розмірностей, що вказує на його високу швидкодію і ефективність. Значення цільової функції (fval) для методу

GlobalSearch є від'ємними, що вказує на здатність методу успішно знаходити мінімуми функцій в заданих областях. Метод GlobalSearch в комбінації з Nelder-Mead аналогічно з попереднім результатом має низьку збіжність. Метод PSO вимагає помітно більшого часу виконання порівняно з GlobalSearch, особливо при збільшенні розмірності задачі. На завершальних етапах процедури оптимізації, при реалізації методу PSO спостерігається низька збіжність, особливо при збільшенні розмірності. Це може свідчити про те, що при застосуванні методу PSO не завжди знаходить глобальний мінімум, також – це є наслідком обмеження на кількість ітерацій, що обумовлено експериментом. Застосування методів на основі ABC також вимагає значно більше часу для виконання, особливо на великих розмірностях задач.

Отже, при наявності великої кількості локальних мінімумів метод GlobalSearch також виявився найбільш ефективним методом з точки зору швидкості виконання і досягнення оптимуму цільової функції. Методи ройового інтелекту PSO і ABC показують гірші результати, особливо на великих розмірностях, коли вимагається збільшення обчислювальних ресурсів.

У таблиці 4.3. наведено результати чисельних експериментів з оптимізації на основі функції з розривами першого роду, яка показує здатність методів знаходити оптимум у випадку негладкої функції.

Аналіз результатів таблиці 4.3 показує, що час обчислень (t) для методу глобального пошуку метод GlobalSearch зростає зі зростанням розмірністю задачі, проте і у цих випадках зазначений метод демонструє високу збіжність. Це означає, що метод GlobalSearch досить ефективно знаходить оптимальні значення навіть для негладких цільових функцій та більш складних задач. Для методу GlobalSearch із застосуванням методу локальної оптимізації Nelder-Mead час обчислень значно зростає з розмірністю задачі. Значення функції (f_{val}) також зростає, що вказує на низьку збіжність та точність оптимізації для більш складних задач.

Для методу PSO час обчислень є відносно невеликим. Значення функції залишаються стабільними, що показує, що метод PSO забезпечує збіжність для задач різної розмірності. Застосування методу ABC не забезпечує високої збіжності для розглянутої задачі, а також його час виконання більший відносно часу реалізації на підставі методу PSO.

Таблиця 4.3

Результати чисельних експериментів оптимізації
на основі функції з розривами першого роду

Розмірність задачі, n	GlobalSearch		GlobalSearch + Nelder-Mead	
	t, c	fval	t, c	Fval
10	0.1822	130	0.0121	225.0635
50	0.181	650	0.1242	1291.4163
100	0.1939	1300	0.3032	3089.7564
500	0.3774	6500	17.2544	27236.6572
1000	0.5735	13000	65.5887	54930.8517
	PSO		ABC	
	t, c	fval	t, c	Fval
10	0.0279	130	0.0392	290.017
50	0.2525	650.0031	0.1685	2085.7988
100	1.3988	1300.0482	0.5295	4533.7481
500	14.9203	7130.0754	3.4743	25039.9897
1000	38.3542	18439.1297	6.473	51627.5984

Для тестової функції, що містить точки розриву другого роду отримали аналогічні результати, згідно яких для великих розмірностей глобальний пошук може бути ефективнішим за ройові алгоритми. Для задач низької розмірності ефективним є застосування методу ABC.

Результати чисельних експериментів оптимізації для випадку функції з розривами другого роду наведено у таблиці 4.4.

Аналізуючи результати можна відмітити неефективність методу глобального пошуку (GlobalSearch) для задач низької розмірності, в той же час він є найефективнішим для задач середньої та високої розмірності.

Таблиця 4.4

Результати чисельних експериментів оптимізації
на основі функції з розривами другого роду

Розмірність задачі, n	GlobalSearch		GlobalSearch + Nelder-Mead	
	t, c	fval	t, c	Fval
10	1.0017	1.2601e-15	0.0329	167.1384
50	0.2193	6.3006e-15	0.156	1118.1638
100	0.2281	1.2601e-14	0.3442	1972.1909
500	0.5303	1.3623e-07	16.9923	23981.025
1000	0.7469	1.0735	66.3117	196100.96
	PSO		ABC	
	t, c	fval	t, c	Fval
10	0.1307	6.5658e-08	0.0732	4.9985
50	0.3039	2.0437e-06	0.1559	576.9664
100	1.5745	6.5588e-06	0.4369	1540.4201
500	0.831	13799.525	2.9922	14868.8648
1000	1.5122	33648.0926	5.5061	33359.8355

Для методу PSO час обчислень є стабільним і відносно невеликим, хоча метод ABC продемонстрував кращий час та виявився найефективнішим для задач низької розмірності.

Відповідно, охарактеризуємо, кожен з методів з точки зору ефективності застосування.

Глобальний пошук (GlobalSearch). Цей метод поєднує локальну оптимізацію на основі методу внутрішньої точки, запропоновану в пункті 2.3, та глобальні стратегії пошуку на основі множини точок, що досліджують всю область визначення. Таким чином, зазначений метод придатний для задач

різної розмірності та складності цільової функції. Проте, умовою його ефективності є диференційованість цільової функції.

Також метод *GlobalSearch* на тестових прикладах продемонстрував найкращу збіжність та час обчислень для тестових функцій із ускладненою збіжністю (рис. 4.2.а) та за наявності багаточисленних локальних мінімумів (рис. 4.2.б).

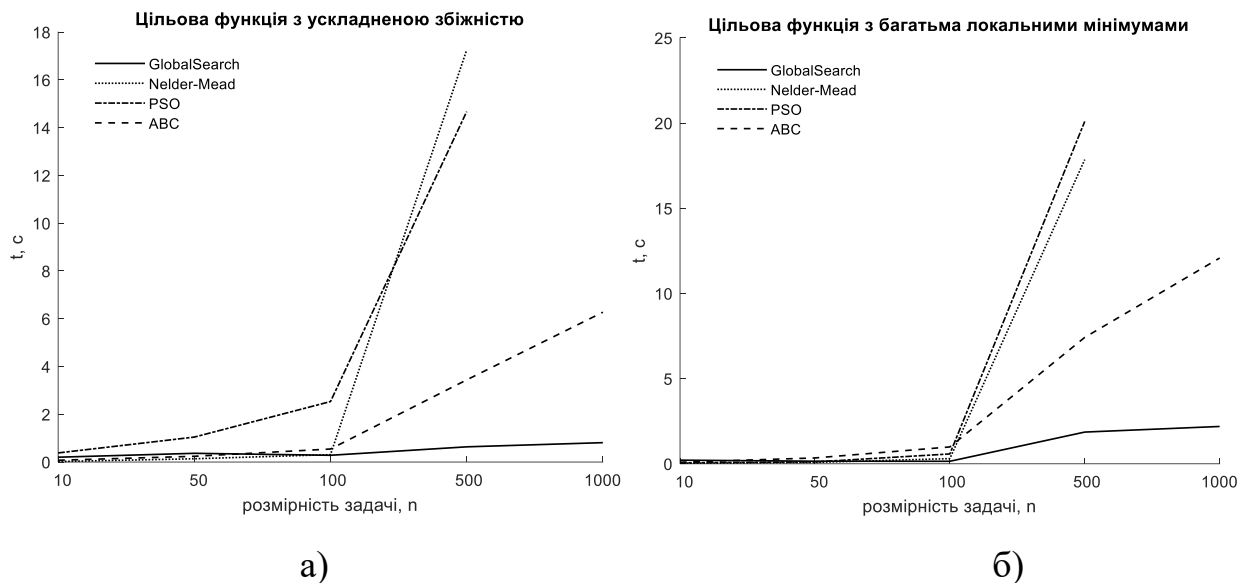


Рис. 4.1. Залежність часової складності оптимізації диференційованих функцій від розмірності задачі: а) функція Розенброка, б) функція Растрігіна

Крім того, за наявності стратегії глобального пошуку метод показує прийнятні результати у випадку цільових функцій з розривами першого та другого роду в задачах середньої та високої розмірності (рис. 4.3.а та рис. 4.3.б).

У випадку застосування *GlobalSearch* в комбінації з методом Nelder-Mead, який застосовний для задач малої розмірності, результати виявилися негативними з точки зору збіжності.

Для алгоритмів ройового інтелекту (*PSO*, *ABC*) результати засвідчили доцільність застосування для задач з недиференційованою цільовою функцією малої розмірності. Крім того, алгоритм бджолоїної колонії продемонстрував

здатність ефективно вирішувати задачу оптимізації високої розмірності на основі недиференційованої цільової функції з розривами другого роду.

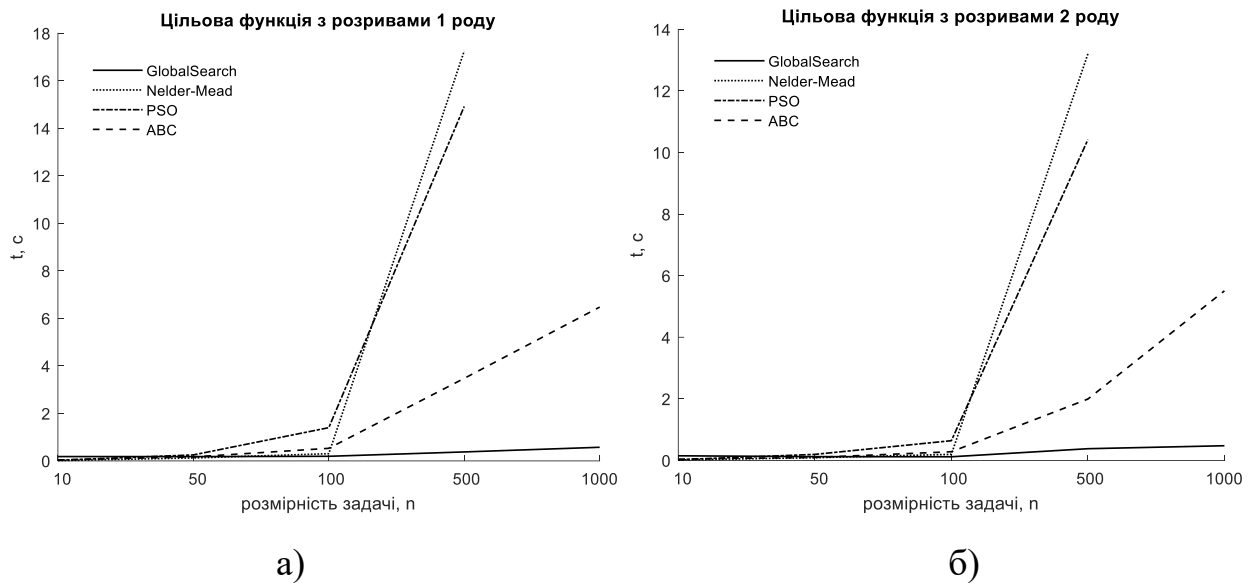


Рис. 4.2. Залежність часової складності оптимізації функцій з розривами від розмірності задачі: а) функція з розривами 1 роду, б) функція з розривами 2 роду

Підводячи підсумки чисельних експериментів визначимо умови застосування відповідних методів в залежності від характеристик задачі ідентифікації статичних систем з нелінійними характеристиками (табл. 4.5).

Таблиця 4.5

Вибір методів оптимізації на основі характеристик задач моделювання

Характеристика	Розмірність		
	низька, $n \leq 30$	середня, $30 < n \leq 100$	висока, $n > 100$
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

Розроблені рекомендації будуть слугувати основою для розробки онтології моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками та на її основі універсального методу, який забезпечить розробку ефективного інструментарію ідентифікації статичних систем на основі інтервальних даних.

4.2. Онтологія задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних

Онтологічний підхід до реалізації систем моделювання, особливо для статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних, має ряд переваг, які підвищують ефективність у кількох ключових аспектах. Онтологія забезпечує формалізовану та структуровану основу для подання знань. Онтології можуть бути легко розширені та модифіковані, що дозволяє легко додавати нові методи оптимізації, типи задач або характеристики задачі. Завдяки формалізованим правилам та структурованим базам даних онтологічний підхід дозволяє автоматизувати процес вибору оптимальних методів для конкретних задач. Збереження та аналіз даних про виконання різних методів для схожих задач дозволяє використовувати емпіричні дані для вдосконалення цих рекомендацій.

Особливістю запропонованого підходу є уможливлення повторного використання компонентів розроблених моделей в процесі ідентифікації нових моделей. Рівняння, змінні та припущення, які використано для існуючих моделей можуть бути повторно використані при створенні інших моделей. Крім того, сформована база математичних моделей може бути використана для інтерпретації та повторного використання в інших інформаційних системах [175, 220].

Пропонується використати онтологічний підхід для розробки універсального методу ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками у спосіб процедурного вибору

найефективнішого методу для кожної конкретної задачі. Онтологія у цьому контексті означає формалізацію знань про задачі та методи ідентифікації.

Основними компоненти онтології моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних є:

- модель знань, завданням якої є структурування знань про характеристики задач ідентифікації статичних систем та методи оптимізації, визначення критеріїв вибору методу залежно від характеристик задачі (характер нелінійності, розмірність, диференційованість цільової функції);
- база даних задач та методів для збереження інформації про різні типи задач оптимізації та ефективність застосування різних методів до них та використання історичних даних для покращення рекомендацій;
- правила вибору методу для реалізації алгоритмів, які аналізують характеристики задачі і пропонують найефективніший метод оптимізації із врахуванням критеріїв, таких як час виконання, точність, обчислювальні ресурси тощо.

Онтологія математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних забезпечить формалізацію та структурування процесу моделювання, а також уможливить вибір оптимальних методів ідентифікації на основі характеристик задачі.

Загальну схему онтології наведено на рисунку 4.3. Розробка такої онтології передбачає визначення ключових елементів та взаємозв'язків між ними, спираючись на вказані структури.

Формалізуємо основні елементи моделі знань.

Предметна область A , яка описує контекст, у якому будується або використовується математична модель:

$$A = \{ a_i = (id_a, name_a, desc_a) \mid i \in I_A \}, \quad (4.3)$$

де d_i – предметна область, id_a – ідентифікатор предметної області, $name_a$ – назва предметної області, $desc_a$ – опис предметної області, I_A – множина

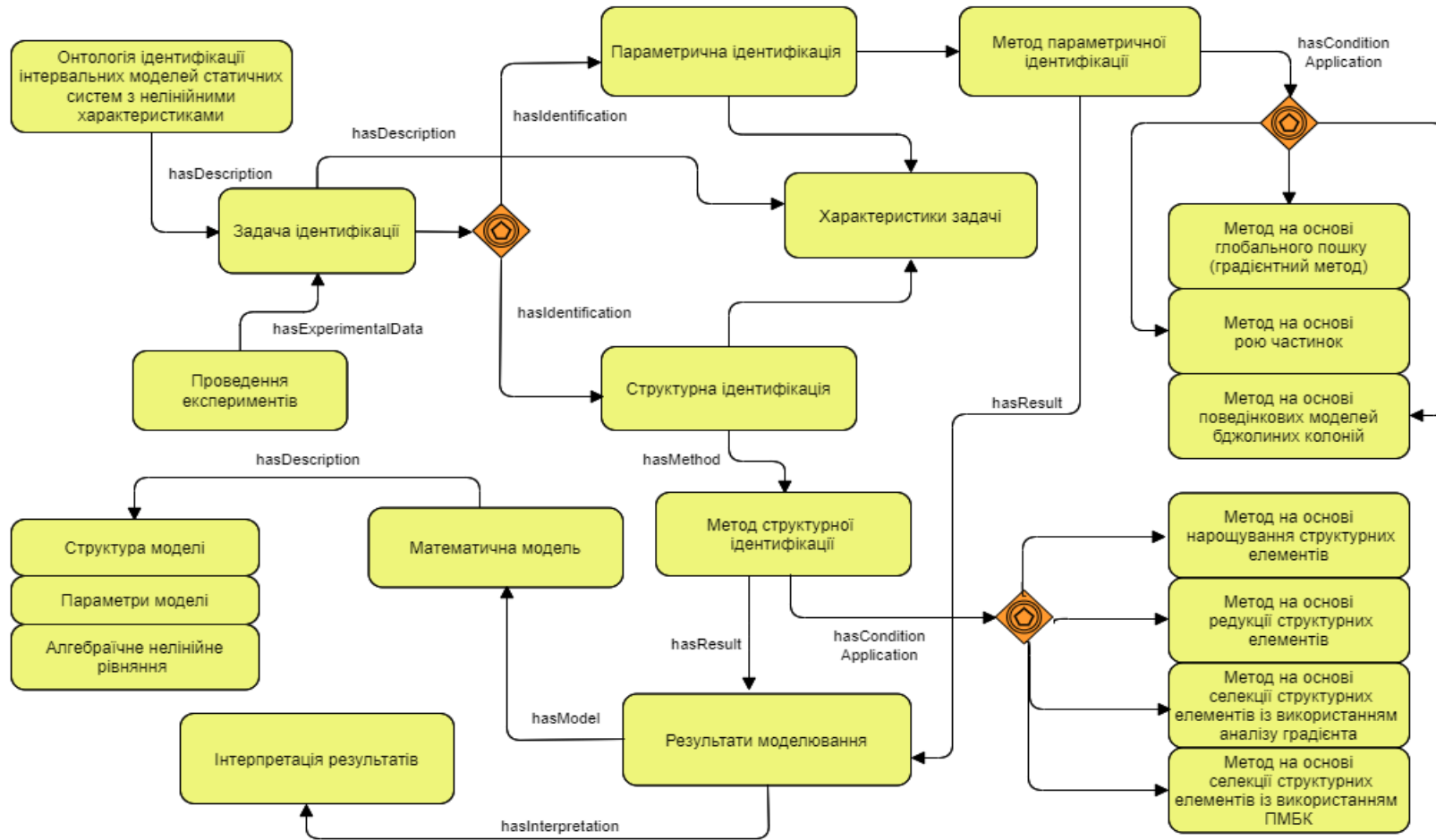


Рис. 4.2. Загальна схема онтології підтримки процесів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками

ідентифікаторів предметних областей.

Множина об'єктів O з нелінійними характеристиками, для яких може розв'язуватися задача ідентифікації моделі:

$$O = \{o_k = (id_o, name_o, desc_o) \mid k \in I_O\}, \quad (4.4)$$

де o_k – об'єкт з нелінійними характеристиками, id_o – ідентифікатор об'єкта, $name_o$ – назва об'єкта, $desc_o$ – інформація, що описує об'єкт, I_O – множина ідентифікаторів об'єктів.

Множина вхідних змінних X , на основі яких проводиться ідентифікація об'єкта у вигляді статичної системи з нелінійними характеристиками:

$$X = \{x_i = (id_x, x_n, x_t, x_v) \mid i \in I_X\}, \quad (4.5)$$

де x_i – це вхідні змінні для ідентифікації статичної системи (об'єкту), id_x – ідентифікатор вхідних значень для фактора, x_n – назва фактора, x_t – тип значень, x_v – значення вхідних змінних, I_X – множина ідентифікаторів вхідних змінних.

Множина значень Y спостережуваних нелінійних характеристик статичної системи:

$$Y = \{y_i = (id_y, y_n, y_t, y_v) \mid i \in I_Y\}, \quad (4.6)$$

де y_i – значення спостережуваних нелінійних характеристик статичної системи статичної систем (об'єкта), id_y – ідентифікатор вихідних значень характеристики, y_n – назва характеристики, y_t – тип значень, y_v – значення характеристики, I_Y – множина ідентифікаторів спостережуваних нелінійних характеристик.

Опис математичної моделі, який включає формалізовані рівняння та інші характеристики математичної моделі:

$$M = \{m_j = (id_{eq}, eq) \mid j \in I_M\}, \quad (4.7)$$

де, id_{eq} – ідентифікатор рівняння, eq – формалізований опис рівняння, який містить інформацію про структуру та параметри моделі:

$$eq = (id_{\beta}, id_f, id_{type}, eq_{ch}), \quad (4.8)$$

де id_{β} – ідентифікатор параметрів, id_f – ідентифікатор структури моделі, id_{type} – ідентифікатор типу рівняння (лінійне, нелінійне тощо), eq_{ch} – символічне значення моделі, I_M – множина ідентифікаторів моделей.

Множина параметрів P може бути описаною у такий спосіб:

$$P = \{ \beta_j = (id_{\beta}, \beta_t, \beta_v) \mid j \in I_P \}, \quad (4.9)$$

де β_j – параметри інтервальної моделі, id_{β} – ідентифікатор параметрів, β_t – тип параметра, який визначає точковий або інтервальний вигляд, β_v – значення параметрів нелінійної моделі, I_P – множина ідентифікаторів параметрів моделей.

Множина структурних елементів F , які визначають структуру моделі:

$$F = \{ f_s = (id_f, f_t, f_v) \mid s \in I_F \}, \quad (4.10)$$

де f_s – це нелінійні функції (структурні елементи), від вхідних змінних та параметрів для моделювання залежності вихідної змінної від вхідних змінних, id_f – ідентифікатор множини структурних елементів на основі нелінійних функцій, f_t – тип нелінійної функції, f_v – значення структури.

Методи ідентифікації параметрів, описуються множиною IP , яка містить відомості про методи та алгоритми параметричної ідентифікації, умови їх застосування:

$$IP = \{ ip_k = (id_{IP}, M_{IP}, op_{IP}, desc_{IP}) \mid k \in I_{IP} \}, \quad (4.11)$$

де id_{IP} – ідентифікатор методу параметричної ідентифікації нелінійних моделей статичних систем, M_{IP} – метод ідентифікації параметрів моделі, op_{IP} – це множина операторів, які визначають реалізацію алгоритму методу, $desc_{IP}$

– опис умов застосування методу, в залежності від характеристик задачі ідентифікації, I_{IP} – множина ідентифікаторів методів параметричної ідентифікації.

Методи ідентифікації структури інтервальної моделі, описуються множиною IS , яка містить відомості про методи та алгоритми структурної ідентифікації, умови їх застосування:

$$IS = \{ is_k = (id_{IS}, M_{IS}, op_{IS}, desc_{IS}) \mid k \in I_{IS} \}, \quad (4.12)$$

де id_{IS} – ідентифікатор методу структурної ідентифікації нелінійних моделей статичних систем, M_{IS} – метод ідентифікації структури інтервальної моделі, op_{IS} – множина операторів, які визначають реалізацію алгоритму методу, $desc_{IS}$ – опис умов застосування методу, в залежності від характеристик оптимізаційної задачі ідентифікації, I_{IS} – множина ідентифікаторів методів структурної ідентифікації.

Характеристики оптимізаційної задачі ідентифікації інтервальних моделей статичних систем запишемо у вигляді множини Ch :

$$Ch = \{ ch_i = (id_{ch}, ch_n, feat_n, feat_t, feat_v) \mid i \in I_{Ch} \}, \quad (4.13)$$

де ch_i – характеристика оптимізаційної задачі, ch_n – назва характеристики, ch_t – тип характеристики, ch_v – значення характеристики, $feat_n$ – назва ознаки, $feat_t$ – тип ознаки характеристики, $feat_v$ – значення ознаки характеристики, I_{Ch} – множина ідентифікаторів характеристик.

Результати побудови інтервальної моделі R , визначаються множиною, що містить основні твердження стосовно отриманого результату ідентифікації:

$$R = \{ r_i = (id_r, iterpr_r, desc_r) \mid i \in I_R \}, \quad (4.14)$$

де r_i – результат ідентифікації інтервальної моделі, id_r – ідентифікатор результату, $iterpr_r$ – інтерпретація результатів побудови моделі, $desc_r$ –

твердження, які описують результат, I_R – множина ідентифікаторів результатів.

Формалізуємо онтологічну модель задачі ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі вибору ефективних методів ідентифікації із врахуванням розглянутих в попередньому параграфі характеристик цих оптимізаційних задач. Для формалізації онтологій зазвичай використовують алгебру кортежів. Відповідно, запишемо базову структуру онтології у вигляді кортежу, який визначає задачу ідентифікації нелінійної інтервальної моделі, у такому вигляді:

$$T = \langle O_T, Ch_T, Idnt, M_T, R_T \rangle. \quad (4.15)$$

Деталізуємо основні елементи визначеної структури.

Структура, що визначає об'єкт моделювання, який розглядається як статична система з нелінійними характеристиками:

$$O_T = \langle id_o, id_a, id_x, id_y \rangle. \quad (4.16)$$

Структура O_T визначає об'єкт за ідентифікатором id_o із заданої предметної області, id_a та результатами проведених експериментів з об'єктом, які репрезентуються значеннями вхідних змінних id_x та вихідними значеннями нелінійних характеристик id_y .

Структура Ch_T визначає характеристики задачі ідентифікації інтервальної нелінійної моделі на основі розмірності вхідних даних та складності нелінійних функцій, що формують множину структурних елементів:

$$Ch_T = \langle id_{ch}, id_o, id_f \rangle. \quad (4.17)$$

Структура, яка визначає результати вибору методів ідентифікації інтервальних моделей, які включають структурну та параметричну ідентифікацію, має такий вигляд:

$$Idnt = \langle id_{IS}, id_{IP}, id_{Ch} \rangle. \quad (4.18)$$

Структуру, що описує математичну модель на основі нелінійного алгебраїчного рівняння та визначених параметрів задаємо у такому вигляді:

$$M_T = \langle id_m, id_o \rangle. \quad (4.19)$$

Відповідно, структуру для визначення результатів моделювання опишемо за допомогою такого кортежу:

$$R_T = \langle id_r, id_m, id_o, id_A \rangle. \quad (4.20)$$

Для побудови онтології ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками використано Data Graphs, який забезпечує гнучкість опису онтологій, оскільки, структура у вигляді графа уможливорює більш гнучкий опис складних взаємозв'язків між концептами і об'єктами, у порівнянні з традиційними таблицями або ієрархіями [113]. Це особливо корисно для моделювання ситуацій, де об'єкти можуть мати багато взаємозв'язків із залежностями різного рівня складності. Також застосування графового представлення уможливорює масштабування моделі, додаючи нові концепти та зв'язки без необхідності зміни загальної структури та виражати семантичні зв'язки між концептами, що дозволяє використовувати онтології для більшого розуміння та покращення пошукових запитів. Крім того, інтеграція з сучасними технологіями штучного інтелекту, обробки природної мови та іншими системами сприяє проектуванню та розробці інтелектуальних додатків.

На рис. 4.4 наведено онтологію ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками у вигляді графа. Даний граф відображає основні класи та атрибути, що описують структуровані знання у вигляді понять та відношення між ними.

Декларативна частина побудованої онтології містить опис концепцій, об'єктів та їхніх властивостей.

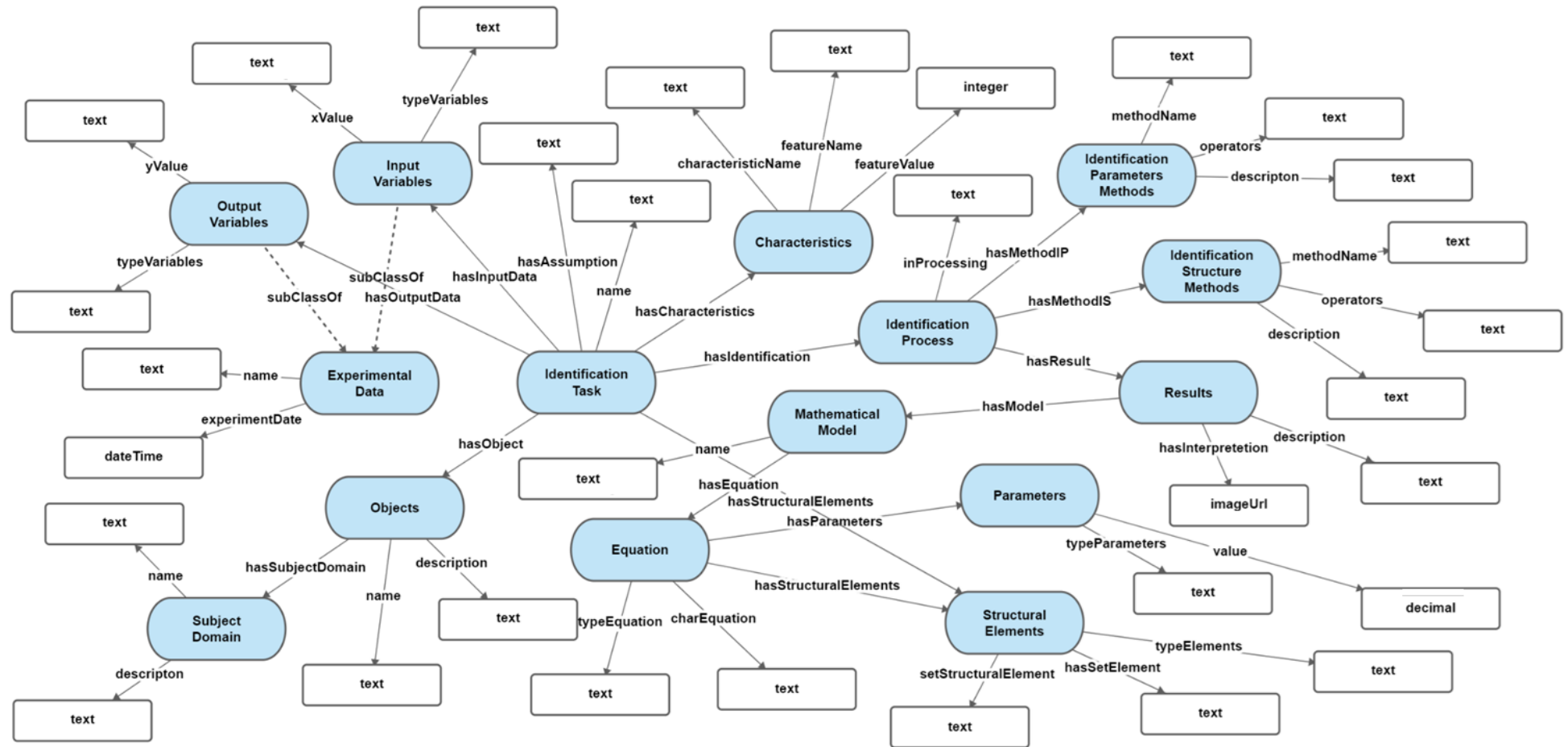


Рис. 4.4. Граф онтології задачі моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками

Онтологія задачі ідентифікації математичних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних складається з класу опису задачі ідентифікації (клас `IdentificationTask`), об'єктними атрибутами якого є класи, що визначають предметну область (`SubjectDomain`), об'єкти (клас `Objects`), проведення експериментів (клас `ExperimentalData`), опис характеристик задачі (клас `Characteristics`) та математичної моделі (клас `MathematicalModel`), вибір методів ідентифікації на основі правил їх застосування та характеристик задачі (клас `IdentificationProcess`), а також результатів моделювання (клас `Results`), їх інтерпретацію та умови використання.

Процедурна частина онтології включає методи та алгоритми структурної та параметричної ідентифікації, які можуть використовуватися для ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Наприклад, клас «`IdentificationStructureMethods`» містить методи та відповідні алгоритми: нарощування, редукції та селекції на основі градієнта цільової функції, а клас «`IdentificationParametersMethods`» містить методи параметричної ідентифікації, такі як: метод глобального пошуку (на основі інтеграції `GlobalSearch`), роєві методи та алгоритми на основі рою частинок та бджолиних колоній.

Також процедурна частина описує взаємодію між різними компонентами онтології під час виконання процедур ідентифікації. Це включає передачу даних між класами, використання різних методів і алгоритмів для обробки цих даних.

Крім того, процедурна частина розробленої онтології включає логічні правила для автоматичного виведення нових знань на основі наявних даних. Зокрема, на основі експериментальних даних об'єкта з нелінійними характеристиками, системою може бути згенеровано відповідну математичну модель. Також, містить правила вибору оптимальних методів ідентифікації на основі заданих характеристик задачі ідентифікації, які породжують нові

знання шляхом уточнення умов застосування різних методів ідентифікації за результатами перебігу процесу ідентифікації.

Процедурна частина також визначає, як мають бути інтерпретовані результати ідентифікації. Клас «Results» містить методи для оцінки точності моделей, інтерпретації результатів та їх візуалізації.

Розглянемо схему ідентифікації інтервальної моделі статичної системи з нелінійними характеристиками із застосуванням онтологічного опису. Спочатку із застосуванням декларативної частини онтології визначаємо необхідні властивості системи, отримуємо експериментальні дані та визначаємо характеристики задачі ідентифікації. Потім, із застосуванням процедурної частини визначимо адекватні алгоритми ідентифікації, які реалізують відповідні методи параметричної або структурної ідентифікації. Результати обробки будуть інтерпретовані та представлені користувачу.

Такий підхід забезпечує структурований і систематичний спосіб збору, обробки та аналізу даних для ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, що дозволяє підвищити точність і надійність отриманих результатів а також забезпечить розробку рекомендаційних висновків для інтерпретації результатів моделювання та їх візуалізацію. Розроблена онтологія для ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками є інструментом, який забезпечує формалізований підхід до управління знаннями у цій предметній області. Вона дозволяє не тільки систематично організувати інформацію про методи параметричної та структурної ідентифікації та результати їх застосування, але й автоматизувати процес вибору оптимальних методів ідентифікації.

4.3. Метод моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі онтологічного підходу

Використання, в нашому випадку, онтологічного підходу полягає у формалізації процесу ідентифікації моделі у спосіб вибору найефективнішого

методу оптимізації на основі характеристик задачі, що забезпечує моделювання та ідентифікацію інтервальних нелінійних моделей статичних систем з нелійними характеристиками. Вибір методу базується на ключових характеристиках задачі, таких як диференційованість цільової функції, розмірність вхідних даних задачі, тип задачі та обмеження, що дозволяє досягти оптимальних результатів з мінімальними витратами часу та обчислювальних ресурсів.

Розглянемо метод моделювання статичних систем з нелійними характеристиками на основі розробленої онтології задачі ідентифікації. Суть даного методу полягає у виборі оптимального за характеристиками обчислювальної складності методу параметричної ідентифікації на основі аналізу характеристик оптимізаційної задачі. Такий підхід спростить процес як параметричної так і структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей. Для формування множини характеристик беремо до уваги розмірність простору вхідних даних, яка впливає на формування багатовимірного простору оптимізації параметрів та тип базових нелінійних функцій для структурних елементів, які формуватимуть структуру моделі, а відповідно, визначатимуть властивості цільової функції.

Метод ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелійними характеристиками, заснований на онтологічному підході, має на меті спрощення процесу параметричної та структурної ідентифікації. Окреслимо основні етапи реалізації цього методу.

Етап ініціалізації. Предметна область застосування, наприклад, екологія, медицина, енергетика тощо ініціалізується на цьому етапі. Об'єкт для ідентифікації визначається шляхом проекції та вибірки даних за атрибутами предметної області. Також на цьому етапі визначаються результати проведення експериментів над об'єктом для отримання вхідних значень факторів впливу та вихідних значень досліджуваних нелінійних характеристик. Враховуючи специфіку об'єкта та його характеристик, визначаємо структуру моделі або множину структурних елементів, у разі коли

структура невідома. На основі експериментальних даних та базисних нелінійних функції визначаємо характеристики задачі ідентифікації, на основі яких ґрунтується вибір оптимальних методів параметричної та структурної ідентифікації.

Етап вибору методів ідентифікації. Якщо структура моделі невідома, здійснюється вибір методу структурної ідентифікації. Вибір методу базується на аналізі умов застосування та характеристик оптимізаційної задачі.

Визначення методу ідентифікації параметрів моделі на основі аналізу характеристик оптимізаційної задачі також включає операції проєкції, вибірки та впорядкування даних про умови застосування методів.

Етап формування результатів. На основі експериментальних даних для об'єкта будується інтервальна нелінійна модель. Результатом цього етапу є структура моделі та вектор параметрів. Також здійснюється інтерпретація отриманих результатів та визначення основних тверджень щодо використання моделі. Цей етап включає операції проєкції, вибірки та впорядкування даних для формування підсумкових результатів.

Етап оновлення умов застосування методів. Останнім етапом є оновлення умов застосування методів структурної та параметричної ідентифікації залежно від характеристик оптимізаційної задачі та перебігу процесу ідентифікації. Це забезпечує адаптацію методу моделювання статичних систем з нелійними характеристиками шляхом уточнення нових змін в умовах застосування різних методів.

В основу реалізації методу покладено елементи та операції алгебри кортежів: $_C$ – префікс та процедура вибору елементів, π – операція проєкції алгебри кортежів, σ – операція вибірки з множини за заданими атрибутами та умовами, τ – операція впорядкування за значеннями заданих атрибутів [113].

Розглянемо алгоритм реалізації методу ідентифікації інтервальних нелінійних моделей на основі онтологічного підходу.

Алгоритм 4.1. Ідентифікації інтервальних нелінійних моделей 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} ;

$$Idnt_C = \pi_{id_{IS}, M_{IS}} \left(\sigma_{IP(id_o)=id_o-C \wedge IP(id_m)=id_m-C \wedge IP(id_{Ch})=id_{Ch-C}}(\tau(IP)) \right);$$

Кінець

Вибір методу ідентифікації параметрів моделі на основі характеристик оптимізаційної задачі:

$$Idnt_C = \pi_{id_{IP}, M_{IP}} \left(\sigma_{IP(id_o)=id_o-C \wedge IP(id_m)=id_m-C \wedge IP(id_{Ch})=id_{Ch-C}}(\tau(IP)) \right);$$

Побудова інтервальної нелінійної моделі на основі експериментальних даних для об'єкта $O-C$ предметної області id_o :

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

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 оптимізаційної 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 ;

Отже, запропонований алгоритм реалізує гібридний метод ідентифікації інтервальних моделей статичних системи з нелінійними характеристиками, який ґрунтується та знання-орієнтованому підході опису предметної області задач ідентифікації та правил комбінування методів оптимізації. В якості методів використовуються методи глобального пошуку на основі градієнтних методів та методи ройового інтелекту (рою частинок, поведінкових моделей бджолоїної колоній).

4.4. Дослідження ефективності на основі задачі моделювання обсягу генерованої електроенергії модулем сонячної електростанції.

Дослідимо ефективність розробленого методу та алгоритму його реалізації на прикладі задачі моделювання генерованої потужності сонячної електроенергії денного циклу. Основною метою дослідження є порівняльний аналіз результатів комбінування методів структурної та параметричної ідентифікації із результатами, які отримуємо на основі запропонованого онтологічного підходу.

Задача моделювання генерованої потужності сонячної електроенергії денного циклу розв'язується з метою встановлення причинно-наслідкових зв'язків між генерованою потужністю та зовнішніми факторами впливу. Встановлена залежність буде основою навчання моделей для прогнозування генерованої потужності з метою оптимізації роботи сонячної електростанції.

Отже, розглянемо покрокове виконання алгоритму на основі розробленої декларативної та процедурної частин онтології моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками.

Крок 1. Ініціалізація

Ініціалізація предметної області:

id_a : 1

$name_a$: «Генерування сонячної електроенергії»

$desc_a$: «Генерація сонячної (фотоелектричної) електроенергії – це процес перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою фотоелектричних (PV) панелей. Цей процес використовує властивості напівпровідникових матеріалів, які генерують електричний струм при опроміненні сонячним світлом.

Основні компоненти системи:

- сонячні панелі (PV-панелі), які складаються з фотоелектричних комірок, зазвичай виготовлених з кремнію, які перетворюють сонячне світло в постійний струм (DC).

- інвертори для перетворення постійного струму, що генерується панелями, в змінний струм (АС), який використовується для живлення електричних пристроїв або подається в мережу.

- системи зберігання енергії у вигляді акумуляторів, які накопичують надлишок генерованої електроенергії для використання в періоди низької сонячної активності.

- система моніторингу та управління для відстеження продуктивності, діагностики та оптимізації роботи фотоелектричних систем.

Вплив факторів навколишнього середовища:

- інсоляція – кількість сонячної радіації, що досягає панелей, впливає на їх продуктивність. Інсоляція залежить від географічного розташування, часу доби, пори року та погодних умов;

- температура поверхні панелі – висока температура може знижувати ефективність фотоелектричних комірок;

- температура навколишнього середовища;

- кут нахилу та орієнтація відносно сонця максимізують їх продуктивність.»

Ініціалізація об'єкта (статичної системи):

id₀: 1

name₀: «Модуль сонячної електростанції»

desc₀: «Модуль сонячної електростанції складається із 40 панелей типу LG NeON R 450W. Тип модулів: монокристалічний кремній.

Експериментальні дані, які вимірюються давачами, формують набори даних для вихідних характеристик модуля сонячної електростанції у такому вигляді:

DATE_TIME – дата та час вимірювання;

PLANT_ID – ідентифікатор електростанції;

SOURCE_KEY – ідентифікатор давача модуля;

DC_POWER – генерована потужність постійного струму, кВт;

AC_POWER – вихідна потужність змінного струму, кВт;

DAILY_YIELD – генерована денна потужність електроенергії, кВт;

TOTAL_YIELD – загальна генерована потужність електроенергії, кВт.

Експериментальні дані для вхідних факторів, що впливають на ефективність роботи модуля сонячної електростанції, формують набори даних у такому вигляді:

DATE_TIME – дата та час вимірювання;

PLANT_ID – ідентифікатор електростанції;

SOURCE_KEY – ідентифікатор давача;

AMBIENT_TEMPERATURE – температура навколишнього середовища °С;

MODULE_TEMPERATURE – температура поверхні модуля, °С;

IRRADIATION – інтенсивність сонячної радіації (інсоляція), кВт/м².

Експериментальні значення вихідної характеристики з урахуванням всіх факторів та погодних умов отримані в межах похибки вимірювань 10%.

Ініціалізація вхідних даних для моделювання:

Для побудови моделі здійснювалася вибірка даних за світловий день, який на дату проведення вимірювань тривав з 6:00 по 18:45. Приклад формування даних на основі вимірювань для одного модуля електростанції:

DATE_TIME – 2022-06-14 (13 годин світлового дня з 6:00 по 18:00);

PLANT_ID – 4135001;

SOURCE_KEY – HmiyD2TTLFNqkNe.

Множина вхідних змінних на основі факторів:

$$X = \{x_1, x_2, x_3\},$$

де,

$x_1 = (1, \text{«Температура навколишнього середовища»}, \text{«double»}, (21.53, 22.74, 24.47, 26.19, 26.95, 28.78, 28.6, 29.03, 27.19, 27.93, 27.74, 26.43));$

$x_2 = (2, \text{«Температура поверхні модуля»}, \text{«double»}, (20.39, 25.8, 35.34, 42.29, 43.85, 50.65, 44.7, 45.4, 33.99, 41.36, 34.53, 33.65, 27.62));$

$x_3 = (3, \text{«Інтенсивність сонячної радіації, кВт/м}^2\text{»}, \text{«double»}, (0.00968, 0.1557, 0.4587, 0.5729, 0.6171, 0.7027, 0.7445, 0.7324, 0.269, 0.4233, 0.1252, 0.1937, 0.0388))$.

Множина вихідних змінних характеристики об'єкта:

$$Y = \{y_1\},$$

де,

$y_1 = (1, \text{«Вихідна потужність змінного струму, Вт»}, ([7.728; 9.072], [175.036; 205.477], [534.73; 627.727], [668.7348; 785.036], [710.309; 833.841], [995.831; 1169.019], [713.115; 837.135], [806.771; 947.079], [359.915; 422.509], [546.94; 642.06], [147.279; 172.893], [231.643; 271.928], [43.989; 51.639]))$.

Множина функцій для структурних елементів:

$$F = \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_2, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_3^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_3^{\beta_2}, \\ \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_3^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2} \cdot x_2^{\beta_3}, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3} \end{array} \right\}.$$

Ініціалізація характеристик задачі ідентифікації:

$$Ch = \{ch_1, ch_2\},$$

де,

$ch_1 = (1, \text{«Розмірність»}, \text{«низька» «int»}, 26)$;

$ch_2 = (2, \text{«Складність»}, \text{«локальні мінімуми»}, \text{«bool»}, 1, \text{«диференційована»}, \text{«bool»}, 1)$.

Граф створених концептів під час ініціалізації наведено на рисунку 4.5.

Крок 2. Вибір методу структурної ідентифікації:

$$Idnt = is_1,$$

де,

$is_1 = (1, \text{«Структурна ідентифікація на основі аналізу градієнта цільової функції»}, \text{«Алгоритм структурної ідентифікації: IS_1.m»}, \text{«Умови застосування: диференційована цільова функція»}$.

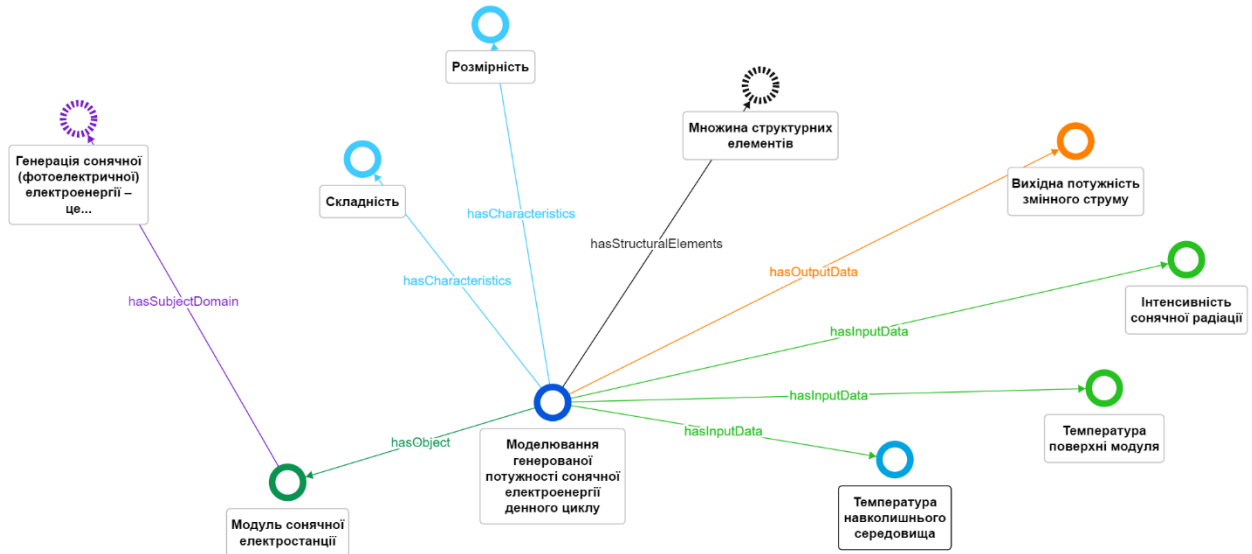


Рис. 4.5. Ілюстрація ініціалізації концептів на кроці 1

Крок 3. Вибір методу параметричної ідентифікації:

$$Idnt = (is_1, ip_1, id_{ch}),$$

де,

$ip_1 = (1, \text{«Параметрична ідентифікація на основі градієнтних методів»}, \text{«Алгоритм параметричної ідентифікації на основі модуля GlobalSearch: IP_1.m»}, \text{«Умови застосування: диференційована цільова функція, низка розмірність та локальні мінімуми, середня розмірність, висока розмірність»}).$

Крок 4. Побудова моделі:

$$M = (m_1, 1, 1),$$

де,

$$m_1 = (1, (id_\beta = 1, id_f = 1, id_{type} = \text{Нелінійна: показникова, "y(x) = 426.6487 - 22.0263 x_1 + 0.006x_2^{2.9319} + 763.8778x_2^{0.6913}"})),$$

$$\beta_1 = (1, \text{"point"}, (426.6487, -22.0263, 0.006, 2.9319, 763.8778, 0.6913)),$$

$$f_1 = (1, 2, (1, 4, 6)).$$

Крок 5. Формування результатів:

$$R = (r_1, m_1, 1, 1),$$

де,

$r_1 = (1.$ «1. Модель описує залежність генерованої електроенергії модулем сонячної електростанції від зовнішніх факторів: температура навколишнього середовища, температури поверхні модуля, інсоляції. 2. Модель відтворює залежність із заданою точністю.»)

Формування візуальних об'єктів на основі аналізу точності та адекватності (прогностичних властивостей) моделей. (рис. 4.6)

Крок 6. Оновлення умов застосування методів: в межах існуючих.

Ілюстрація концептів, які створені в ході виконання кроків 2-6 наведено на рисунку 4.

Фрагменти OWL-кодів для розробленої онтології та створених для реалізації прикладу концептів наведено в Додатку А.

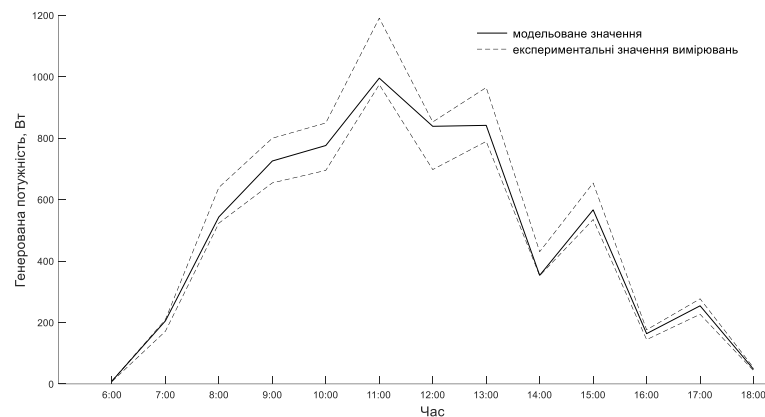


Рис. 4.6. Ілюстрація прогностичних властивостей побудованої моделі

Для оцінки ефективності розробленого методу ідентифікації інтервальних нелінійних моделей наведемо порівняльну характеристику часу ідентифікації на основі комбінування всіх методів, які використовуються для вибору з репозиторію.



Рис. 4.6. Ілюстрація концептів реалізованих на кроках 2-6 алгоритму

В таблиці 4.5 наведено часові характеристики ідентифікації наведеної вище моделі шляхом комбінування методів структурної та параметричної ідентифікації.

Таблиця 4.5

Порівняльна характеристика методів ідентифікації інтервальних моделей

Метод	Структурна ідентифікація	
Параметрична ідентифікація	Метод селекції на основі аналізу градієнта (АГ)	Метод селекції на основі поведінкових моделей бджолиних колоній (ПМБК)
Метод глобального пошуку на основі градієнта (ГПГ)	2.105	3.0947
Метод на основі рою частинок (РЧ)	3.7695	6.9246
Метод на основі поведінкових моделей бджолиних колоній (ПМБК)	2.6103	4.7797

Зокрема, для порівняння з обраними в ході тестування алгоритму розробленого методу ідентифікації на основі онтологічного підходу використовувалися метод структурної ідентифікації на основі поведінкових моделей бджолиних колоній (ПМБК) та методи параметричної ідентифікації на основі рою частинок (РЧ) та поведінкових моделей бджолиних колоній (ПМБК).

Як бачимо з рисунку 4.7, використання методів структурної (АГ) та параметричної (ГПГ) ідентифікації на основі аналізу градієнту є найбільш ефективним для даної задачі.

Отримані результати засвідчують коректність визначених характеристик задачі ідентифікації статичних систем з нелінійними характеристиками та правил вибору відповідних методів на основі даних характеристик.

Отримані часові характеристики для обраних в ході виконання алгоритму методів слугують для оновлення умов застосування відповідних методів, які зберігаються у їх концептах онтології. Таким чином, в процесі використання даної онтології оновлення умов буде покращувати ефективність розробленого методу.

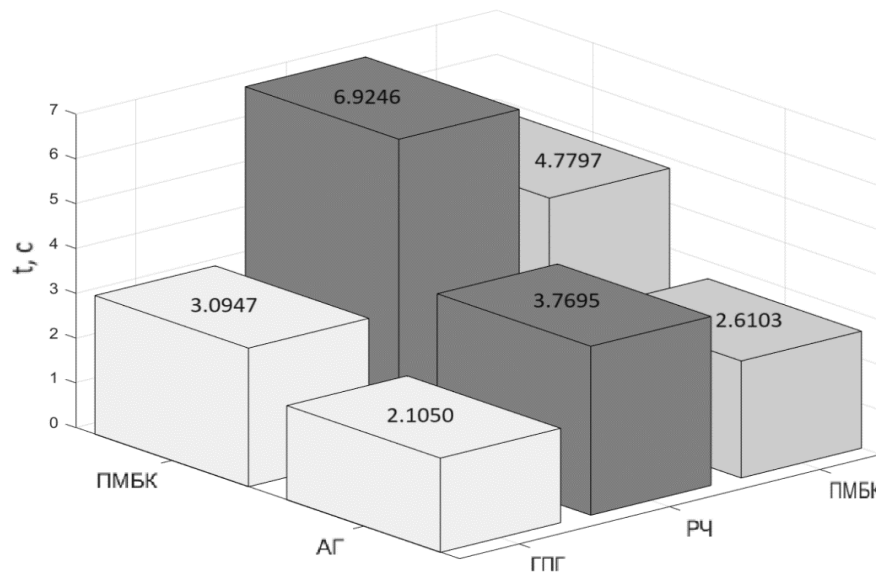


Рис. 4.7. Компаративний аналіз ефективності комбінування методів ідентифікації

Висновки до розділу 4

1. На підставі аналізу предметної області, яка стосується ідентифікації моделей запропоновано та обґрунтовано онтологічний опис та формальне представлення правил для автоматизованого вибору найефективніших методів та алгоритмів ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками при реалізації процедурної частини онтології.

2. З використанням запропонованого онтологічного опису та процедурної частини онтології вперше 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 ідентифікації цих моделей та гібридних методів, які поєднують стратегії глобального пошуку і методи локальної оптимізації, що у сукупності забезпечило зниження часової складності розв'язування задач структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем. В частині онтологічного опису знань вирішено завдання структурування знань про характеристики задач ідентифікації моделей статичних систем; методи оптимізації; критерії вибору методу залежно від характеристик задачі.

3. 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 та методів ройового інтелекту (рою частинок, поведінкових моделей бджолоїної колонії), що у сукупності забезпечило зниження часової складності ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками.

4. Для оцінювання ефективності запропонованого комплексного підходу до ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками проведено низку обчислювальних експериментів. Встановлено, що запропонований метод на основі

формалізації процесу ідентифікації шляхом вибору ефективного методу оптимізації в залежності від характеристик задачі забезпечує більш ефективне моделювання та ідентифікацію інтервальних нелінійних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками в порівнянні з існуючими. На підставі застосування розробленого підходу до моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками розроблено модель генерованої потужності денного циклу модуля сонячної електростанції.

РОЗДІЛ 5.

АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

В рамках даного розділу запропоновано архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних з використанням хмарних технологій. Особливостями запропонованої архітектури є імплементація підсистеми інтервального моделювання статичних систем, із використанням розроблених методів в розділах 2-4, в хмарній сервісо-орієнтованій архітектурі із врахуванням оптимізації обчислювальних схем за допомогою використання платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, безкоштовних програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API на всіх етапах математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних.

Проілюстровано 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.

На базі запропонованої архітектури реалізовано програмну систему для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій. Однією із ключових компонент даної системи є інтелектуалізована, консультативно-діагностична підсистема, використання якої дозволило суттєво покращити практичне використання запропонованих рішень.

Основні результати досліджень, які наведено в цьому розділі, опубліковано автором у працях [248, 270, 273, 233, 277, 279, 284].

5.1. Використання хмарних сервісів для підтримки процесів математичного моделювання

Математичне моделювання є одним із ефективних інструментів не тільки для проведення досліджень, але і для розв'язування широкого кола прикладних задач, де необхідно приймати складні рішення, зокрема за допомогою інтелектуалізованих систем підтримки рішень та експертних систем [29, 210]. Наближеність до користувача, зручність у застосуванні методів математичного моделювання реалізують за рахунок використання різноманітних програмних середовищ, які переважно інтегрують спектр математичних методів в єдину концепцію побудови інструментальних засобів, зрозумілу для користувачів-практиків. Прикладом таких середовищ є засоби: MATLAB, Mathematica або програмні бібліотеки Python, такі як NumPy і SciPy. Разом з тим, потреба застосування спеціалізованих методів, які розробляються рядом дослідників, наприклад методів аналізу інтервальних даних, вимагає додаткового опрацювання з метою розробки програмного інструментарію. Такий підхід є особливо актуальним, коли задачі стосуються інтеграції широкого кола засобів, наприклад, таких як штучний інтелект, забезпечення відкритості інструментального середовища, інтеграції даних у різних форматах представлення, застосування хмарних технологій тощо. В цьому напрямку проводиться ряд наукових досліджень, серед яких варто відзначити поєднання кількісних методів аналізу даних і моделювання з онтологічним підходом. Проте, зазначений підхід, розроблений авторами праць [288, 289, 290] вимагає подальшого розвитку у напрямку інтеграції в єдине середовище ширшого кола методів ідентифікації моделей на основі аналізу даних, інтеграцію даних з хмарних середовищ, інтеграцію засобів штучного інтелекту, покращення якості користувацького інтерфейсу, а також використання хмарних середовищ для розподілених обчислень тощо.

Як бачимо із рисунка 5.1, поряд із традиційними методами та технологіями вирішення проблеми обчислювальної складності, є

використання хмарних сервісів та високопродуктивних обчислювальних систем. Саме врахування даного аспекту вимагає розробки архітектури програмної системи, яка інтегруватиме відповідні хмарні сервіси і забезпечуватиме вирішення проблеми високої обчислювальної складності в задачах розробки математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних.

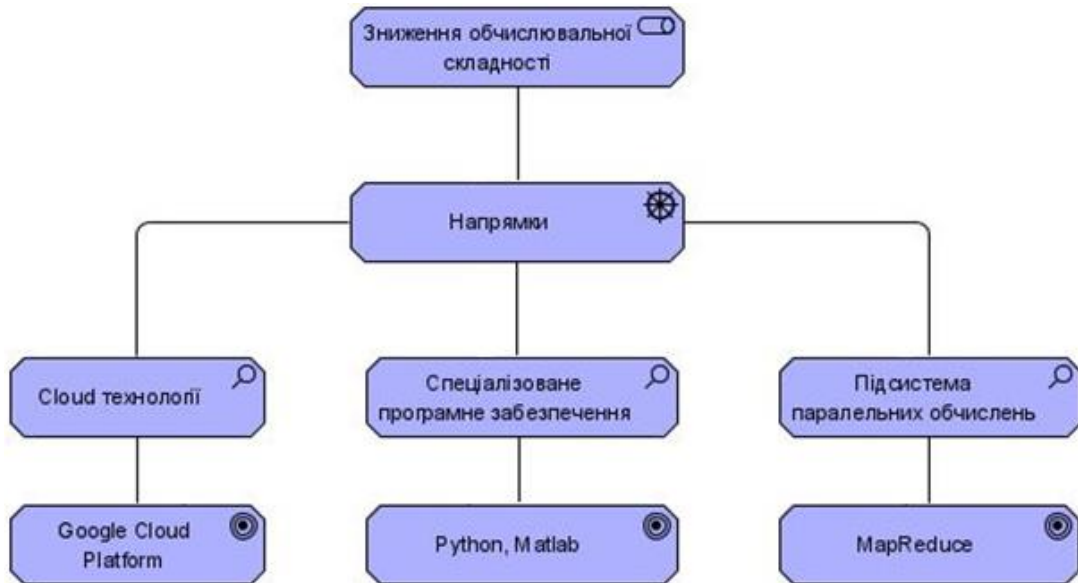


Рис. 5.1. Напрямки зниження обчислювальної складності з використанням інформаційних технологій

Дослідження, що стосуються розробки систем математичного моделювання на основі хмарних технологій, стають все більш актуальними. Це пов'язано насамперед з тим, що хмарні сервіси стають все більш доступними, досить масштабованими та сприяють зростанню ефективності обчислювальних систем. Ці системи дозволяють дослідникам, інженерам і аналітикам ефективно виконувати складне математичне моделювання, яке також включає аналіз даних та відповідні оптимізаційні процеси для задач ідентифікації моделей [242, 241]. Основні компоненти структури програмної системи для математичного моделювання з використанням хмарних

технологій наведено на рисунку 5.2. Розглянемо більш детально особливості побудови цієї системи.

Основною компонентою такої системи є хмарна інфраструктура, яка включає інфраструктуру, надану такими платформами, як Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure або Google Cloud Platform (GCP) [121, 129, 132, 157]. Зазначені платформи пропонують масштабовані обчислювальні ресурси, сховища даних та відповідні мережеві можливості, які можна динамічно розвивати відповідно до встановлених вимог.



Рис. 5.2. Загальна структура засобів реалізації програмної системи для математичного моделювання з використанням хмарних технологій

Необхідно також відзначити компоненту у вигляді спеціалізованого програмного забезпечення для моделювання, яку можна використовувати для реалізації відповідних обчислювальних процедур. Наприклад, такими компонентами можуть бути: MATLAB, Mathematica або програмні бібліотеки

Python, такі як NumPy і SciPy [86, 110]. Ці інструменти надають широкий спектр математичних функцій, відповідні процедури для обчислення розв'язків широко класу рівнянь та широкий спектр можливостей візуалізації результатів моделювання.

Як вже зазначалось, оскільки процес математичного моделювання супроводжується складними обчислювальними процедурами, то постає актуальне питання реалізації паралельних та розподілених обчислень. Хмарні технології дають можливість розпаралелювати обчислювальні завдання на кількох віртуальних машинах або контейнерах. Паралельні алгоритми та MapReduce можна використовувати для прискорення виконання складних обчислювальних етапів математичного моделювання, наприклад це стосується задач ідентифікації моделей на основі аналізу даних.

Особливо необхідно відзначити таку компоненту, як підсистема зберігання інформації, оскільки швидкість та варіативність доступу до даних є дуже важливими характеристиками для прискорення процесів математичного моделювання. Найпопулярнішими хмарними рішеннями для зберігання та управління даними є Amazon S3, Azure Blob Storage або Google Cloud Storage, які використовуються для зберігання вхідних даних, проміжних результатів і вихідних файлів, створених під час реалізації процедур математичного моделювання. Крім того, для керування структурованими даними можна використовувати такі хмарні бази даних, як Amazon RDS, Azure SQL Database або Google Cloud SQL.

Оркестровка робочого процесу реалізовуватиметься у спосіб використання таких інструментів як Apache Airflow, AWS Step Functions або Azure Data Factory, які дозволяють автоматизувати та управляти виконанням складних робочих процесів основних етапів математичного моделювання. Ці інструменти дозволяють користувачам визначати, планувати та контролювати послідовність обчислювальних завдань із врахуванням критеріїв масштабованості та відмовостійкості.

Контейнеризація та мікросервіси. Технології контейнеризації, такі як Docker, і платформи керування контейнерами, як-от Kubernetes, зазвичай використовують для розгортання окремих програмних компонентів математичного моделювання як мікросервісів у хмарних середовищах. Такий підхід забезпечує модульність, масштабованість і портативність компонентів системи та дозволяє деяку варіативність реалізації з використанням різноманітних технологій.

Програмні системи математичного моделювання з використанням хмарних технологій для захисту даних і забезпечення конфіденційності, цілісності та доступності використовуватимуть засоби шифрування, контролю доступу та дотримання відповідних стандартів (наприклад, GDPR, HIPAA).

Хмарні інструменти моніторингу та оптимізації дають змогу зрозуміти продуктивність, використання ресурсів і вартість системи математичного моделювання та відповідних прикладних інформаційних систем. Для максимізації ефективності та мінімізації операційних витрат використовують такі методи, як автоматичне масштабування, правильний розмір екземпляра та алгоритми оптимізації.

Загалом інструментарій системи математичного моделювання, заснований на хмарних технологіях, забезпечує гнучкість, масштабованість і ефективність, надаючи можливість дослідникам і практикам вирішувати складні прикладні проблеми підтримки прийняття рішень. На рисунку 5.3 наведено приклад можливої загальної схеми комунікації системи моделювання із зовнішніми сервісами для застосування в медицині та екології.

5.2. Архітектура програмного забезпечення для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних

Програмне забезпечення для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних, яке направлене на побудову математичних моделей, які описують складні процеси у різних прикладних сферах повинне

мати можливість інтеграції з іншими системами або обчислювальними середовищами, яка розширить можливості використання систем такого класу у складних проектах. Наприклад, можливість обміну даними з базами даних, іншими програмами моделювання або спеціалізованими середовищами для обробки даних дозволяє створювати більш комплексні моделі та забезпечує більш ефективну роботу з великим обсягом інформації. Така інтеграція також дозволяє автоматизувати частину обчислювального процесу і покращує зручність користування програмним забезпеченням.

На рисунку 5.4 наведено архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій.

Враховуючи доступність та вартість програмних компонентів та орієнтування на безкоштовні засоби, основою системи є інструменти Google Cloud Platform, але ту саму архітектуру можна відтворити за допомогою еквівалентних сервісів інших хмарних постачальників. Розглянемо детальніше основні компоненти запропонованої архітектури, та опишемо їх основні взаємодії.

Платформа Google Cloud Run – це платформа для організації обчислень, яка ґрунтується на Knative і дозволяє запускати контейнери, доступ до яких здійснюється за допомогою HTTP-запитів. Вибір цієї платформи зумовлений тим, що користувачеві немає необхідності керувати компонентами хмарної інфраструктури, такими як обслуговування фізичних машин, оновлення програмного забезпечення, балансування навантаження або масштабування. Основна увага дослідників та розробників зосереджується суто на написанні програмного коду за допомогою будь-якої технології, використовуючи напрацьовані програмні бібліотеки з реалізованими математичними моделями або відповідні двійкові файли. Через відсутність потреби управління інфраструктурою, з'являється можливість сконцентруватися суто на написанні програмного коду, даючи можливість керованій обчислювальній

платформі від Google здійснювати управління розподілом ресурсів при опрацюванні запитів.

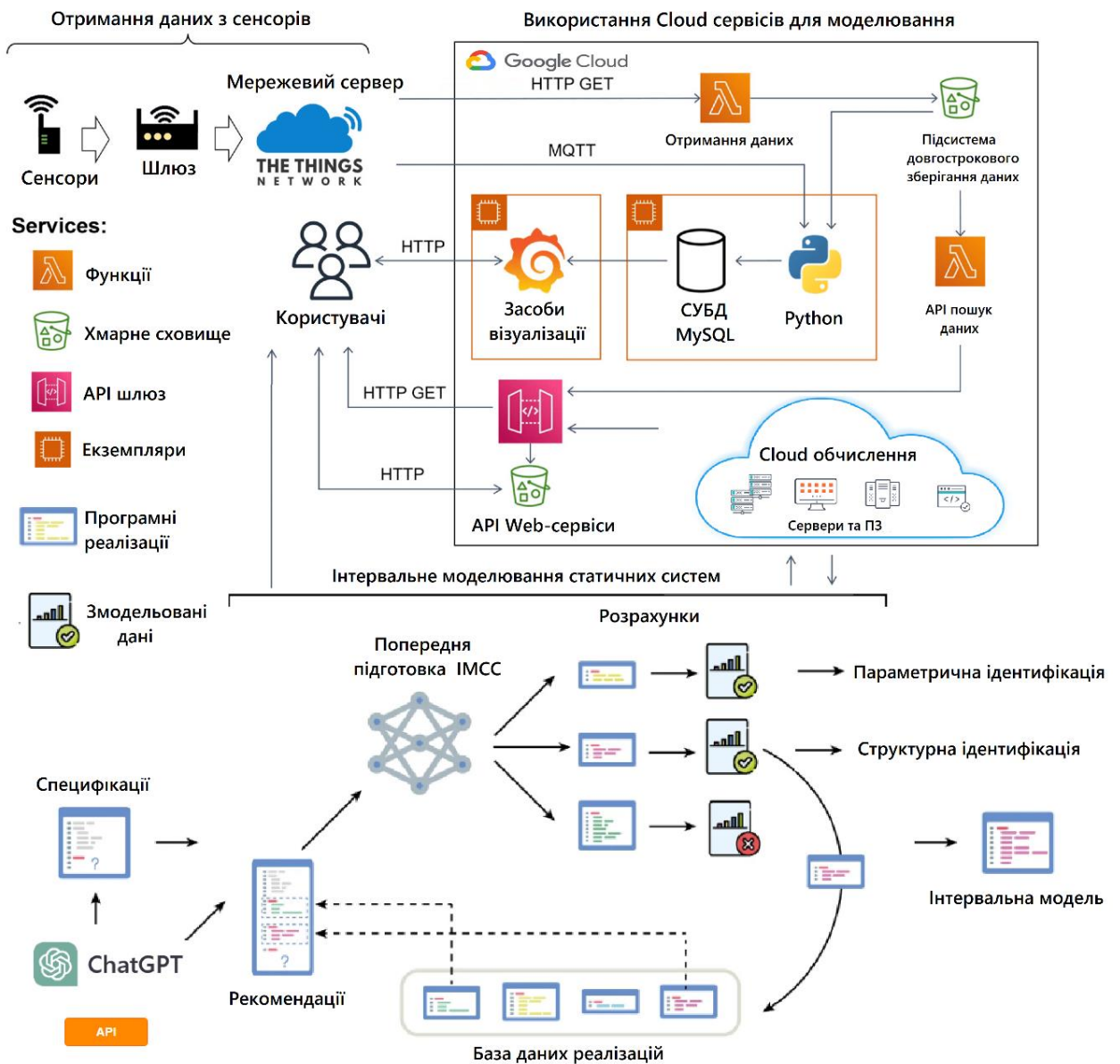


Рис. 5.4. Запропонована архітектура програмного забезпечення з використанням хмарних технологій

Засоби RESTful API служить програмним інтерфейсом для швидкого завантаження даних із сенсорів, пошуку даних та моделей у сховищах, обміну даними з обчислюваними сервісами, програмно-інтерпретованим середовищем (Python, Matlab) та засобами візуалізації результатів

моделювання. За допомогою служби Google API Gateway можна створити, публікувати та керувати API в хмарному середовищі Google Cloud. Також API використовується для читання, аналізу та запису даних із системи довгострокового зберігання даних в хмарному середовищі. Щоб задокументувати засоби RESTful API і забезпечити легкий доступ до даних, які отримуються із різних сенсорів, пропонується статичний веб-сервіс за допомогою Swagger UI та його підключення CORS у службі API Gateway. Для нього додаємо спеціальний заголовок із маркером авторизації для контролю доступу. API описано відповідно до фреймворку Open API 3.0 і збережено як файл json, завантажений у змінну специфікації в коді JavaScript, як основу для формування підсистеми документації. Щоб завантажити дані за допомогою API, користувач повинен ввести дійсний маркер авторизації, щоб отримати необхідний доступ. Використовуючи API, можна запитувати набори даних для здійснення процедури моделювання з доступних сенсорів, так і з бази даних експериментальних досліджень. На рисунку 5.5 представлено схему організації взаємодії системи моделювання з використанням API інтерфейсів [12].

За головну компоненту, призначення якої є зберігання напрацьованих результатів моделювання, обрано MySQL як просте рішення з широкими засобами інформаційно-комунікаційної підтримки. Екземпляр MySQL був розгорнутий в хмарі через Vitnami, який надає попередньо налаштований образ віртуальної машини, готовий для завантаження в екземпляр Google Cloud Platform [156, 197].

Підсистема візуалізації результатів математичного моделювання реалізована з використанням таких засобів:

- Matplotlib – одна з найпопулярніших бібліотек Python для створення двовимірних графіків та діаграм, що дозволяє створювати різноманітні типи графіків, такі як лінійні графіки, стовпчасті діаграми, точкові графіки тощо;

- Seaborn – бібліотека Python заснована на Matplotlib і надає вищий рівень абстракції для створення інформативніших графіків та дозволяє швидко створювати стилізовані графіки для аналізу даних;
- Plotly – бібліотека Python для створення інтерактивних візуалізацій, яка дозволяє створювати різноманітні типи графіків та діаграм, які дозволяють реалізовувати візуальну online взаємодію з користувачами;
- Vokeh – бібліотека Python, яку використано для створення інтерактивних візуалізацій, яка дозволяє створювати високоякісні візуалізації та надає інструменти для взаємодії з користувачем через веб-браузер.

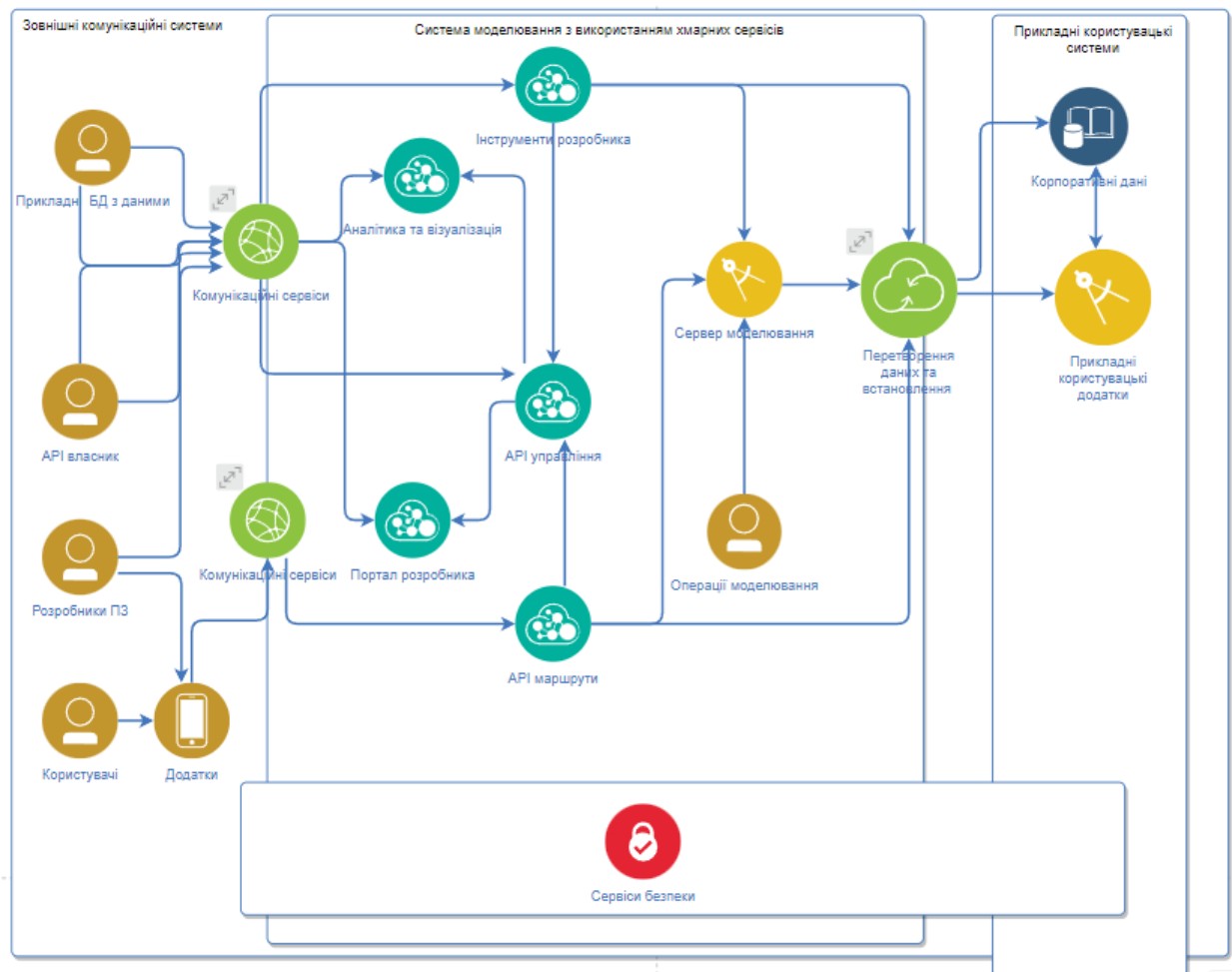


Рис. 5.5. Схема організації взаємодії системи моделювання з використанням API інтерфейсів

Особливо важливою компонентою пропонованої архітектури є підсистема, яка описує специфіку інтервального моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками. Процес математичного моделювання на основі інтервальних даних є складним і вимагає виконання деякої послідовності кроків, яка уточнюється в даній ситуації специфікою використання хмарних сервісів. Розглянемо ці кроки більш детально, але із врахуванням згаданої специфіки, яку в загальному представлено на рисунку 5.6.

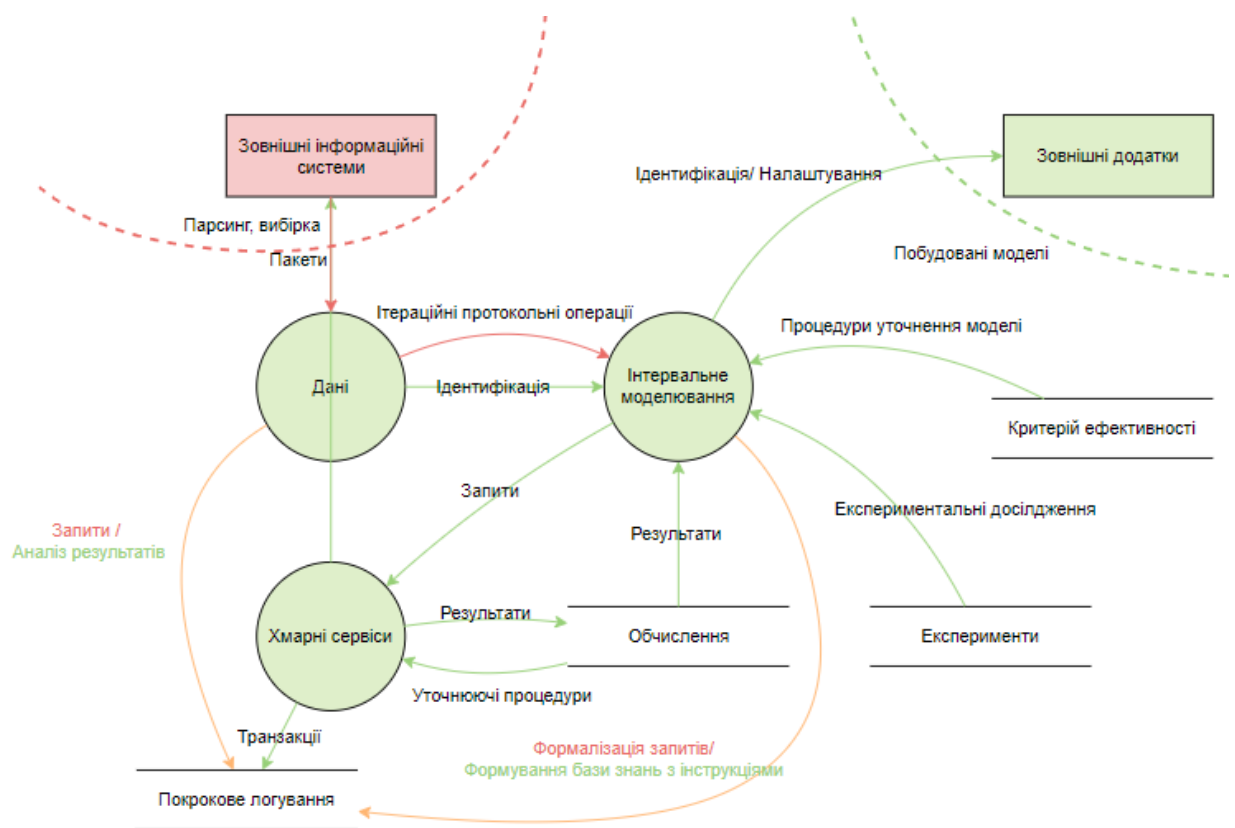


Рис. 5.6. Схема побудова інтервальної моделі з використанням хмарних сервісів

Процес побудови інтервальної моделі включає наведені нижче кроки.

1) Збір даних з сенсорів та/або напрацьованої бази експериментальних досліджень. Математична модель ґрунтується на даних, тому важливо зібрати і аналізувати відповідні дані, які характеризують поведінку системи. Цей етап

є дуже важливим в рамках інтервального підходу, а використання API-інтерфейсів дозволяє пришвидшити отримання та синхронізувати дані між системою моделювання та прикладними користувацькими системами.

2) Вибір структури математичної моделі. В нашому випадку для вибору структури можуть бути використані математичні методи структурної ідентифікації. Проте для розв'язування цієї задачі необхідним є виконання низки умов. Перш за все це вибір критерію ефективності при побудові моделі. По-друге формування набору структурних елементів. Переважно це здійснюємо використовуючи фізичні міркування. Також можливо отримання структури моделі із використання онтологічного підходу [5].

3) Параметрична ідентифікація математичної моделі. Зазвичай її виконують як певні етапи структурної ідентифікації.

4) Перевірка та аналіз результатів. Оцінюють отримані результати, порівнюючи їх з реальними даними або іншими моделями.

5) Верифікація моделі. Якщо необхідно, модель перевіряється на точність та адекватність. Така перевірка здійснюється на основі використання програмно-інтерпретованого експертного середовища;

6) Використання та інтерпретація. Отриману модель можна використовувати для прогнозування, оптимізації або прийняття рішень у відповідній предметній області. Зазначений етап графічно проілюстровано на рисунку 5.7. Цю процедуру достатньо просто виконувати в рамках запропонованої архітектури, оскільки реалізовано цілу підсистему для обміну даними з прикладними системами.

Однією із компонент запропонованої архітектури є реалізація інтелектуалізованої, консультативно-діагностичної підсистеми надання рекомендацій щодо процедур моделювання, процесів формалізованого опису моделей та їх практичного використання. Базою цієї компоненти використано ChatGPT, а його інтеграція реалізована з використанням відповідного API. ChatGPT API – це інструмент, доступний мовам програмування, що дозволяє інтегрувати функціональність ChatGPT у програмне забезпечення. Засоби Chat

GPT OpenAI надають свій API через хмару, що дозволило отримати доступ до нього з будь-якого пристрою. Після розгортання API засоби моделювання отримали набір зручних інструментів, які забезпечили доступ до його використання як для спеціалістів в галузі математичного моделювання, так і для спеціалістами з прикладних галузей.

Також, інтеграція наведеної архітектури із MATLAB, Global Optimization Toolbox та Optimization Toolbox сприяє підвищенню ефективності математичного моделювання, забезпечуючи високу точність, продуктивність і гнучкість у вирішенні складних обчислювальних задач. Це дозволяє дослідникам та практикам ефективно використовувати хмарні технології для математичного моделювання та аналізу даних.

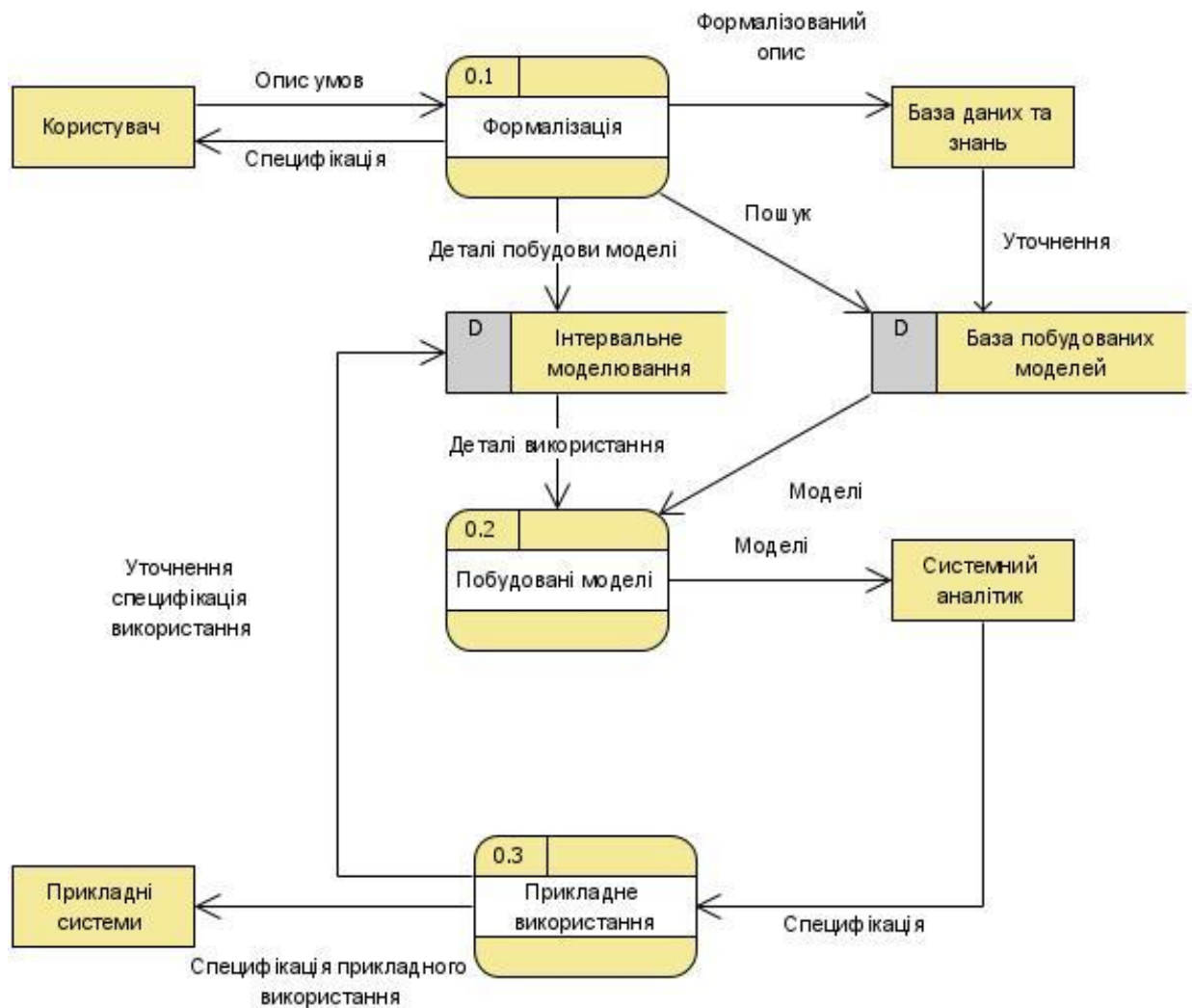


Рис. 5.7. Схема застосування розроблених інтервальних моделей

Схема інтеграції розробленої архітектури системи моделювання із MATLAB, Global Optimization Toolbox та Optimization Toolbox наведено на рис. 5.8.

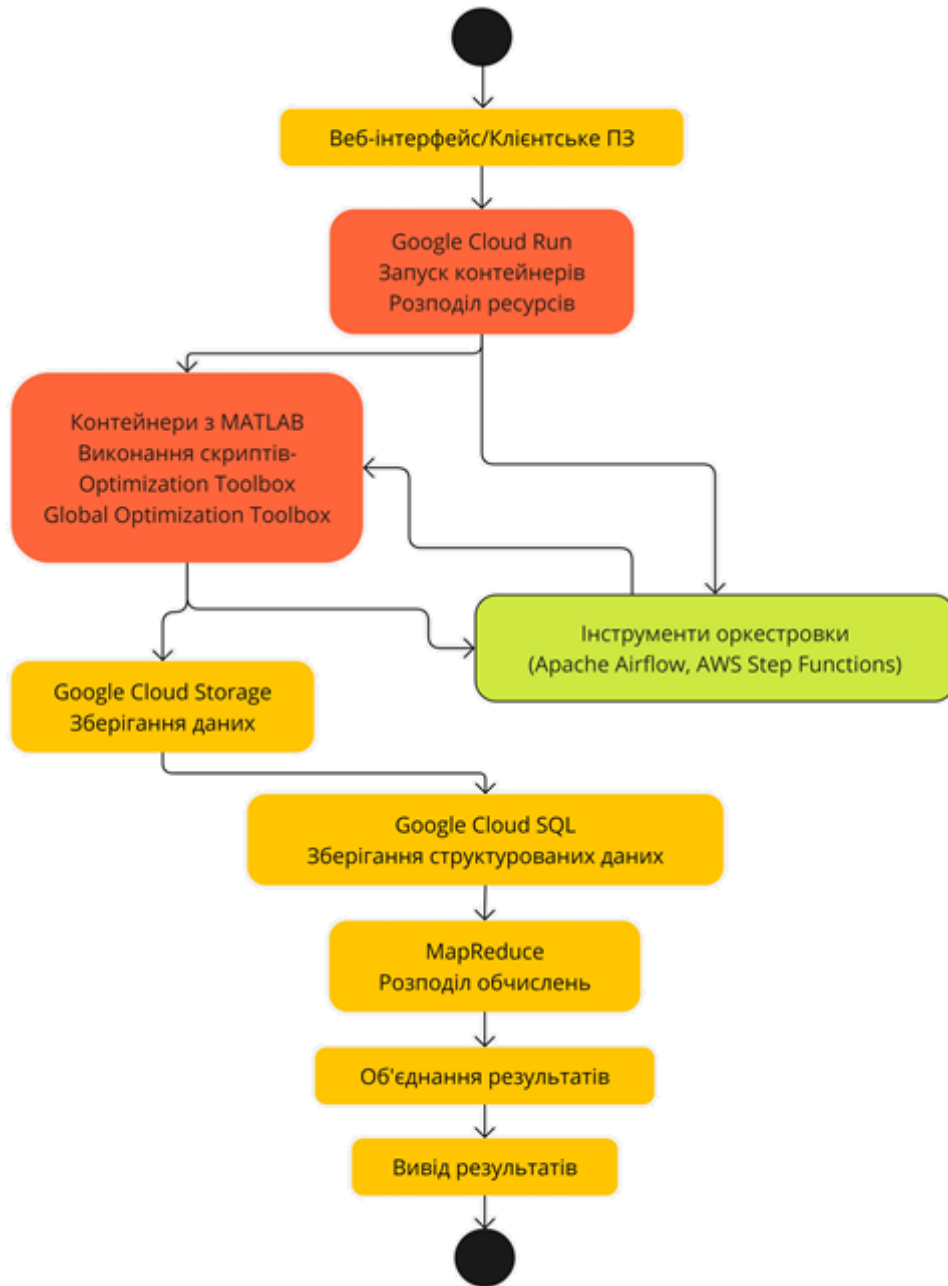


Рис. 5.8. Схема інтеграції системи моделювання із середовищем MATLAB

Для забезпечення інтеграції між різними компонентами системи та MATLAB використовуються засоби RESTful API, які забезпечують передачу даних між хмарними сервісами та MATLAB. Це забезпечує зручний і швидкий обмін інформацією для подальшої обробки. API-запити можуть запускати

MATLAB-скрипти, що дозволяє автоматизувати багато процесів і знижує необхідність ручного втручання. MATLAB Production Server надає можливість розгортати MATLAB функції як веб-сервіси. Це дає змогу використовувати MATLAB код у масштабованих та високо доступних середовищах.

Global Optimization Toolbox та Optimization Toolbox MATLAB забезпечують ефективні інструменти для вирішення задач глобальної та локальної оптимізації. Вони пропонують широкий спектр алгоритмів для лінійної, нелінійної, стохастичної та інших видів оптимізації, які є важливим елементом для побудови інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Окрім того, MATLAB може використовувати функції паралельних обчислень для виконання оптимізаційних задач на кількох вузлах хмарної платформи, що значно пришвидшує обробку даних.

Використання моделі розподілених обчислень MapReduce допомагає обробляти великі обсяги даних. Завдяки MapReduce великі обсяги даних розподіляються на окремі частини для паралельної обробки. MATLAB може використовувати цей підхід для виконання масштабованих обчислень, де кожен вузол обробляє свою частину даних. Після обробки даних на різних вузлах, результати синхронізуються та об'єднуються для подальшого аналізу.

Інструменти оркестровки, такі як Apache Airflow або AWS Step Functions, забезпечують планування, моніторинг та управління етапами обчислень, включаючи запуск MATLAB-скриптів та обробку результатів. Використання Docker та Kubernetes для розгортання MATLAB-скриптів як мікросервісів у хмарному середовищі забезпечує гнучкість, масштабованість та модульність системи. Використання веб-сервісів та контейнерів для інтеграції MATLAB дозволяє ефективно розгортати і управляти функціями MATLAB.

Архітектура використовує хмарні сервіси для зберігання даних. Зокрема, Google Cloud Storage, який використовується для зберігання вхідних даних, проміжних результатів та вихідних файлів. MATLAB отримує доступ до цих даних через API, що забезпечує швидкий та зручний обмін

інформацією. Використання баз даних, таких як Google Cloud SQL, для зберігання структурованих даних та метаданих забезпечує надійне та ефективне управління даними.

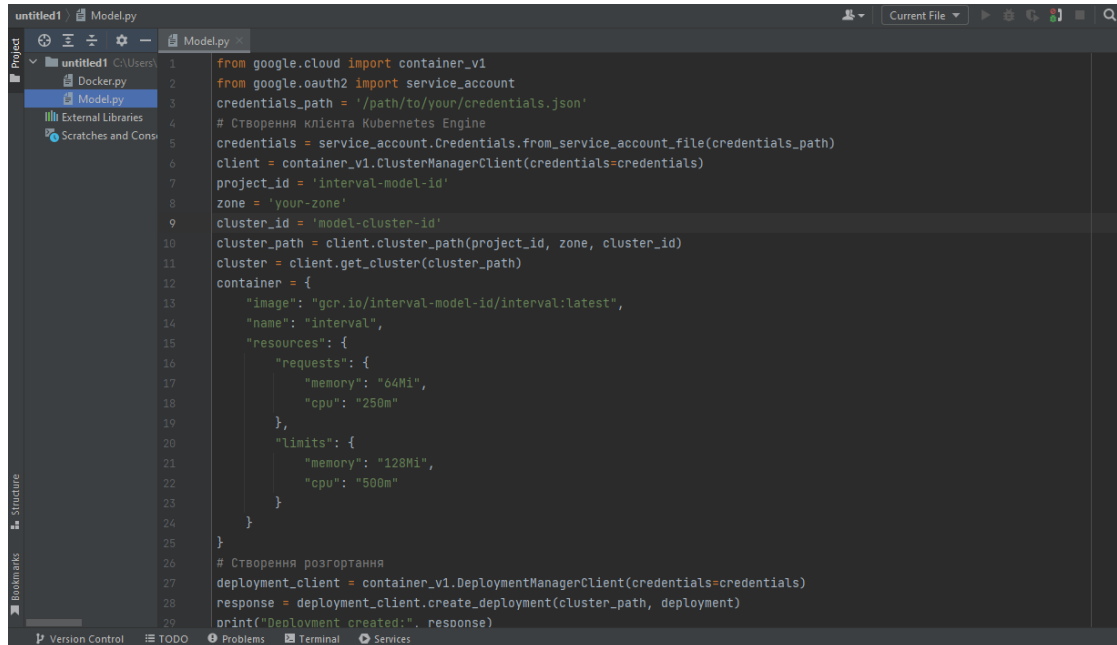
Запропонована архітектура програмної системи для математичного моделювання на основі хмарних сервісів дозволить підвищити ефективність при розробці математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних та їх практичного використання. Архітектура є відкритою, що дозволяє легко розширювати та модифікувати модель, додаючи або змінюючи окремі складові без значних змін у концепції її побудови.

Використання швидких та ефективних градієнтних та метаевристичних алгоритмів для обробки даних дозволяє швидше отримувати результати та знижує обчислювальну складність. Інструменти візуалізації допомагають інтерпретувати та представляти дані у зрозумілій формі, що сприяє кращому розумінню процесів та характеристик об'єкта, які відображає модель. Архітектура побудована з урахуванням можливості масштабування, що дозволяє працювати з великими обсягами даних та розширювати обсяг моделювання за зміною потреб. Повторне використання напрацьованої бази моделей та експериментальних досліджень дозволяє адаптуватися до різних умов та задач, сприяючи її використанню в різних галузях та сценаріях. Запропонована архітектура при її реалізації забезпечить підвищення точності та адекватність математичних моделей, а також зменшенню часу, необхідного для їх розробки та аналізу.

5.3. Програмна реалізація системи для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних

В рамках імплементації запропонованої архітектури реалізовано систему CloudInterval. Основною компонентою системи є хмарна інфраструктура, яка реалізована з використанням Google Cloud Platform. Для організації обчислень використано платформу Google Cloud Run, яка

ґрунтується на Knative і дозволяє запускати контейнери, доступ до яких здійснюється за допомогою HTTP-запитів. Для реалізації обчислювальних процедур використано Python, зокрема, такі бібліотеки як NumPy і SciPy (рисунок 5.9).



```

1  from google.cloud import container_v1
2  from google.oauth2 import service_account
3  credentials_path = '/path/to/your/credentials.json'
4  # Створення клієнта Kubernetes Engine
5  credentials = service_account.Credentials.from_service_account_file(credentials_path)
6  client = container_v1.ClusterManagerClient(credentials=credentials)
7  project_id = 'interval-model-id'
8  zone = 'your-zone'
9  cluster_id = 'model-cluster-id'
10 cluster_path = client.cluster_path(project_id, zone, cluster_id)
11 cluster = client.get_cluster(cluster_path)
12 container = {
13     "image": "gcr.io/interval-model-id/interval:latest",
14     "name": "interval",
15     "resources": {
16         "requests": {
17             "memory": "64Mi",
18             "cpu": "250m"
19         },
20         "limits": {
21             "memory": "128Mi",
22             "cpu": "500m"
23         }
24     }
25 }
26 # Створення розгортання
27 deployment_client = container_v1.DeploymentManagerClient(credentials=credentials)
28 response = deployment_client.create_deployment(cluster_path, deployment)
29 print("Deployment created:", response)

```

Рис. 5.9. Використання Python для програмної реалізації інтервальних моделей

На рисунку 5.10 наведено діаграму послідовності програмної реалізації процесів побудови інтервальної математичної моделі. Як було зазначено вище, процеси математичного моделювання супроводжуються складними обчислювальними процедурами, які мають високу обчислювальну складність.

Моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками базується на використанні онтологій для формалізації знань про задачі ідентифікації, про методи структурної та параметричної ідентифікації та критерії їх вибору. Використання онтологій дозволяє чітко визначити характеристики задач ідентифікації, умови застосування методів ідентифікації та критерії вибору. Класи, представлені в даному контексті, служать як абстракції, що відображають різні аспекти процесу ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками. Їх використання сприяє уніфікації даних та методів, що підвищує ефективність та точність ідентифікації математичних моделей (рис. 5.11).

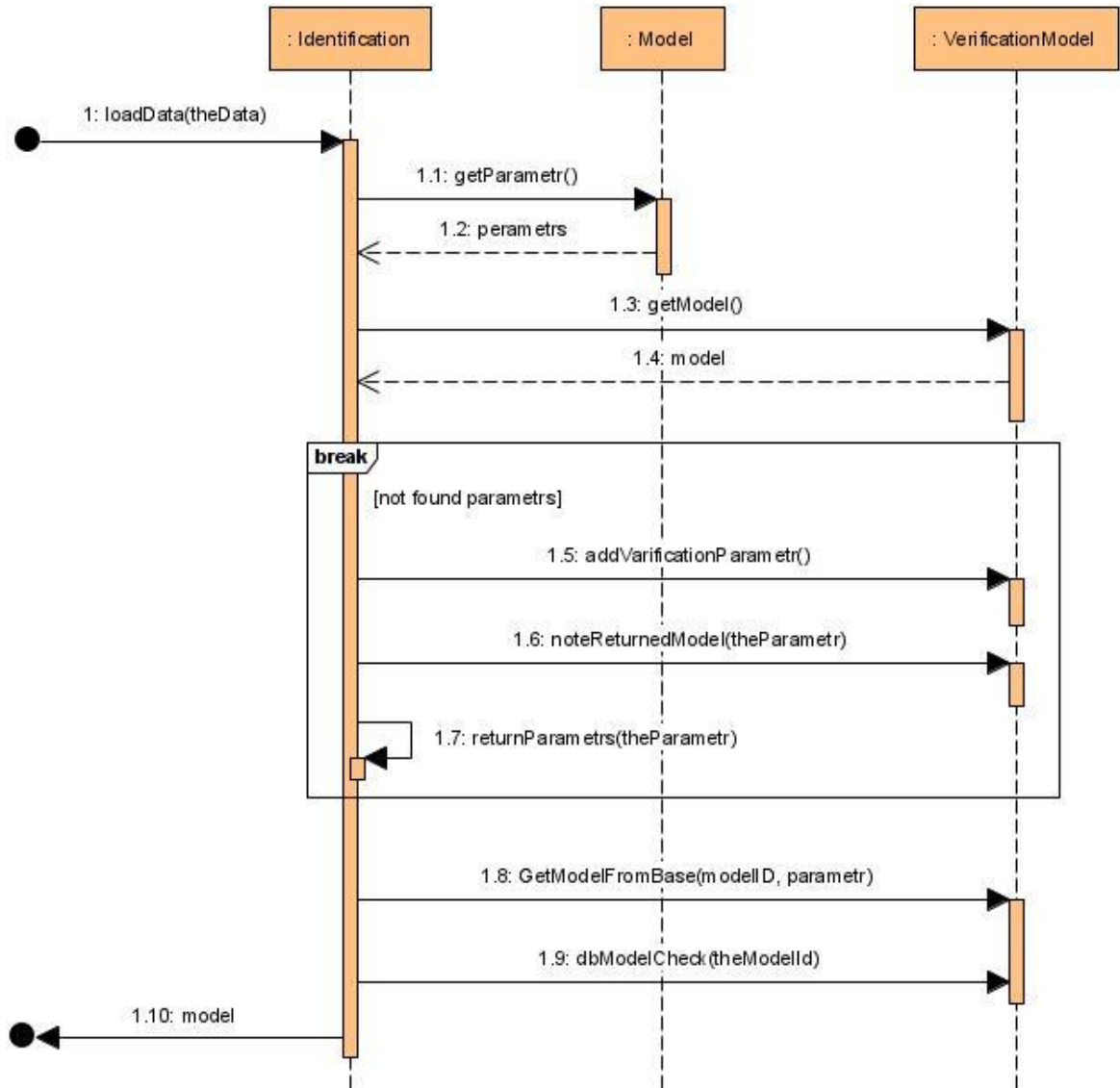


Рис. 5.10. Діаграма послідовності процесів побудови математичної моделі

Коротко охарактеризуємо основні класи, які реалізовані на основі онтологічних описів. Клас Characteristics представляє основні характеристики та властивості задач ідентифікації у системі. Він містить такі атрибути, як ідентифікатор (id), назву характеристики (characteristicName), назву ознаки (featureName) та значення ознаки (featureValue). Основна функція цього класу полягає в описі різноманітних характеристик задач, які впливають на процеси ідентифікації, що є критично важливим для ідентифікації та моделювання. Клас Equation представляє математичні рівняння, які описують інтервальні моделі статичних систем.

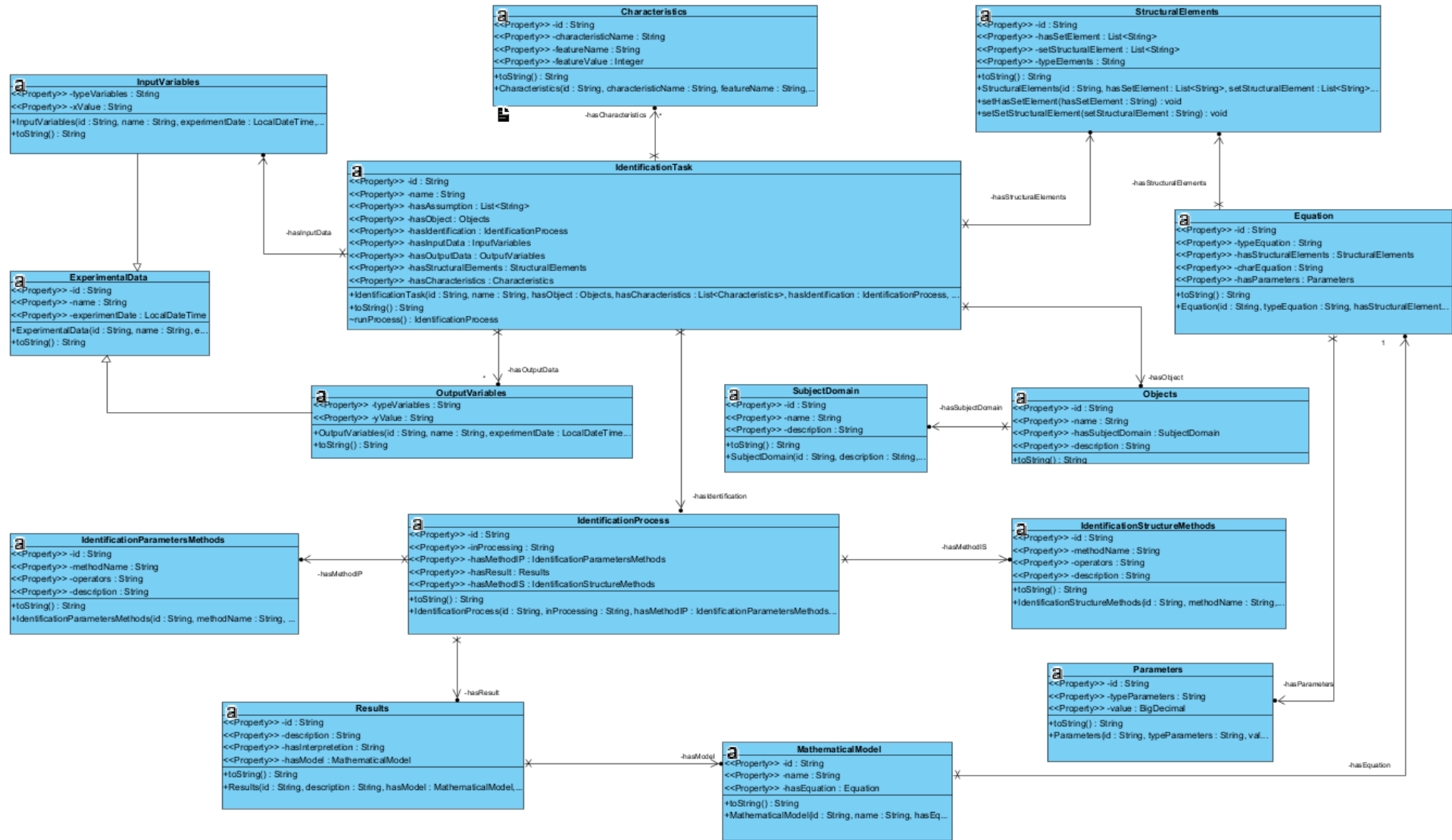


Рис. 5.11. Діаграма класів реалізації процесів моделювання із використанням онтологічних описів

Він включає атрибути для типу рівняння (`typeEquation`), структурних елементів (`hasStructuralElements`), символічне представлення рівняння (`charEquation`) та параметрів (`hasParameters`). Цей клас відіграє важливу роль у моделюванні, оскільки дозволяє формалізувати математичні відношення між змінними.

Клас `ExperimentalData` служить для зберігання даних, отриманих в результаті експериментів. Його атрибути включають ідентифікатор (`id`), назву експерименту (`name`) та дату проведення експерименту (`experimentDate`). Дані, що зберігаються в цьому класі, використовуються для ідентифікації математичних моделей і оцінки їхньої точності. Клас `IdentificationParametersMethods` описує методи ідентифікації параметрів інтервальних моделей, включаючи ідентифікатор (`id`), назву методу (`methodName`), оператори (`operators`) та опис методу (`description`). Використання цього класу дозволяє інтегрувати різні підходи до параметричної ідентифікації в процесі моделювання. Клас `IdentificationProcess` визначає процес ідентифікації математичних моделей, включаючи методи та результати ідентифікації. Він містить атрибути, що вказують на метод ідентифікації параметрів (`hasMethodIP`), метод структурної ідентифікації (`hasMethodIS`), результати (`hasResult`) та статус процесу (`inProcessing`). Клас дозволяє організувати і управляти процесом ідентифікації, зберігаючи всі важливі аспекти в єдиній структурі.

Клас `Objects` представляє об'єкти, що вивчаються в рамках моделювання. Він включає ідентифікатор (`id`), назву (`name`), опис (`description`) та предметну область (`hasSubjectDomain`). Цей клас забезпечує засоби для ідентифікації і опису об'єктів дослідження, що є важливим для точного налаштування процесу моделювання. Клас `SubjectDomain` описує предметну область дослідження. Використання цього класу дозволяє визначити контекст, у якому відбувається моделювання, що важливо для адаптації моделей до специфічних вимог конкретної галузі.

Клас Results призначений для збереження результатів ідентифікації, включаючи ідентифікатор результату (id), опис (description), модель, до якої відносяться результати (hasModel), та інтерпретацію результатів (hasInterpretation). Клас забезпечує фіксацію отриманих результатів і можливість їхнього подальшого використання.

Реалізовані класи забезпечують структуроване представлення різних аспектів моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками. Їх використання сприяє уніфікації даних та методів, полегшує аналіз та оптимізацію моделей, що в свою чергу підвищує точність і надійність результатів досліджень.

Для прискорення виконання складних обчислювальних етапів математичного моделювання використано модель розподілених обчислень від Google – MapReduce.

Для зберігання та управління даними в хмарі використано Google Cloud Storage, а процедури маніпуляції даними реалізовано з використанням Google Cloud SQL. В якості підсистеми локального зберігання результатів моделювання використано СУБД MySQL. Схему бази даних системи наведено на рис. 5.12.

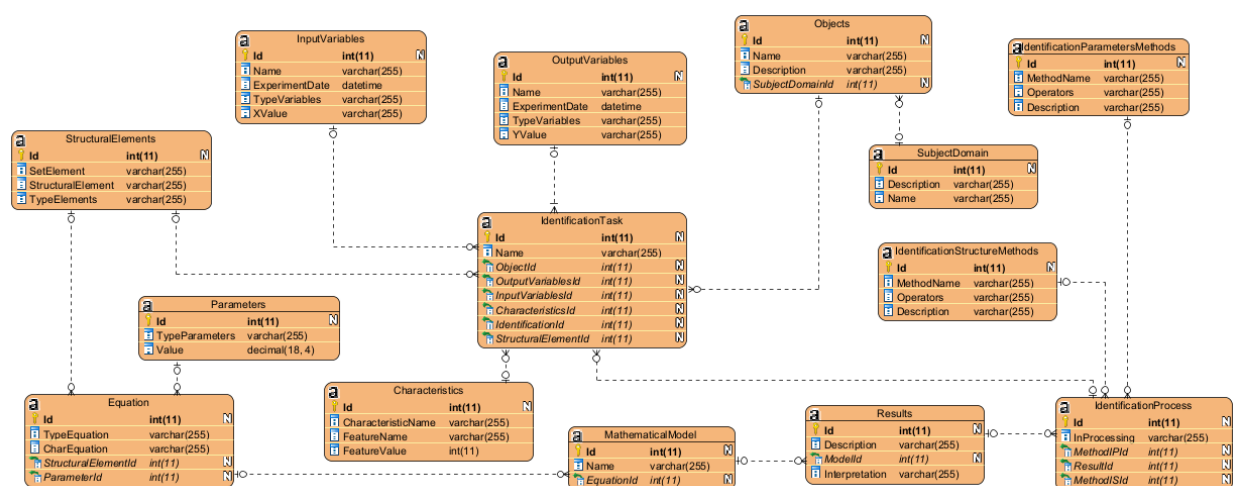


Рис. 5.12. Схему бази даних системи

Технологію контейнеризації Docker і платформу керування контейнерами Kubernetes використано для розгортання окремих програмних компонентів підсистеми математичного моделювання як мікросервісів у хмарних середовищах. Керування контейнерами та образами в Docker здійснюється подібно керуванню програмами в терміналі Linux. Спочатку треба вказати ключове слово `Docker`, потім вказати команду, яку треба виконати, а потім об'єкт застосування команди, аргументи, опції та інші додатки.

На рисунку 5.13 представлено скріншот, який відображає процедуру налаштування Docker, та відповідні засоби для виконання процедур.

Проілюструємо використанням хмарного середовища на прикладах реалізації процесів моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками.

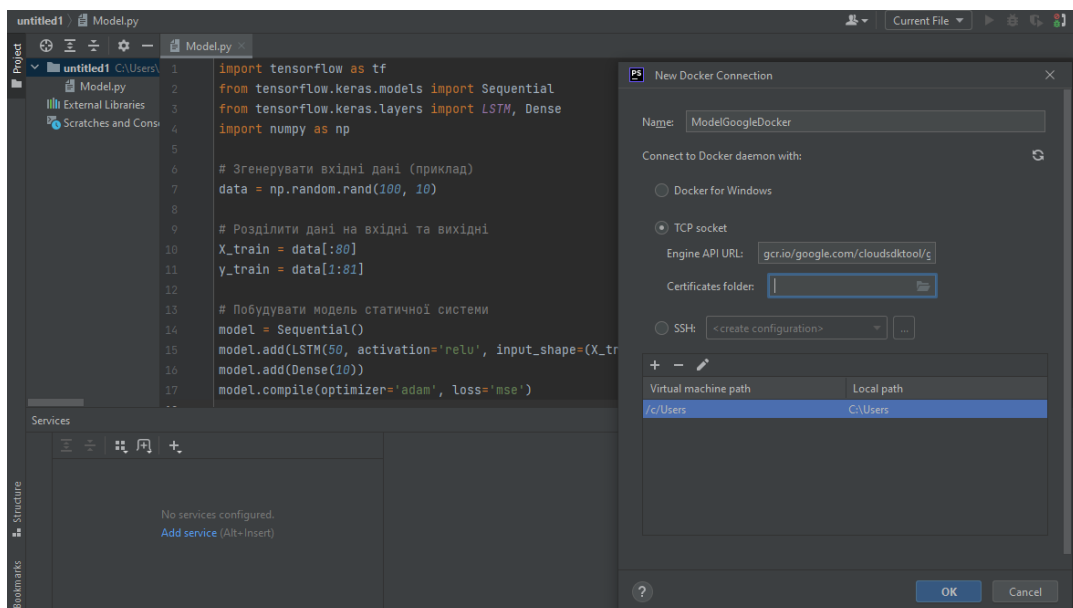


Рис. 5.13. Екранна форма для відображення процедури налаштування для образу Docker

Експериментальні дослідження програмної системи для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій були направлені на дослідження ефективності та особливостей

запропонованого підходу. Розглянемо їх більш детально.

На рисунку 5.14 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.

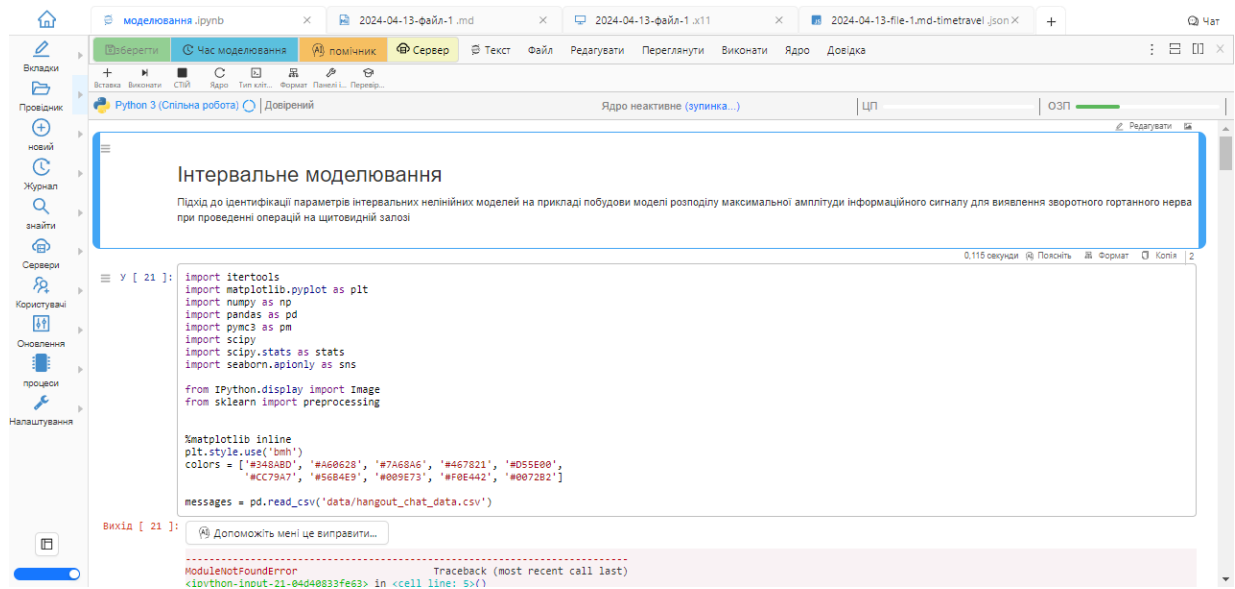


Рис. 5.14. Екранна форма для ілюстрації функціонування підсистеми інтервального моделювання в системі CloudInterval

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%.

Визначення сфер застосування програмної системи і її можливостей для вирішення конкретних завдань та проблем підтверджено шляхом використання напрацьованих результатів для прикладних галузей.

На рисунку 5.15 представлено приклад візуалізації результатів математичного моделювання візуалізації розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на основі розробленої моделі для виявлення поворотного гортанного нерву при проведенні операцій на щитовидній залозі [49].

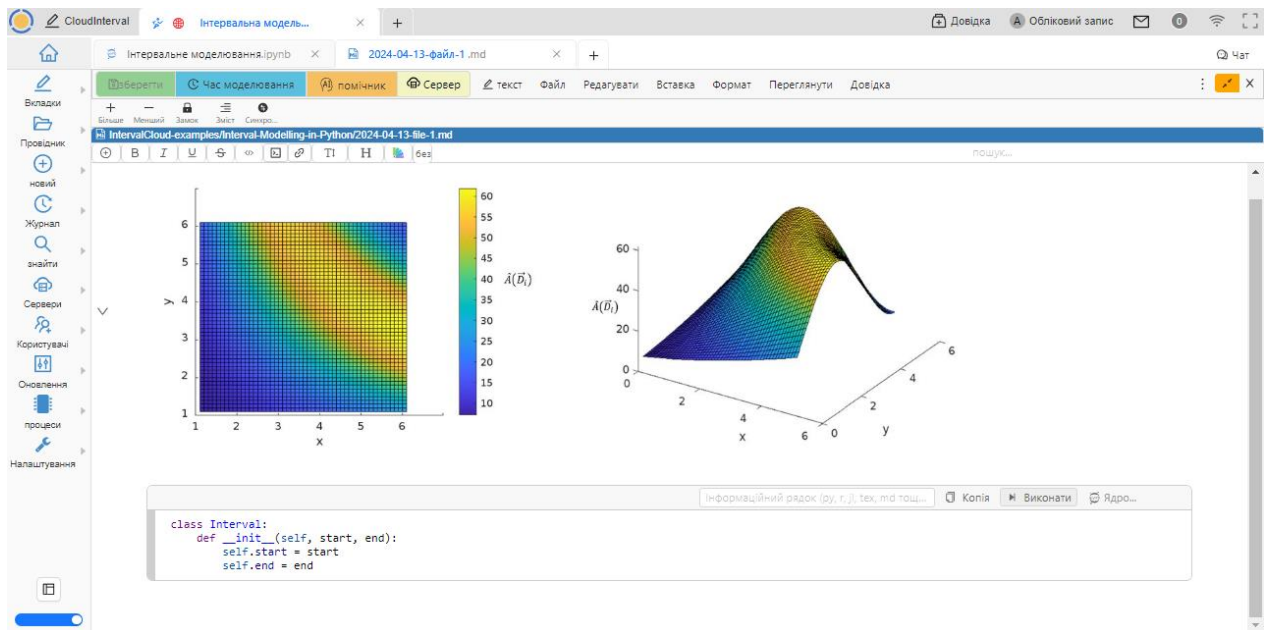


Рис. 5.15. Екранна форма для ілюстрації процесу візуалізації результатів математичного моделювання в системі CloudInterval

На рисунку 5.16 наведено приклад використання інтелектуалізованої, консультативно-діагностичної підсистеми на базі ChatGPT. Використання ChatGPT API сприяє швидкому вивченню основних можливостей системи та покращенню процесів розуміння процедур математичного моделювання.

Проведені дослідження підтвердили можливості використання розробленої системи для математичного моделювання на основі методів аналізу інтервальних даних та хмарних технологій в прикладних галузях та сприяють розвитку нових інструментів та методів для аналізу та прогнозування.

Висновки до розділу 5

В розділі обґрунтовано та реалізовано архітектуру програмного забезпечення для моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі інтервальних даних з використанням хмарних технологій.

В результаті проведених досліджень отримано такі результати:

1. 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.

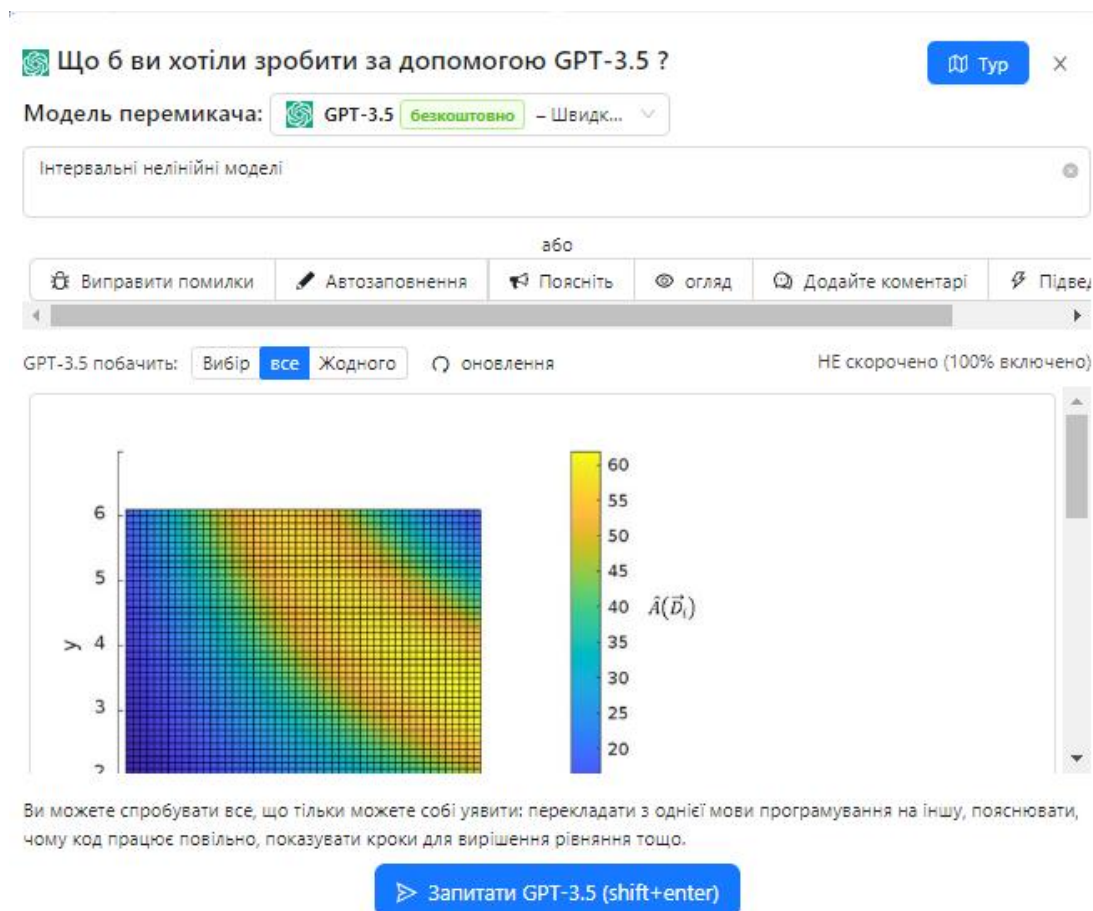


Рис. 5.16. Реалізація консультативно-діагностичної підсистеми на базі ChatGPT в системі CloudInterval

Такий підхід можливо реалізувати із використанням 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 .

2. Вперше запропоновано та обґрунтовано архітектуру програмного забезпечення для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій. Особливостями запропонованої архітектури є імплементація підсистеми інтервального моделювання статичних систем в хмарне сервісно-орієнтоване середовище із врахуванням оптимізації обчислювальних схем за допомогою використання платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, безкоштовних програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API на всіх етапах математичного моделювання

3. На базі запропонованої архітектури реалізовано програмну систему для математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних з використанням хмарних технологій. Однією із ключових компонент даної системи є інтелектуалізована консультативно-діагностична підсистема на основі штучного інтелекту, використання якої уможливить покращення ефективності практичного використання запропонованих рішень.

РОЗДІЛ 6.

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ СИСТЕМ З НЕЛІНІЙНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

В даному розділі наведені результати застосування ефективних методів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які дозволяють із заданою точністю описувати складні процеси та залежності. В даному контексті, дослідження, присвячені розробці математичних моделей для біогазових установок (БГУ), які відіграють важливу роль у підвищенні ефективності та стабільності їх функціонування.

Проведені дослідження процесів функціонування БГУ стосуються розробки математичних моделей та їх комп'ютерної реалізації, які встановлюють залежність рН середовища від обсягів та структури сировини для добового завантаження, а також робочих параметрів температури та вологості на підставі інтервального аналізу експериментальних даних. В процесі досліджень, на основі розроблених інтервальних моделей, встановлено, що цей показник залежить від обсягу та структури сировини, а також від температури та вологості субстрату у біореакторі. Для побудови цих математичних моделей було використано метод ідентифікації параметрів моделі на основі багатовимірної оптимізації, розроблений та удосконалений у попередніх розділах даного дослідження.

Результати експериментальних досліджень для біогазової установки продемонстрували високий рівень точності розроблених моделей (до 1%), що дозволяє застосовувати розроблені моделі для контролю рівня рН середовища в біореакторі.

Таким чином, на основі експериментальних даних були розроблені моделі, які описують різні конфігурації структури та обсягів сировини для добового завантаження. Отримані математичні моделі, представлені у вигляді алгебраїчних нелінійних рівнянь, можуть бути застосовані для оптимізації

процесів у біореакторах шляхом визначення оптимальних обсягів сировини кожного виду залежно від температури та вологості субстрату. Це відкриває нові можливості для ефективного управління біогазовими установками, забезпечуючи стабільні умови для процесів анаеробного зброджування та підвищення якості отриманого біогазу.

Також наведено результати математичного моделювання об'єктів, які є складовими декарбонізації промисловості та транспортної інфраструктури.

Результати отримані в даному розділі опубліковані автором в працях [17, 20, 21, 23, 47, 146].

6.1. Моделювання статичних характеристик процесу бродіння в біогазових установках

Виробництво біогазу стає альтернативою традиційним джерелам енергії, таким як вугілля, що сприяє зменшенню викидів парникових газів та поліпшує якість повітря [71]. Це також допомагає зменшити залежність від невідновлюваних джерел енергії, зокрема в умовах, коли світові споживчі потреби в енергії зростають [21, 23]. Також виробництво біогазу може бути пов'язане з використанням біологічних відходів, наприклад для переробки органічних твердих побутових відходів чи продуктів сільськогосподарської діяльності. Використання біологічних відходів для виробництва біогазу може допомогти вирішити проблему утилізації відходів і зменшити негативний вплив на довкілля. Також це дозволяє сільським господарствам зменшити вплив на навколишнє середовище та виробляти енергію, що зменшує залежність від імпорту палива [81].

6.1.1. Принцип функціонування БГУ та основні характеристики процесу бродіння.

Основним елементом в технології виробництва біогазу є біогазова установка. Біогазова установка – це комплекс споруд і технологічного

обладнання, які інтегровані в єдину автоматичну систему керованого метанового бродіння [184]. Ефективність функціонування біогазової установки залежить від великої кількості чинників, зокрема від типу сировини чи її суміші, температури, вологості тощо. Одним із результуючих чинників, який безпосередньо впливає на ефективність процесу метанового бродіння є рН показник середовища бродіння. При його відхиленні від норми ефективність процесу виробництва біогазу знижується, а при досягненні критичних значень взагалі зупиняється [230]. Одним із способів підвищення ефективності процесу виробництва біогазу є розробка і реалізація математичного та програмного забезпечення для моделювання і управління процесами в біогазовій установці у спосіб адаптивного налаштуванням її параметрів та параметрів технологічного процесу під визначену структуру сировини. Такий підхід у першу чергу вимагає розробки математичних моделей для конкретного типу БГУ, які б пов'язували кислотність середовища із обсягом та структурою сировини, а також із параметрами, якими є температура та вологість. У цьому випадку можемо використати індуктивний підхід для побудови математичних моделей, які відображають зазначений зв'язок у формі алгебричних рівнянь. Як відомо [83, 297], індуктивний підхід ґрунтується на аналізі даних, отриманих в результаті вимірювань зазначених характеристик процесу під час функціонування БГУ з метою ідентифікації математичної моделі з подальшим її застосування для дослідження процесу та підвищення ефективності функціонування БГУ. При цьому в процесі отримання експериментальних даних виникають похибки. До того ж сама математична модель є певним спрощенням взаємозв'язку між параметрами та характеристиками технологічного процесу і також породжує неточності. Для опису зазначених похибок доцільно використати аналіз інтервальних даних, який на відміну від методів аналізу даних стохастичного підходу не вимагає значної вибірки даних та забезпечує гарантовану точність математичної моделі [249, 250]. Хоча очевидно, що точність моделі в цьому випадку буде нижчою.

Таким чином, розробка математичної моделі та її комп'ютерної реалізації, яка б пов'язувала кислотність середовища із обсягом та структурою сировини, а також із параметрами, якими є температура та вологість на підставі аналізу інтервальних даних, отриманих під час дослідження БГУ заданого типу є актуальною. При цьому використання методів аналізу інтервальних даних для ідентифікації математичної моделі вимагатиме використання методів нелінійної оптимізації [150, 226, 227, 228].

Базову комплектацію біогазової установки на основі вузлів і споруд наведено на рисунку 6.1 [184].

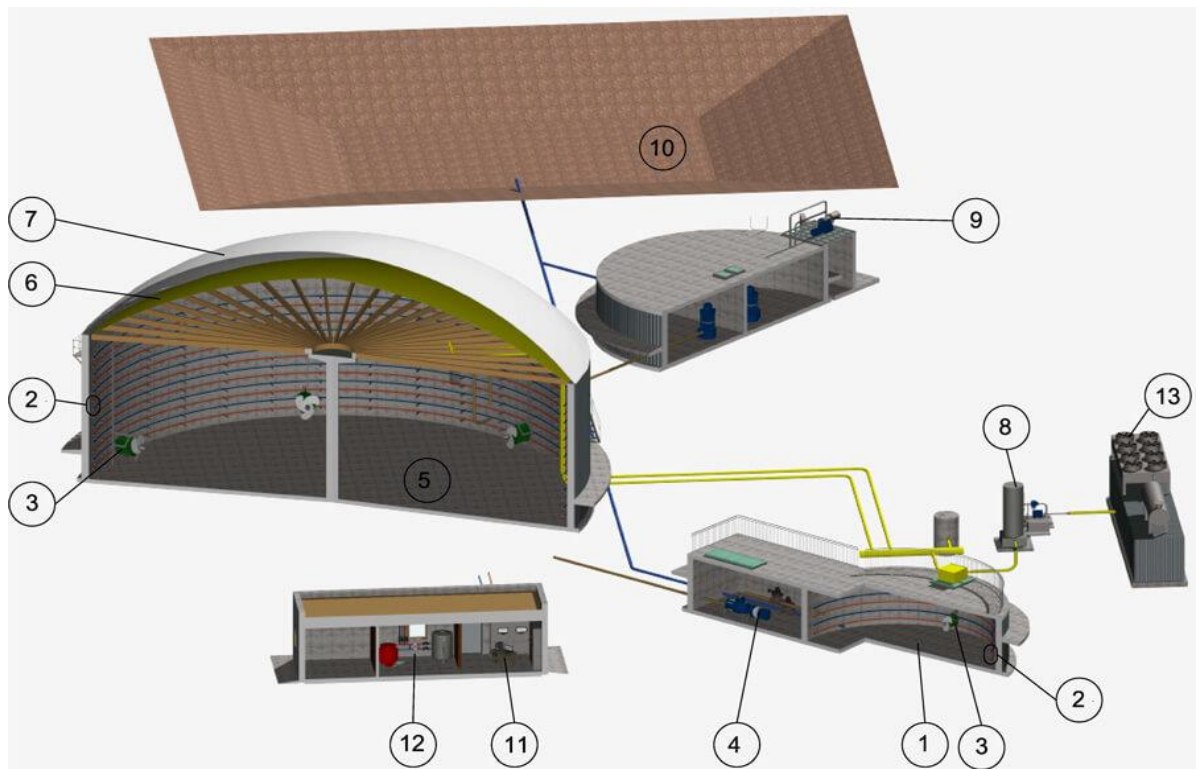


Рис. 6.1. Схема базової комплектації біогазової установки, де: 1 – приймальний резервуар, 2 – система обігрівання, 3 – механічні мішалки, 4 – система подачі біомаси, 5 – ферментатор, 6 – газгольдер, 7 – купол, 8– система газовідведення та газоподачі з системою відведення конденсату та сіркоочищення, 9 – сепаратор, 10 – лагуна чи резервуар для зберігання рідких добрив, 11 –система автоматики, візуалізації процесів і управління, 12 –телопункт, 13 – Ко-генератор

Розглянемо коротко принцип роботи біогазової установки. Відходи надходять в приймальний резервуар (1). У ньому відбувається їх попереднє накопичення, підігрів (2) і ретельне перемішування (3). Подача сировини в ферментатор (5) відбувається 4-6 разів на добу за допомогою спеціального насоса для рідких і драглистих субстратів. Ферментатор (5) є газонепроникним, герметичним резервуаром. Для підтримки стабільної температури всередині ферментатор обладнується системою обігрівання днища і стін (2). Субстрат постійно перемішується за допомогою механічних мішалок (3). Вивантаження вибродженого субстрату відбувається автоматично з такою ж періодичністю, як і завантаження. Управління роботою всієї біогазової станції здійснюється системою автоматики (11). Біогаз накопичується в газгольдері (6), який використовують в якості газонепроникного покриття ферментатора. Відведення біогазу відбувається по трубопроводу (8). З газгольдера (6) проводиться безперервна подача біогазу на когенераційну установку або систему очищення біогазу. Перероблений субстрат після установки подається на сепаратор (9). Система механічного поділу працює від 4-6 разів на добу і розділяє залишки бродіння після ферментатора на тверді та рідкі біодобрива. Все обладнання контролюється системою автоматики (11).

Наведемо основні характеристики процесів бродіння в біогазових установках. На сьогоднішній день напрямки досліджень у виробництві біогазу зосереджені на оптимізації різних параметрів, що впливають на продуктивність зброджування. Основною метою є отримання таких конфігурацій процесу бродіння, що здатні забезпечити оптимальні гідролітичні конверсії та вихід газу.

Процес ферментації є ключовим етапом в виробництві біогазу і включає в себе розклад органічних матеріалів з використанням мікроорганізмів. Для досягнення ефективною ферментації, контролюється кілька важливих параметрів [108, 151, 160]:

— температура, оскільки, різні види мікроорганізмів оптимально розмножуються при різних температурах. Зазвичай температурний режим для ферментації може бути від 35°C до 55°C.

— рН-рівень, що вказує на концентрацію іонів водню (H^+) у розчині, які визначають його кислотність або лужність. Більшість мікроорганізмів, які беруть участь у ферментації, оптимально розмножуються в певному діапазоні кислотності середовища. Зазвичай це може бути від 6,5 до 8,5. Регулювання рН-рівня допомагає забезпечити оптимальні умови для росту мікроорганізмів.

— час ферментації, що визначається розщепленням органічних речовин та утворенням біогазу. Він може коливатися від декількох днів до кількох тижнів, залежно від умов та виду сировини.

— концентрація та структура сировини: для виробництва біогазу можуть використовуватися різні види сировини, такі як органічні відходи, біомаса, сільськогосподарські залишки та інше. При цьому кількість та якість сировинної бази мають велике значення для ефективності процесу виробництва.

— вологість сировини, що впливає на газоутворення та масовий баланс процесу. Зазвичай вологість сировини повинна бути у діапазоні від 70% до 80%.

— відношення C/N (карбон/азот), яке визначається співвідношенням маси вуглецю до маси азоту в сировині. Це важливий параметр, оскільки недостатнє або занадто велике відношення може вплинути на ефективність ферментації.

— інтенсивність перемішування для забезпечення рівномірного розподілу мікроорганізмів та сировини, що допомагає уникнути зон затримки та покращує ефективність ферментації.

Всі ці параметри взаємодіють і визначають ефективність процесу ферментації при виробництві біогазу, відповідно, контроль за ними дозволяє

досягти оптимальних умов для роботи мікроорганізмів та отримання максимального обсягу виробленого біогазу [108].

Контроль рівня рН є важливим елементом в оптимізації ферментаційного процесу. Системи автоматизованого регулювання можуть контролювати та відслідковувати необхідну концентрацію кислоти чи лугу, які додають до ферментера для регулювання рівня рН. Додавання кислот або лугів до реактору дозволяє підтримувати або коригувати рівень рН. Такі стратегії автоматизованого керування рН біогазу базуються на комбінованому моніторингу фази газів та рідин [230].

Також контроль рівня рН можна здійснювати на основі подачі сировини. Оптимальне співвідношення твердих та рідких фракцій у сировині безпосередньо впливає на ефективність процесу ферментації та виробництва метану. Також, оптимальне співвідношення твердих та рідких фракцій допомагає усунути проблеми з нерівномірним розподілом сировини та забезпечення ефективного перемішування для рівномірної ферментації. Важливу роль при цьому відіграє сировина, її обсяг та структура. Як правило дослідження стосуються впливу органічного навантаження (ОН) в сировині на ефективність анаеробного зброджування. Зокрема, вплив ОН на виробництво біогазу з харчових відходів і процес бродіння. Аналіз мікробного середовища показує, що високі ОН призводять до зменшення гідролізних бактерій і метаногену [120, 35].

Також вплив структури сировини на стабільність процесу бродіння та вихід біогазу досліджують на основі регресійного аналізу, зокрема встановлюючи оптимальне співвідношення різних видів сировини, таких як харчові відходи, гній худоби та осад стічних вод. На основі моделей роблять висновок, яку кількість енергії можна відновити з оптимально змішаних видів сировини, що забезпечує стабільність процесу бродіння, високу енергоефективність і стратегію вирішення типових проблем у біореакторах [202].

Дослідження анаеробного зброджування відходів, багатих органічними речовинами, також можуть проводити у лабораторних прототипах. На основі експериментів з різними субстратами: наприклад, біологічно розкладеними відходами зі сміттєзвалищ та осаду із очисних споруд у природній лагуні встановлюють об'єм утвореного біогазу в залежності від часу перебування в зброджуванні та концентрації органічної речовини в сировині [120]. Також проводять лабораторні дослідження впливу температурних коливань на ефективність функціонування біогазових установок, які визначають тенденції проходження процесу бродіння із врахуванням різних температурних режимів [151].

Останнім часом актуальним є математичне моделювання процесів бродіння на основі різних підходів. Можна виокремити модель анаеробного бродіння складних органічних матеріалів у неідеально циклічних реакторах періодичної дії для виробництва біогазу. На основі динамічних моделей описують вплив розподілу реагенту внаслідок умов змішування, часового інтервалу подачі, часу гідравлічного утримування та параметрів змішування на продуктивність процесу бродіння. В якості сировини для анаеробного зброджування досліджують різні органічні відходи, наприклад гній великої рогатої худоби за різних робочих умов [108]. При цьому використовують різні методи визначення характеристик субстрату для моделювання анаеробного зброджування твердих органічних відходів. В основу методів, як правило, покладено розподіл органічних речовин на суміш твердих і розчинних фракцій. Отримані таким чином характеристики субстрату та моделі фракціонування забезпечують хороше прогнозування виробництва метану, складу біогазу, загальної кількості летких та твердих речовин, аміаку та лужності середовища [160]. Також використовують математичні моделі виробництва метану методом анаеробного бродіння на основі відпрацьованих відходів спиртових заводів в умовах змінного значення рН. Для цього враховують добове завантаження сировини, як засіб управління рівнем рН середовища на основі частинної заміни субстрату [83].

Об'єктом дослідження є також робочі параметри установки анаеробного зброджування. Для цього використовують моделі кумулятивного виходу біогазу та метану в процесі анаеробного зброджування відходів, які реалізують, наприклад, за допомогою методу штучної нейронної мережі та які враховують рН середовища, робочу температура тощо. Такі моделі демонструють, що контроль рівня рН середовища є важливим завданням для ефективного процесу виробництва біогазу установками анаеробного зброджування з метою підвищення ефективності процесу, а також для регулюванні умов роботи метантенка [111].

Отже, задача управління рівнем рН середовища для забезпечення ефективного функціонування БГУ на основі використання математичних моделей є актуальною. Враховуючи дослідницький досвід такі моделі повинні базуватися на аналізі структури та обсягів сировини із врахуванням добового завантаження біореакторів та робочих параметрів вологості та температури. Оскільки побудова моделей передбачає використання результатів вимірювань, то для врахування невизначеності та забезпечення гарантованих прогностичних властивостей цих моделей нами запропоновано використати методи математичного моделювання на основі інтервального аналізу даних.

6.1.2. Інтервальні моделі залежності рН середовища від структури сировини та технологічних параметрів

6.1.2.1. Умови проведення експериментальних досліджень

Для розробки математичних моделей рН середовища в біогазовій установці використано результати вимірювань з виробництва біогазу. Дані надано ТОВ «Теофіпільська енергетична компанія», яка здійснює виробництво біогазу на основі БГУ базової комплектації. Дані вимірювань за місяці серпень, жовтень, листопад та грудень наведено в таблицях 6.1-6.6. Вимірювання рН середовища здійснювалося пристроєм із похибкою 1%.

Наведені дані характеризують використання різної кількості та різних видів сировини твердої та рідкої фракції, що дозволить змоделювати та проаналізувати вплив комбінування різних видів сировини на рН середовище у ферментаторах БГУ.

Таблиця 6.1

Результати експериментальних досліджень характеристик та параметрів процесу ферментації в БГУ за серпень місяць.

Номер точки контролю	Маса завантаження жому, 1000кг	Маса завантаження гною ВРХ, 1000кг	Маса завантаження жому з соломкою, 1000кг	Об'єм завантаження барди, м ³	Об'єм завантаження сечівки, м ³	Вологість, %	Температура в біореакторі, °С	Нижня межа вимірюваного рН	Верхня межа вимірюваного рН
i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	pH_i^-	pH_i^+
1	72	10	4	150	59	97,9	47,9	7,8012	7,9588
2	56	10	4	40	14,4	97,8	48,2	8,1279	8,2921
3	80	10	8	80	59	97,2	48	7,8804	8,0396
4	58	10	16	140	0	96,525	47,6	8,0091	8,1709
5	54	40	0	90	72	96,9	48,3	7,9299	8,0901
6	144	20	16	0	14,4	96,291	47,3	8,0784	8,2416
7	130	10	0	160	59	97,1	47	7,9002	8,0598
8	78	5	0	90	14,4	96,837	47,2	8,0586	8,2214
9	58	5	0	120	14,4	96,75	46,6	7,92	8,08
10	87	10	0	150	43	96,73	44,4	8,0388	8,2012

В якості компонентів субстрату використовувалась сировина таких видів:

- твердої фракції:
 - жом цукрових буряків;
 - суміш жому цукрових буряків та соломи;
 - суха барда післяспиртова;
 - гній великої рогатої худоби (ВРХ);
- рідкої фракції:
 - барда післяспиртова;
 - сечівка;
 - патока.

Для визначення аналітичного виразу залежності рН середовища від обсягу та структури сировини, а також від температури та вологості середовища в якості базисних функцій використано показникові функції, виправдано такими міркуваннями:

- при дослідженні статистичних даних виявлено нелінійний характер залежностей. показникові функції дозволяють моделювати широкий діапазон нелінійних залежностей між змінними. Значення степенів можуть визначати різні форми кривих, включаючи поліноміальну, експоненціальну та інші, що можна адаптувати до конкретного контексту та отримувати моделі, які більш адекватно відображають властивості даних;

Таблиця 6.2

Результати експериментальних досліджень характеристик та параметрів процесу ферментації в БГУ за жовтень місяць

Номер точки контролю	Об'єм завантаження барди, м ³	Маса завантаження жому, 1000кг	Маса завантаження гною ВРХ, 1000кг	Об'єм завантаження сечівки, м ³	Вологість, %	Температура в біореакторі, °С	Нижня межа вимірюваного рН	Верхня межа вимірюваного рН
i	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	pH_i^-	pH_i^+
1	120	117	30	25	97.055	40.6	8.0388	8.2012
2	180	244	40	0	98	40.9	7.9002	8.0598
3	120	156	20	58.8	96.573	41	8.0586	8.2214
4	220	209	40	28.6	97	40.8	8.0388	8.2012
5	200	137	20	25	96.365	41	8.0685	8.2315
6	10	195	25	34.8	96.9	41.6	7.9794	8.1406
7	180	223	40	50	96.2	41	8.0289	8.1911
8	120	137	30	50	96.8	40.5	7.9497	8.1103
9	200	127	20	38.4	95.9	40.5	7.9596	8.1204
10	340	109	40	36	96.1	40.3	7.9596	8.1204
11	110	84	20	0	96.204	40.5	7.92	8.08
12	120	102	30	0	96.6	40.2	7.8804	8.0396
13	130	96	30	7.2	96.507	40.2	7.9992	8.1608
14	250	78	20	0	96.7	42.5	8.0586	8.2214
15	100	170	50	0	96.813	43.4	8.0289	8.1911
16	260	106	40	0	97	43.5	7.9695	8.1305

- порівняно з деякими іншими нелінійними функціями, показникові функції можуть бути відносно простими для інтерпретації;

- використання степеневих функцій може дозволити будувати складні нелінійні залежності з меншою кількістю параметрів порівняно з іншими нелінійними моделями.

Таблиця 6.3

Результати експериментальних досліджень характеристик та параметрів процесу ферментації в БГУ за листопад місяць (ферментатор 1).

Номер точки контролю	Об'єм завантаження барди, м ³	Маса завантаження жому, 1000кг	Маса завантаження гною ВРХ, 1000кг	Об'єм завантаження сухої барди, 1000кг	Об'єм завантаження сечівки, м ³	Вологість, %	Температура в біореакторі, °С	Нижня межа вимірюного рН	Верхня межа вимірюного рН
<i>I</i>	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	pH_i^-	pH_i^+
1	20	78	40	8	0	96.794	43.5	8.1279	8.2921
2	265	80	20	0	0	96.2	44	7.9893	8.1507
3	560	130	40	24	0	96.3	44.3	8.0982	8.2618
4	90	174	40	18	0	97.019	44.4	8.0982	8.2618
5	130	222	40	24	50	96.5	44.4	8.0289	8.1911
6	120	170	40	12	25	96.8	44.6	8.0784	8.2416
7	180	245	60	30	0	96.5	44.4	8.1972	8.3628
8	110	210	50	0	10.8	96.906	44.5	7.9893	8.1507
9	50	96	50	0	25	96.1	42.3	8.0685	8.2315
10	120	63	30	0	27.6	96.305	42.6	8.0091	8.1709
11	170	208	40	0	18	96.771	43.6	8.1477	8.3123
12	200	54	20	0	18	96	45	7.8507	8.0093
13	200	137	30	0	10.2	96.4	45.1	8.0388	8.2012

Виходячи із фізичних міркувань структура 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:

$$y(X) = \beta_0 + \left(\frac{\sum_{i=1}^s \beta_i \cdot x_i}{1 + \sum_{j=1}^l \beta_j \cdot x_j} \right)^{\beta_{k+5}} + \beta_{k+1} \cdot x_{k+1}^{\beta_{k+2}} + \beta_{k+3} \cdot x_{k+2}^{\beta_{k+4}}, \quad (6.1)$$

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);

Результати експериментальних досліджень характеристик та параметрів процесу ферментації в БГУ за листопад місяць (ферментатор 2).

Номер точки контролю	Об'єм завантаження барди, м ³	Маса завантаження жому, 1000кг	Маса завантаження гною ВРХ, 1000кг	Об'єм завантаження сухої барди, 1000кг	Об'єм завантаження сечівки, м ³	Вологість, %	Температура в біореакторі, °С	Нижня межа вимірюного рН	Верхня межа вимірюного рН
<i>I</i>	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	pH_i^-	pH_i^+
1	20	78	40	8	0	95.88	41.2	7.9497	8.1103
2	265	80	20	0	0	96.3	41.4	7.9299	8.0901
3	560	130	40	24	0	96.55	41.9	8.1477	8.3123
4	90	174	40	18	0	96	41.2	8.0289	8.1911
5	130	222	40	24	50	95.868	41.4	7.9497	8.1103
6	120	170	40	12	25	96.156	41.6	7.9992	8.1608
7	180	245	60	30	0	96.1	41.4	8.0883	8.2517
8	110	210	50	0	10.8	96.3	41.2	7.9497	8.1103
9	50	96	50	0	25	95.9	39.5	8.0289	8.1911
10	120	63	30	0	27.6	96.4	39.7	8.0784	8.2416
11	170	208	40	0	18	96.478	41.2	8.1279	8.2921
12	200	54	20	0	18	96.4	43.8	7.9398	8.1002
13	200	137	30	0	10.2	95.987	44.7	8.1279	8.2921

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 °С середовища бродіння;

$k = s + l$ – кількість видів сировини, де s – кількість видів сировини твердої фракції, l – кількість видів сировини рідкої фракції.

Застосування виразу $\frac{\sum_{i=1}^s \beta_i \cdot x_i}{1 + \sum_{j=1}^l \beta_j \cdot x_j}$ у рівнянні математичної моделі (6.1)

обґрунтовано необхідністю врахування відношення частки сировини твердої фракції до сировини рідкої фракції для багатокomпонентного субстрату у біореакторі БГУ.

Таблиця 6.5

Результати експериментальних досліджень характеристик та параметрів процесу ферментації в БГУ за грудень місяць (ферментатор 1).

Номер точки контролю	Об'єм завантаження барди, м ³	Маса завантаження жому, 1000кг	Об'єм завантаження сечівки, м ³	Об'єм завантаження патоки, м ³	Вологість, %	Температура в біореакторі, °С	Нижня межа вимірюваного рН	Верхня межа вимірюваного рН
<i>I</i>	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	pH_i^-	pH_i^+
1	130	129	0	0	96	34	7.8447	8.0353
2	70	159	0	0	96.6	34.7	7.8842	8.0758
3	80	147	0	14.4	96.1	32.1	8.0127	8.2073
4	130	120	39.4	10	96.635	35.4	7.9732	8.1668
5	200	101	0	0	96.5	34.8	7.8546	8.0454
6	150	97.5	16.5	0	97	35.8	7.8941	8.0859
7	30	102	14.4	10	96.4	35.9	8.1312	8.3288
8	110	112.5	14.4	15	97	36	7.9633	8.1567
9	320	69	0	5	96.7	36.3	7.9336	8.1264
10	120	100	14.4	0	96.9	36.1	7.9633	8.1567
11	130	0	0	0	96.8	36.1	7.9139	8.1061
12	210	37.5	14.4	0	97.2	36	7.9435	8.1365
13	220	51	14.4	0	96.3	36.9	7.8447	8.0353
14	40	33	0	11	96.696	38	8.0028	8.1972
15	220	137.5	14.4	10	96.8	38.2	8.0522	8.2478

6.1.2.2. Результати побудови інтервальних моделей залежності рН середовища від структури сировини та технологічних параметрів

На основі наведених матеріалів експериментальних досліджень та методів описаних в розділах 2-4, було отримано нелінійні моделі для різних випадків комбінування видів сировини.

Для розв'язку оптимізаційної задачі (2.3) на основі наведених даних використовувалося розроблене середовище для моделювання. Відповідно, для даних за серпень місяць отримано такий вектор оцінок $\vec{\beta}$ параметрів моделі:

$$\vec{\beta} = \begin{pmatrix} 9.997, 17.304, 321.69, -264.728, -0.116, 251.675, \\ 3176.194, -1.493, 215.389, -1.32, 3.608 \end{pmatrix}.$$

Таблиця 6.6

Результати експериментальних досліджень характеристик та параметрів процесу ферментації в БГУ за грудень місяць (ферментатор 2).

Номер точки контролю	Об'єм завантаження барди, м ³	Маса завантаження жому, 1000кг	Об'єм завантаження сечівки, м ³	Об'єм завантаження патоки, м ³	Вологість, %	Температура в біореакторі, °С	Нижня межа вимірюваного рН	Верхня межа вимірюваного рН
<i>I</i>	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	pH_i^-	pH_i^+
1	130	129	0	0	96.2	44.6	8.062	8.258
2	70	159	0	0	96.3	44.3	8.062	8.258
3	80	147	0	14.4	96.1	43.8	8.1318	8.329
4	130	120	39.4	10	96.782	43.3	8.102	8.298
5	200	101	0	0	96.8	42.9	7.933	8.126
6	150	97.5	16.5	0	96.737	42.8	8.102	8.298
7	30	102	14.4	10	97	42.5	8.24	8.44
8	110	112.5	14.4	15	96.8	42.3	8.013	8.207
9	320	69	0	5	97	42.1	8.102	8.298
10	120	100	14.4	0	96.9	42.2	8.052	8.248
11	130	0	0	0	96.3	41.6	7.973	8.167
12	210	37.5	14.4	0	96.2	40.6	8.082	8.278
13	220	51	14.4	0	96.7	39.6	7.963	8.157
14	40	33	0	11	96.2	38.7	8.072	8.268
15	220	137.5	14.4	10	96.8	38.2	7.934	8.126

Тепер підставимо отримані результати ідентифікації у вираз (6.1):

$$y(X) = 9.997 + \left(\frac{17.304 \cdot x_1 + 321.69 \cdot x_2 - 264.728 \cdot x_3}{1 - 0.116 \cdot x_4 + 251.675 \cdot x_5} \right)^{3.608} - 3176.194 \cdot x_6^{-1.493} + 215.389 \cdot x_7^{-1.32}, \quad (6.2)$$

де

x_1 – об'єм в 1000 кг завантаженого у відповідний період (в поточній добі) жому цукрових буряків;

x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період (в поточній добі) сухої барди післяспиртової;

x_3 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період (в поточній добі) суміші жому та соломи;

x_4 – маса в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) сечівки;

x_5 – об’єм в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) барди.

Отримана математична модель у вигляді виразу (6.2) описує залежність між рН середовища бродіння у ферментаторі біореактора та обсягом та структурою сировини, а також із температурою та вологістю. На рис. 6.5 наведено результати зіставлення експериментальних даних та модельованих значень рН середовища субстрату в біореакторі на основі побудованих моделей. Зокрема, рис 6.2.а демонструє, що результати моделювання належать інтервалам вимірних значень рН, що вказує на адекватність моделі.

Відповідно, на основі даних за жовтень місяць було обчислено оцінки $\vec{\beta}$ вектора параметрів моделі у такому вигляді:

$$\vec{\beta} = \begin{pmatrix} 2.982, -2.456, 8.669, 102827876.087, 9.326, \\ 57.5192, -0.536, 3.494, -0.864, 1.993 \end{pmatrix}.$$

Отримано нелінійну модель на основі видів сировини твердої (жом, гній ВРХ) та рідкої (барда, сечівка) фракції, які використовувалися в даному періоді, у вигляді такої залежності:

$$\hat{y}(X) = 2.982 + \left(\frac{-2.456 \cdot x_2 + 8.669 \cdot x_3}{1 - 102827876.087 \cdot x_1 + 9.326 \cdot x_4} \right)^{1.993} + \\ + 57.5192 \cdot x_5^{-0.536} + 3.494 \cdot x_6^{-0.864}, \quad (6.3)$$

де

x_1 – об’єм в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) барди;

x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період (в поточній добі)

жому;

x_3 – маса в 1000 кг завантаженого у відповідний період (в поточній добі)

гною ВРХ;

x_4 – маса в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі)

сечівки.

Адекватність моделі демонструє рис 6.2.б, належністю модельованого значення рН інтервальним значенням результатів вимірювання.

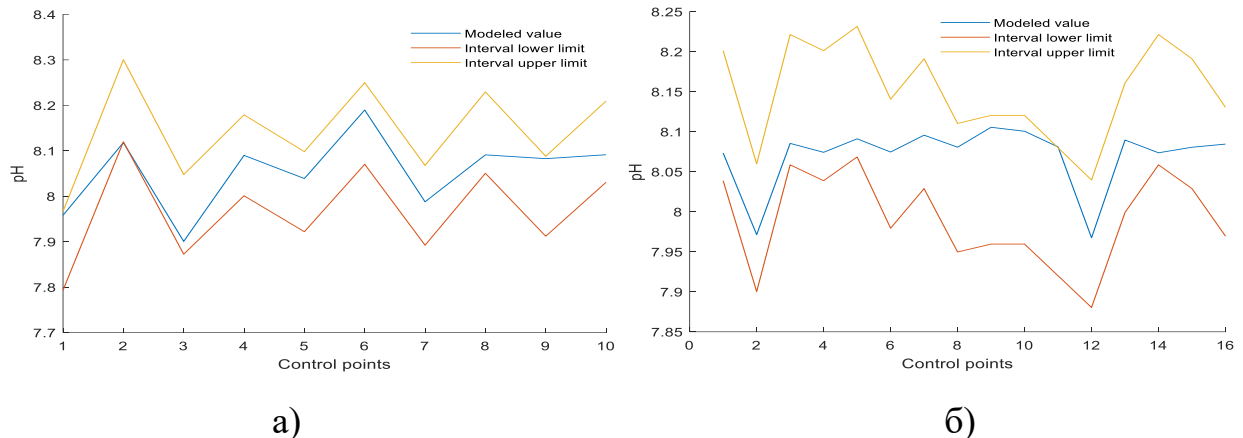


Рис. 6.2. Результати моделювання залежності рН середовища від обсягу та структури сировини, температури та вологості для ферментаторів (біореактора): а) – за місяць серпень, б) – за місяць жовтень

У листопаді використовувалися два ферментатори із однаковими параметрами завантаження сировиною та різними параметрами температури та вологості. Структуру сировини твердої фракції складають жом, гній ВРХ та суха барда, рідкої фракції – барда та сечівка. Відповідно, на основі даних для першого ферментатора отримали такі оцінки $\vec{\beta}$ вектора параметрів:

$$\vec{\beta} = \begin{pmatrix} 4.986, 36.114, -151.306, 191.582, 136.827, 561.936, \\ -180.749, -1.517, 124.524, -0.968, 1.887 \end{pmatrix}$$

та нелінійну залежність у такому вигляді:

$$\hat{y}(X) = 4.986 + \left(\frac{36.114 \cdot x_2 - 151.306 \cdot x_3 + 191.582 \cdot x_4}{1 + 136.827 \cdot x_1 + 561.936 \cdot x_5} \right)^{1.887} - \\ - 180.749 \cdot x_6^{-1.517} + 124.524 \cdot x_7^{-0.968}, \quad (6.4)$$

де

x_1 – об'єм в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) барди;

x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період (в поточній добі)

жому;

x_3 – маса в 1000 кг завантаженого у відповідний період (в поточній добі) гною ВРХ;

x_4 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період (в поточній добі) сухої барди післяспиртової;

x_5 – маса в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) сечівки.

Отриманий вектор оцінок параметрів для другого ферментатора у листопаді місяці:

$$\vec{\hat{\beta}} = \begin{pmatrix} 8.064, 0.0024, -0.0028, 0.017, 346.0068, 10157.327, \\ -463.569, -79.703, -891.169, -29.228, 0.238 \end{pmatrix},$$

обумовив нелінійну модель залежності між рН середовища і обсягом та аналогічною структурою сировини, а також із температурою та вологістю такого вигляду:

$$\hat{y}(X) = 8.064 + \left(\frac{0.0024 \cdot x_2 - 0.0028 \cdot x_3 + 0.017 \cdot x_4}{1 - 346.0068 \cdot x_1 + 10157.327 \cdot x_5} \right)^{0.238} - \\ - 463.569 \cdot x_6^{-79.703} - 891.169 \cdot x_7^{-29.228}. \quad (6.5)$$

На рис. 6.3.а, 6.3.б наведено графіки модельованого значення та експериментальних даних за вказаний період. Модельовані значення рН середовища належать інтервалам вимірних значень $[pH_i^-; pH_i^+]$ у всіх точках замірів, що вказує на адекватність моделей із вибраною структурою.

Результати моделювання на основі даних за грудень місяць, в якому функціонувало два ферментатори також із однаковим завантаженням сировини (жом – тверда фракція, барда, сечівка та патока – рідка фракція) наведено нижче.

Вектор оцінок параметрів моделі для першого ферментатора:

$$\vec{\hat{\beta}} = \begin{pmatrix} 8.852, 35.613, 3369.812, -4807.859, 31.381, \\ -9.061, -1.193, -13.971, -0.788, 0.6246 \end{pmatrix}$$

та інтервальна нелінійна модель:

$$\hat{y}(X) = 8.852 + \left(\frac{35.613 \cdot x_2}{1 - 3369.812 \cdot x_1 - 4807.859 \cdot x_3 + 31.381 \cdot x_4} \right)^{0.6246} - 9.061 \cdot x_5^{-1.193} - 13.971 \cdot x_6^{-0.788}, \quad (6.6)$$

де

x_1 – об'єм в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) барди;

x_2 – маса в 1000 кг завантаженої у відповідний період (в поточній добі)

жому;

x_3 – маса в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) сечівки

x_4 – маса в м³ завантаженої у відповідний період (в поточній добі) патоки.

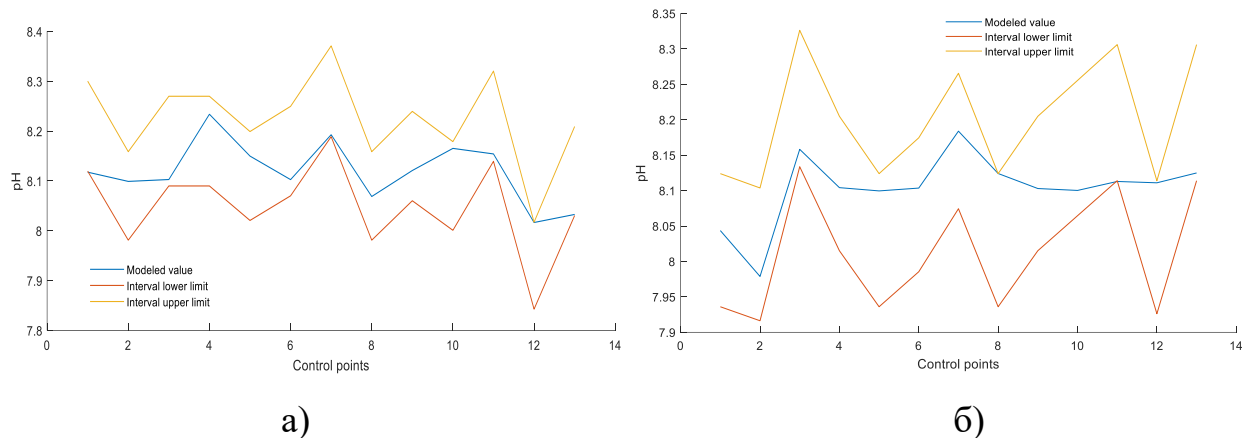


Рис. 6.3. Результати моделювання залежності рН середовища від обсягу та структури сировини, температури та вологості для ферментаторів біореактора першого етапу: а) – за місяць листопад (ферментатор 1), б) – за місяць листопад (ферментатор 2)

Для другого ферментатора отримано вектор оцінок параметрів:

$$\vec{\hat{\beta}} = \begin{pmatrix} 7.769, 9.613e - 07, 30.477, -111.194, 68.748, \\ 8.891, -0.595, -176.716, -1.729, 0.153 \end{pmatrix}$$

та модель:

$$\hat{y}(X) = 7.769 + \left(\frac{9.613e - 07 \cdot x_2}{1 + 30.477 \cdot x_1 - 111.194 \cdot x_3 + 68.748 \cdot x_4} \right)^{0.153} + 8.891 \cdot x_5^{0.595} - 176.716971 \cdot x_6^{-1.729}. \quad (6.7)$$

Моделі є адекватними та відображають залежність рівня рН середовища бродіння від параметрів технологічного параметру із заданою точністю 1% (рис. 6.4.а-6.4.б).

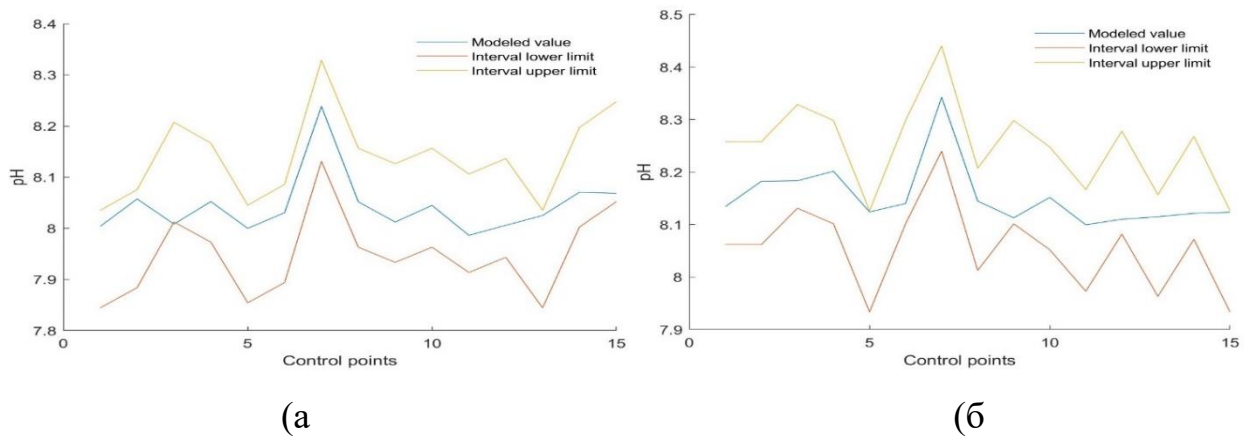


Рис. 6.4. Результати моделювання залежності рН середовища від обсягу та структури сировини, температури та вологості для ферментаторів (біореактора): (а – за місяць грудень (ферментатор 1), (б – за місяць грудень (ферментатор 2)

6.1.3. Інтерпретація результатів моделювання

Для дослідження залежності рівня рН від різних чинників було проведено чисельні експерименти на основі побудованих моделей. Результати дослідження впливу співвідношення видів сировини твердої та рідкої фракції при фіксованих середніх значеннях температури та вологості на основі моделі (6.2), наведено на рисунку 6.5.

Зокрема, рисунок 6.5.а демонструє, що у серпні при максимальному добовому завантаженні сировини твердої фракції частка сировини рідкої фракції стабілізує значення рівня рН в діапазоні 7.9-8. В той же час, при максимальному добовому завантаженні сировини рідкої фракції зміна частки

сировини твердої фракції обумовлення зниження значення рівня рН з 8.4 до 8 одиниць. Аналіз структури сировини за серпень показав, що домінуючим видом сировини твердої є жом. Жом включає в себе велику кількість органічних кислот, відповідно його додавання призводить до вироблення більшої кількості органічних кислот у процесі ферментації. При цьому, вироблені органічні кислоти зменшують рівень рН у системі. Сировину рідкої фракції формують барда та сечівка, які також містять органічні речовини, їх розкладання призводить до утворення органічних кислот та аміаку. Зокрема, сечівка містить аміачні сполуки, наприклад, аміак (NH_3), який реагуючи з водою, утворює амонійні й гідроксидні іони, що підвищує рівень рН.

Така ж тенденція спостерігається для структури сировини (жом, рідка барда, сечівка та в незначних кількостях патока) у грудні місяці (рис. 6.5.б). При цьому спостерігаються незначна змінна рівня рН, що пояснюється властивостями жому стабілізувати рівень рН, утримуючи його на певному рівні під час змін у реакційному середовищі.

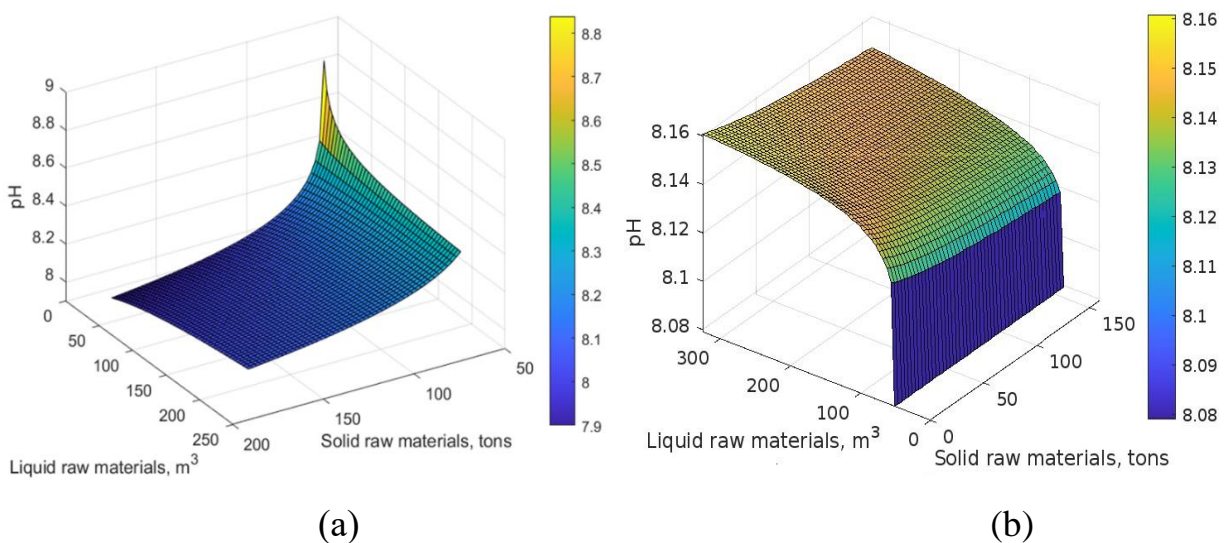


Рис 6.5. Залежність рівня рН від структури сировини на основі моделювання згідно даних: (а – за місяць серпень, (б – за місяць грудень

Також було досліджено комбінований вплив сировини різних фракцій та вологості середовища на основі даних та моделі за місяць серпень, що відображено на рис. 6.6.

Аналіз результатів досліджень показав, що зміна вологості в діапазоні 30-60 відсотків (оптимальними зазвичай є 35-55%) при мінімальному денному завантаженні сировини твердої фракції забезпечує зміну рівня рН на одиницю (рис 6.6.а). При цьому максимальне добове завантаження сировини твердої фракції (рис. 6.6.б) дозволяє понизити рівень рН на одиницю при однакових параметрах вологості.

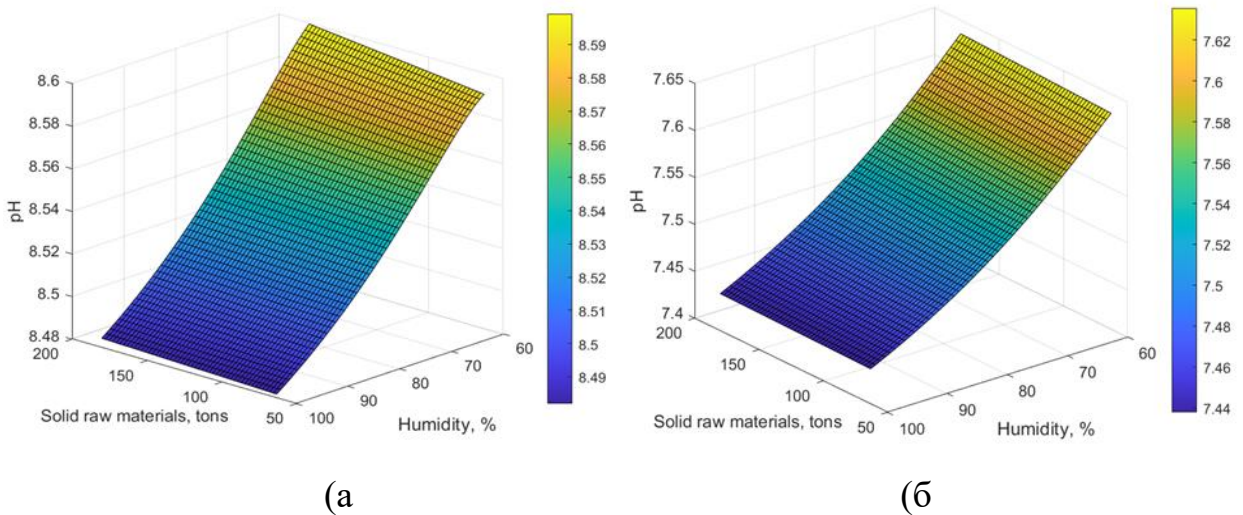


Рис. 6.6. Вплив рівня завантаження сировини твердої фракції та вологості середовища на рівень рН середовища: (а – мінімальне добове завантаження сухої фракції, (б – максимальне добове завантаження сухої фракції)

В той же час, рівень кислотності в залежності від рідкої фракції демонструє стабільність процесу бродіння, окрім низької концентрації речовин рідкої фракції, що, відповідно, зменшує вологість та призводить до підвищення кислотності (рис. 6.7).

Результати дослідження комбінованого впливу структури сировини та температури на рівень рН на основі даних та моделі для серпня наведено на рис. 6.8. Збільшення температури в анаеробному процесі ферментації твердих фракцій (основний складник жом та гній ВРХ) призводить до підвищення рівня рН в межах одиниці (рис. 6.8.а). При цьому регулювання добової частки сировини твердої фракції з мінімальної до максимальної в межах вибірки за серпень дозволяє понизити рівень рН при середній температурі 47 °С з 7.9 до 6.9, тобто на одиницю (рис. 6.8.а-6.8.б).

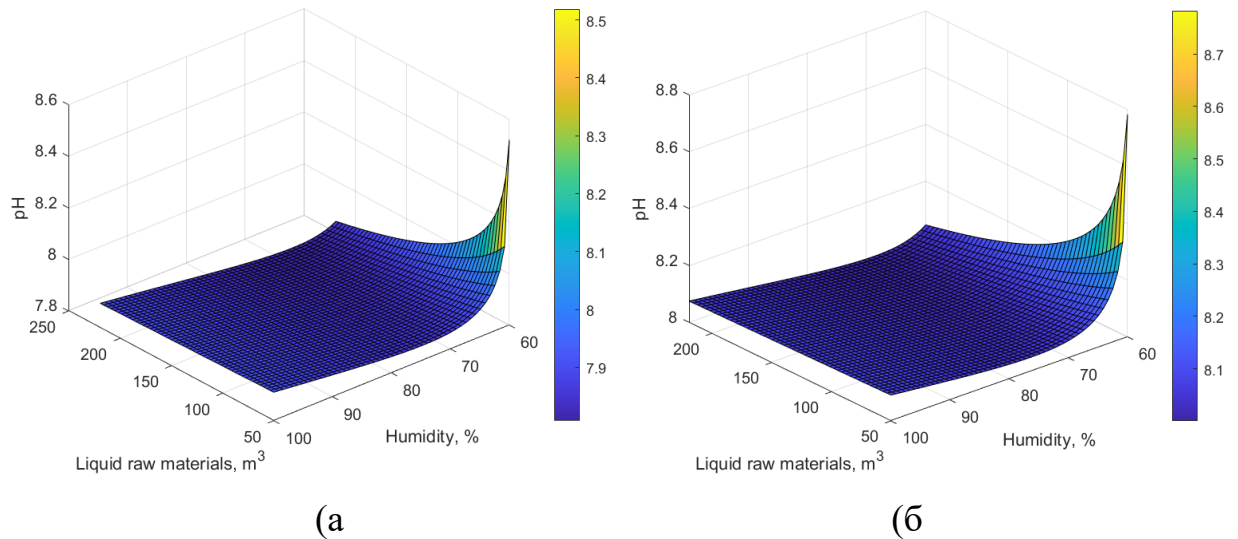


Рис. 6.7. Вплив рівня завантаження сировини рідкої фракції та вологості середовища на рівень рН середовища: (а – мінімальне добове завантаження рідкої фракції, (б – максимальне добове завантаження рідкої фракції)

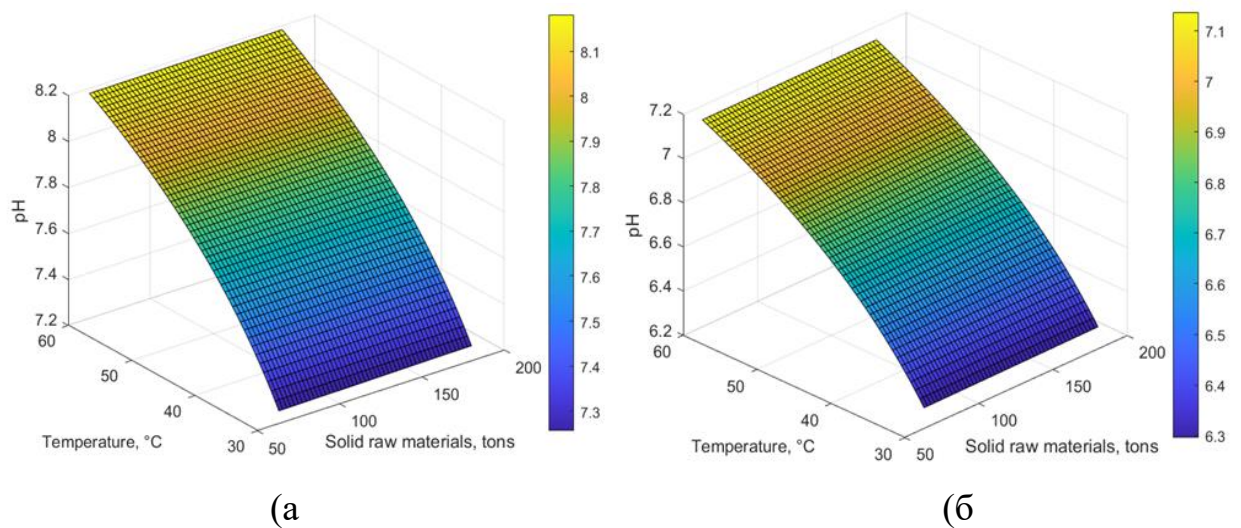


Рис. 6.8. Вплив рівня завантаження сировини твердої фракції та температури у середовища на рівень рН: (а – мінімальне добове завантаження сировини твердої фракції, (б – максимальне добове завантаження сировини твердої фракції)

Для сировини рідкої фракції (рис. 6.9) спостерігається тенденція зниження рівня рН, що на нашу думку обумовлено домінуванням в сировині рідкої барди. Оскільки, збільшення температури призводить до швидкого розкладання органічних речовин та вироблення органічних кислот. При цьому

добова частка сировини рідкої фракції в межах вибірки за серпень має незначний вплив на рівень рН (6.7 од). Різниця між мінімальним та максимальним добовим завантаженням сировини рідкої фракції при середньому добовому завантаженні твердих фракцій складає 0.2 одиниці (рис. 6.9.а-6.9.б). Для покращення балансу в структурі сировини рекомендовано збільшувати частку сечівки.

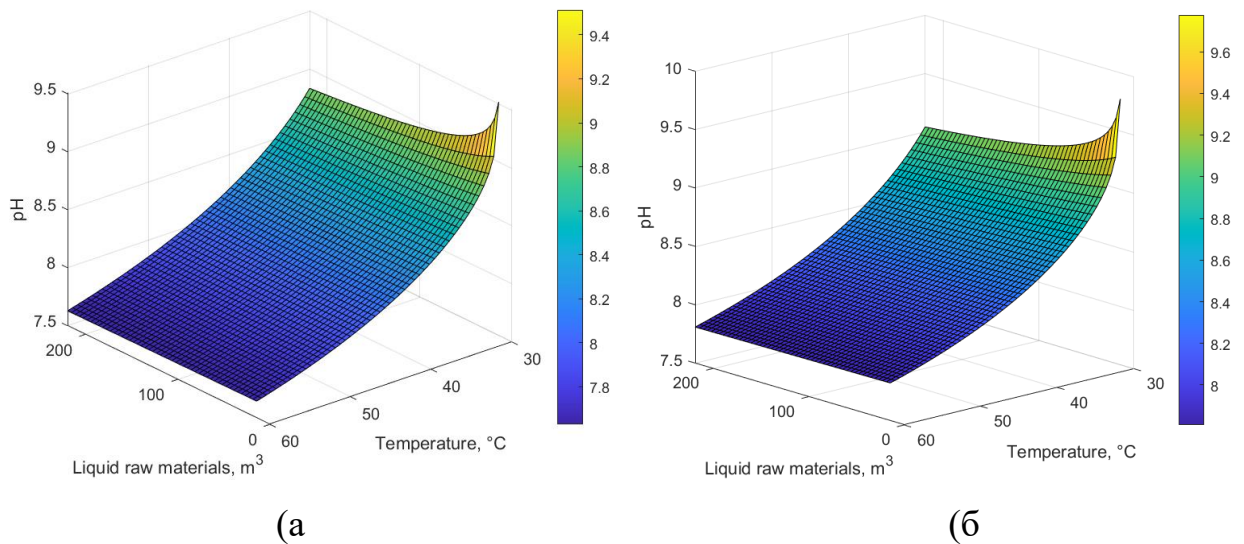


Рис. 6.9. Вплив рівня завантаження сировини рідкої фракції та температури у середовища на рівень рН: (а – мінімальне добове завантаження сировини рідкої фракції, (б – максимальне добове завантаження сировини рідкої фракції)

Отже, проведені дослідження процесів функціонування БГУ стосуються розробки математичних моделей та їх комп'ютерної реалізації, які встановлюють залежність рН середовища від обсягів та структури сировини для добового завантаження, а також робочих параметрів температури та вологості на підставі інтервального аналізу експериментальних даних, отриманих під час. В процесі досліджень на основі розроблених інтервальних моделей встановлено, що цей показник залежить від обсягу та структури сировини, а також від температури та вологості субстрату у біореакторі. Для побудови цих математичних моделей було використано метод ідентифікації параметрів моделі на основі багатовимірної оптимізації, який розроблений та удосконалений у п. 2.3-2.4. На цих підставах, вперше, отримано інтервальні

моделі, з гарантованими прогностичними властивостями, які характеризують рН-середовище в залежності від конкретного виду сировини твердої та рідкої фракції, температури та вологості субстрату. Прогностичні властивості отриманих моделей характеризуються точністю в межах похибки експериментальних даних, яка не перевищує 1%. Отримані математичні моделі є алгебричними нелінійними рівняннями (з точки зору задачі ідентифікації параметрів), які можна застосувати для визначення оптимальних обсягів у період завантаження сировини кожного виду, в залежності від вологості та температури багатокомпонентного субстрату в біореакторі.

Варто зауважити, що на підставі отриманих моделей проведено аналіз залежності рН-середовища від чинників, які характеризують склад сировини та технологічні параметри. Проведені експерименти показали 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 уможлиблює контроль значенням рН-середовища в оптимальних межах (6,5-8,5) та забезпечує стабільність процесу бродіння.

Також результати досліджень показали наявність у моделі елемента, що відображає співвідношення сухої та рідкої фракції компонентів сировини. У моделях (6.2)-(6.7) таке співвідношення описує структуру сировини з різних компонентів для наведених експериментів. Це означає, що запропонована модель є універсальною для будь-якого типу біореакторів із використанням багатокомпонентного субстрату та вимагає лише ідентифікації параметрів на основі вибірки даних, що описує технологічний процес та складники сировини.

6.2. Дослідження ефективності удосконаленого методу ідентифікації з додатковим критерієм зупинки обчислювальної процедури

В ході проведення експериментів та побудови моделей також проводилася оцінка ефективності методу параметричної ідентифікації на основі використання запропонованого додаткового критерію зупинки, представленого у п. 2.4. Розглянемо детально проведені дослідження на прикладі моделі (6.1), яка описує залежність рН середовища у ферментаторі біогазової установки під час експериментів в грудні місяці (табл. 6.6):

Модель містить десять параметрів та кількість спостережень, які використовувалися для оптимізації параметрів рівна 15. Відповідно, розмірність оптимізаційної задачі: $m = 10, N = 15$. Для чисельних експериментів використовували розроблене програмне середовище. Оптимізація проводилася на основі алгоритму внутрішньої точки (інтегрована функція `fmincon` Global Optimization Toolbox).

Для проведення експериментів використали такі налаштування критеріїв зупинки ітерацій оптимізації:

$$FunctionTolerance = 1 \cdot 10^{-6},$$

$$StepTolerance = 1 \cdot 10^{-6},$$

$$OptimalityTolerance = 1 \cdot 10^{-6},$$

$$MaxFunctionEvaluations = Inf,$$

$$MaxIterations = Inf.$$

Для всіх моделей проводилася ідентифікація параметрів без використання запропонованого критерію зупинки та із критерієм у вигляді (2.1). В обох випадках оптимізація була успішна. Результати оптимізації для обох випадків у вигляді вектора оцінок параметрів $\vec{\beta}$ нелінійної моделі (6.1), вектора оцінок коефіцієнтів $\vec{\alpha}$ та значення цільової функції $\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha})$:

- без використання запропонованого критерію:

$$\vec{\beta} = (8.1100, 3.6311, 36.8214, -11.4062, 1.7083, -4.5979, 9.9481, \\ -3.1739, 9.8767, -5.2053),$$

$$\vec{\alpha} = (0.3427, 0.6412, 0.2031, 0.1449, 0.9460, 0.0922, 0.4590, 0.6130, 0.0499, \\ 0.3719, 0.7066, 0.1488, 0.7669, 0.2686, 0.9616),$$

$$\delta(\vec{\beta}, \vec{\alpha}) = 6.7824 \cdot 10^{-10} \text{ (рис. 6.10.а),}$$

- із використанням запропонованого критерію:

$$\vec{\beta} = (8.0890, 1.4325, 16.8102, 10.3792, 1.1376, 10.3597, 9.9824, \\ -1.8025, 9.9621, -2.4172),$$

$$\hat{\alpha} = (0.4523, 0.9213, 0.2996, 0.1801, 0.9481, 0.1460, 0.0566, 0.6606, 0.0395, \\ 0.4357, 0.6355, 0.1024, 0.7166, 0.3123, 0.9588),$$

$$\delta(\vec{\beta}, \hat{\alpha}) = 2.0645 \cdot 10^{-4} \text{ (рис. 6.10.б).}$$

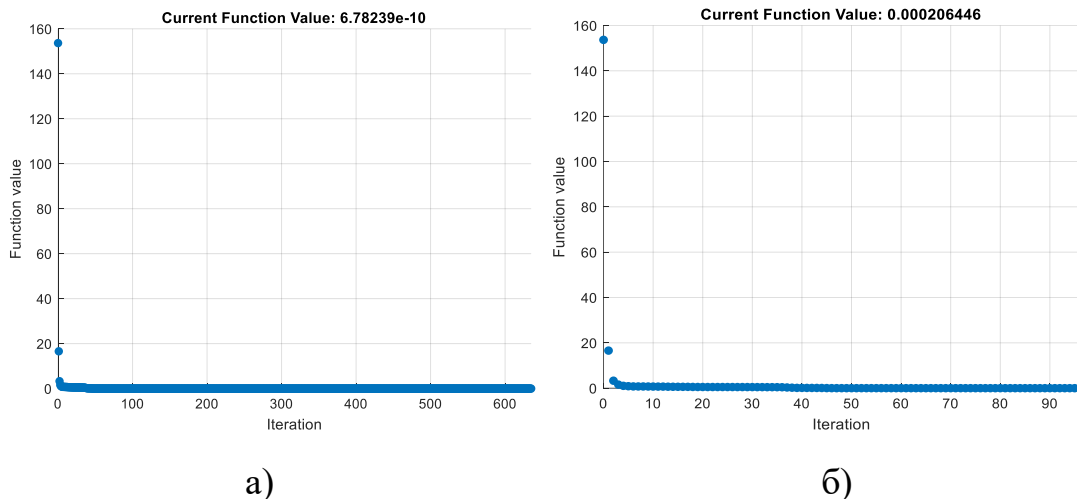


Рис. 6.10. Значення цільової функції в ході оптимізації: а) – на основі стандартних стоп-критеріїв, б) – із використанням запропонованого стоп-критерію

Проаналізуємо результати оптимізації з точки зору кількості ітерацій. На рисунку 6.11 наведено кількість обчислень значення цільової функції на кожній ітерації в ході оптимізації та їх загальна кількість.

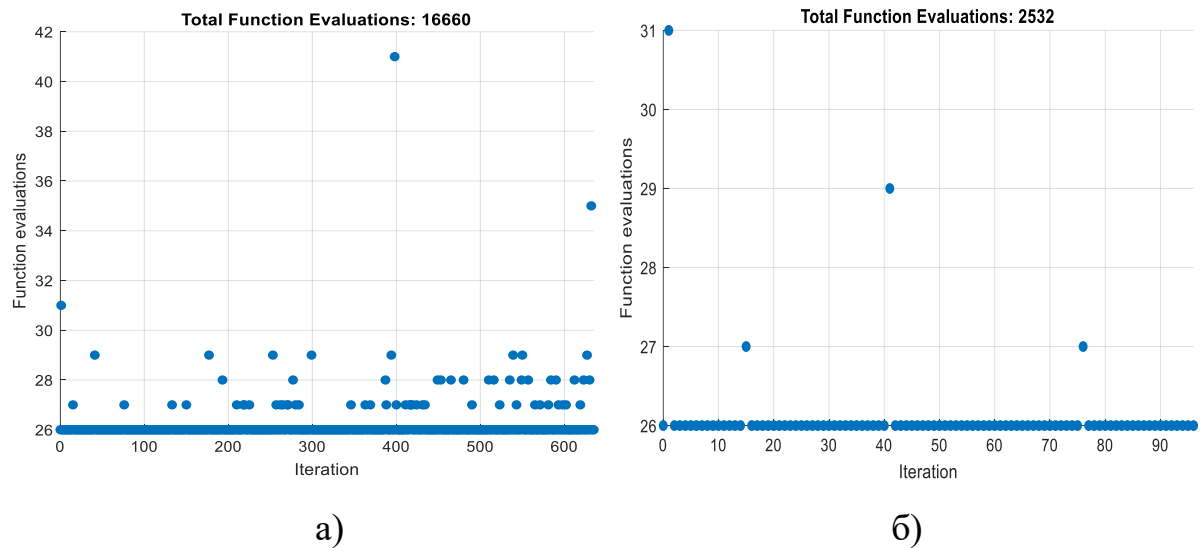


Рис. 6.11. Кількість ітерацій та обчислень значення цільової функції в ході оптимізації: а) – на основі стандартних стоп-критеріїв ($k = 635$), б) – на основі запропонованого стоп-критерію ($k = 96$)

Як бачимо з рисунку 6.11, кількість ітерацій та обчислень значення цільової функції в ході оптимізації на основі стандартних стоп-критеріїв складала: $k = 635$ (рис. 6.11.а), а на основі додаткового запропонованого стоп-критерію – $k = 96$ (рис. 6.11.б).

Отже, використання запропонованого критерію зупинки дало змогу зменшити кількість ітерацій в ході оптимізації у 6.6 разів. З точки зору оцінки складності у вигляді кількості обчислень цільової функції, то спостерігається таке ж співвідношення $16660/2532 = 6.58$ зменшення обчислювальної складності.

Варто також відзначити, що в обох випадках отримані інтервальні моделі мають «гарантовані» прогностичні властивості та відображають властивості статичної системи із заданою точністю. Моделі є адекватними, що означає належність змодельованих значень до числових інтервалів, отриманих експериментально, що проілюстровано на рисунку 6.12.

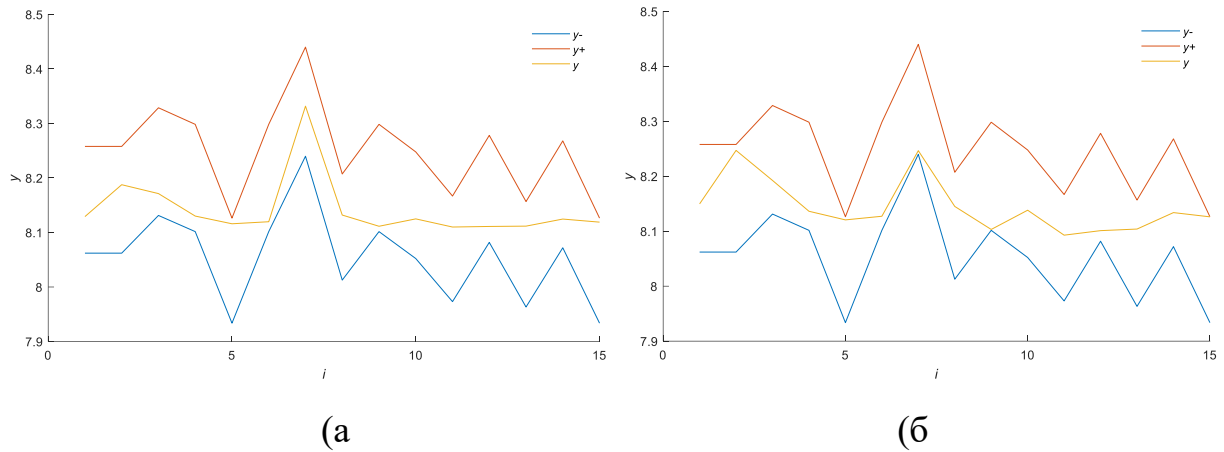


Рис. 6.12. Графіки значень на основі моделі та інтервальні значення вимірювань: а) – на основі стандартних стоп-критеріїв, б) – із використанням запропонованого додаткового стоп-критерію

В цілому, на основі проведених експериментів встановлено, що використання запропонованого критерію для розглянутого прикладу уможливило зменшення кількості ітерацій у 4,5 разів, що є співрозмірним такому ж зменшенню кількості обчислень цільової функції (табл. 6.7).

Враховуючи отримані експериментально результати можна стверджувати, що використання запропонованого критерію на основі виразу (2.1) в задачах параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем забезпечує зниження обчислювальної складності. При цьому отримані нелінійні моделі мають гарантовані прогностичні властивості та відображають властивості характеристики статичних систем із заданою точністю. Асимптотичні оцінки складності методу параметричної ідентифікації із врахуванням підтверженої експериментально ефективності наведено на рис. 6.13.

Слід відмітити також, що отримані результати мають важливе значення для задач структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей, де підбір структури моделі відбувається на основі оцінки параметрів моделей-претендентів.

Результати проведення чисельних експериментів

Кількість експериментів	Розмірність задачі оптимізації		Середнє значення k		Ефективність, $\frac{k_{st_cr}}{k_{new_cr}}$
			стандартні стоп-критерії, k_{st_cr}	із стоп-критерієм на основі умови (2.1), k_{new_cr}	
	m	N			
50	10	15	16342	2302	7,1
50	10	50	25784	4159	6,2
50	10	100	37632	6969	5,4
50	20	50	28743	6387	4,5
50	20	100	41674	10967	3,8
50	30	50	31738	15113	2,1
50	30	100	48287	20120	2,4
Ефективність в цілому					4,5

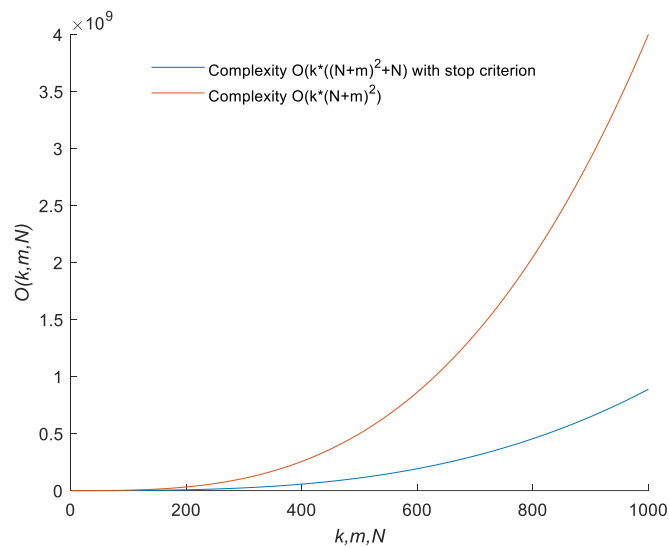


Рис. 6.13. Обчислювальна складність методу параметричної ідентифікації на основі запропонованого додаткового критерію зупинки

6.3. Інтервальні моделі для підтримки прийняття рішень в декарбонізації промислових об'єктів та транспортної інфраструктури

Декарбонізація – це процес зменшення кількості викидів вуглекислого газу (CO₂) та інших парникових газів у атмосферу, що утворюються в результаті людської діяльності, особливо у промисловості, транспорті та енергетиці. Головною метою декарбонізації є зниження впливу на зміну клімату шляхом переходу до більш екологічно чистих та стійких джерел енергії та технологій [240].

Процес декарбонізації ґрунтується на заходах, які спрямовані на використання відновлюваних джерел енергії, підвищення енергоефективності у виробництві, транспорті, будівництві та інших галузях, розвиток низьковуглецевих технологій, зменшення викидів у транспортному секторі, забезпечення стійкого землекористування.

Інтервальні моделі є важливим інструментом у декарбонізації, особливо для підтримки прийняття рішень на основі моніторингу викидів парникових газів у промисловості та для використання низьковуглецевих матеріалів у будівництві, зокрема і транспортної інфраструктури. Ці моделі уможливають встановлення причинно-наслідкових зв'язків між факторами, які формують умови та середовище функціонування об'єктів декарбонізації та їх характеристиками враховуючи невизначеність, що є важливим для аналізу та прийняття рішень. Розглянемо побудову інтервальної моделі розподілу фонового рівня промислового забруднення від точкового джерела (труби підприємства).

6.3.1. Моделювання фонового рівня поширення шкідливих викидів від точкового джерела забруднення

Моделювання фонового рівня поширення шкідливих викидів від джерела забруднення є важливим інструментом для оцінки впливу

забруднення на навколишнє середовище та здоров'я людей. Основні кроки моделювання включають:

- визначення джерела забруднення – це може бути промисловий завод, транспортні засоби, енергетичні установки або будь-яке інше джерело викидів;
- визначення характеристики забруднення – це включає в себе типи забруднюючих речовин, обсяги викидів, температуру, швидкість та інші параметри;
- врахування метеорологічних умов – це ані про вітер, температуру повітря, вологість та інші метеорологічні умови необхідні для визначення шляху поширення забруднення.

На рисунку 6.14 наведено принцип формування фонового рівня (Ground Level) забруднення шкідливими викидами оксиду сірки SO на основі поширення шлейфу забруднень (Plume Centerline) від джерела забруднення, яким є труба промислового об'єкта, за умов сухої погоди.

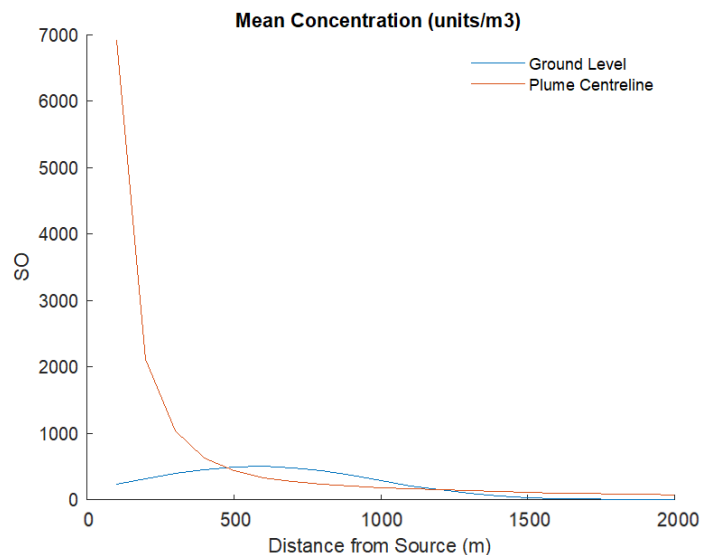


Рис. 6.14. Ілюстрація формування фонового рівня на основі шлейфу поширення забруднення від джерела в умовах сухої погоди

Суха погода забезпечує осідання шкідливих речовин вздовж шлейфу поширення. Оскільки, висока вологість спричинює високий рівень флуктуації

SO, для інших погодних умов формування фонового рівня буде мати інший характер.

В якості досліджуваного об'єкта розглянуто промисловий об'єкт та експериментальні дані вимірювань (табл. 6.8) з проекту досліджень Cambridge Environmental Research Consultants (CERC), компанії, яка спеціалізується на програмному забезпеченні та послугах з охорони довкілля в галузях моделювання якості повітря та поширення забруднення в атмосфері [27].

Таблиця 6.8.

Дані вимірювання концентрації фонового забруднення

Номер точки вимірювання	Відстань, m	Нижня межа вимірювання SO,	Верхня межа вимірювання SO,
1	100	2.5803	3.1537
2	200	247.86	302.94
3	300	528.93	646.47
4	400	569.79	696.41
5	500	510.57	624.03
6	600	432.63	528.77
7	700	361.62	441.98
8	800	302.94	370.26
9	900	255.96	312.84
10	1000	218.52	267.08
11	1100	188.55	230.45
12	1200	164.34	200.86
13	1300	144.72	176.88
14	1400	128.52	157.08
15	1500	115.02	140.58
16	1600	103.68	126.72
17	1700	94.05	114.95
18	1800	85.86	104.94
19	1900	78.804	96.316
20	2000	72.684	88.836

В даному випадку специфіка задачі обумовлює використання структурних елементів у вигляді гаусових моделей, оскільки вони класично

використовуються для моделювання поширення промислового забруднення від точкового джерела [100, 101].

Відповідно задача структурної ідентифікації зводиться до нарощування кількості структурних елементів в межах заданого типу. Сформована множина усіх потенційних структурних елементів для моделі у цьому випадку буде мати вигляд:

$$\lambda_s = \left\{ \left(e \left[-\left(\frac{x_1 - \beta}{\beta} \right)^2 \right] \right)_k \right\}, k = 1, \dots, s. \quad (6.8)$$

В ході нарощування структури та параметричної ідентифікації отримали структуру, яка задовольнила критерій зупинки (2.1):

$$y(X) = \beta_1 \cdot e \left[-\left(\frac{x_1 - \beta_2}{\beta_3} \right)^2 \right] + \beta_4 \cdot e \left[-\left(\frac{x_1 - \beta_5}{\beta_6} \right)^2 \right] + \beta_7 \cdot e \left[-\left(\frac{x_1 - \beta_8}{\beta_9} \right)^2 \right] \quad (6.9)$$

та результати параметричної ідентифікації для отриманої моделі:

$$\hat{\beta} = (419.8273, 57.4029, 692.11, 5.751 \cdot 10^{16}, -70379.1, 12357.3, \\ -874.7416, 66.9348, 176.0167)$$

$$\hat{\alpha} = (0.7837, 0.9396, 0.4033, 0.4695, 0.5511, 0.669, 0.7674, 0.8013, \\ 0.7657, 0.6824, .5777, 0.4751, 0.3848, 0.3165, 0.2645, 0.2203, 0.1812, \\ 0.1323, 0.0737, 0.0014)$$

Відповідно одержано інтервальну модель на основі інтервальних даних та структури (6.9) у такому вигляді:

$$y(X) = 419.8273 \cdot e \left[-\left(\frac{x_1 - 57.4029}{692.11} \right)^2 \right] + 5.751 \cdot 10^{16} \cdot e \left[-\left(\frac{x_1 + 70379.1}{12357.3} \right)^2 \right] - \\ -874.7416 \cdot e \left[-\left(\frac{x_1 - 66.9348}{176.0167} \right)^2 \right]. \quad (6.10)$$

Ілюстрація виконання умови (2.1) для отриманої моделі, тобто включення прогнозованих на основі моделі (6.10) значень у експериментальний коридор, що отриманий на основі вимірювань наведено на рис. 6.15.а. Збіжність значення цільової функції в ході ідентифікації моделі (6.11) наведено на рис. 6.15.б.

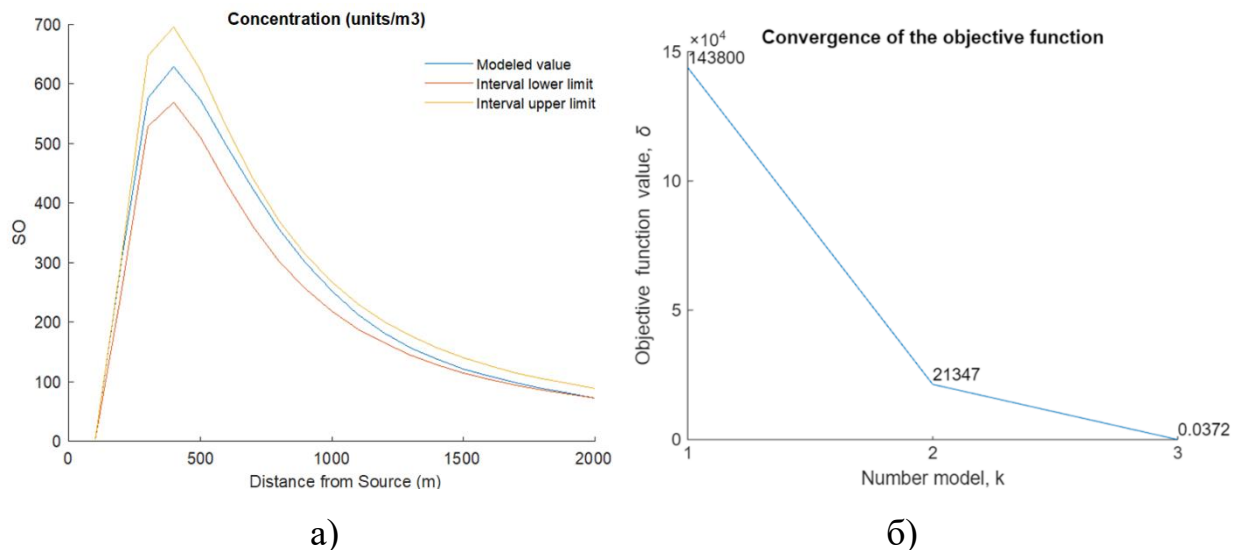


Рис. 6.15. Результати ідентифікації інтервальної моделі розподілу концентрації фоновому рівня промислового забруднення: а) ілюстрація виконання умови (2.1) для отриманої моделі, б) збіжність значення цільової функції в ході ідентифікації моделі (6.11)

Зазвичай, моделі такого типу використовуються для побудови розподілу концентрацій шкідливих викидів. Для точкового джерела забруднення побудуємо розподіл концентрацій в околі точки джерела забруднення згідно радіусу проведення експериментальних вимірювань рис. 6.16.а.

Для зручності використання побудуємо 2D-проекцію розподілу концентрації фоновому рівня в околі джерела забруднення.

Відповідно, отриманий розподіл концентрацій фоновому рівня забруднення навколо промислового об'єкта, може слугувати інструментом для підтримки рішень щодо забезпечення екологічної безпеки в місцях розташування таких об'єктів.

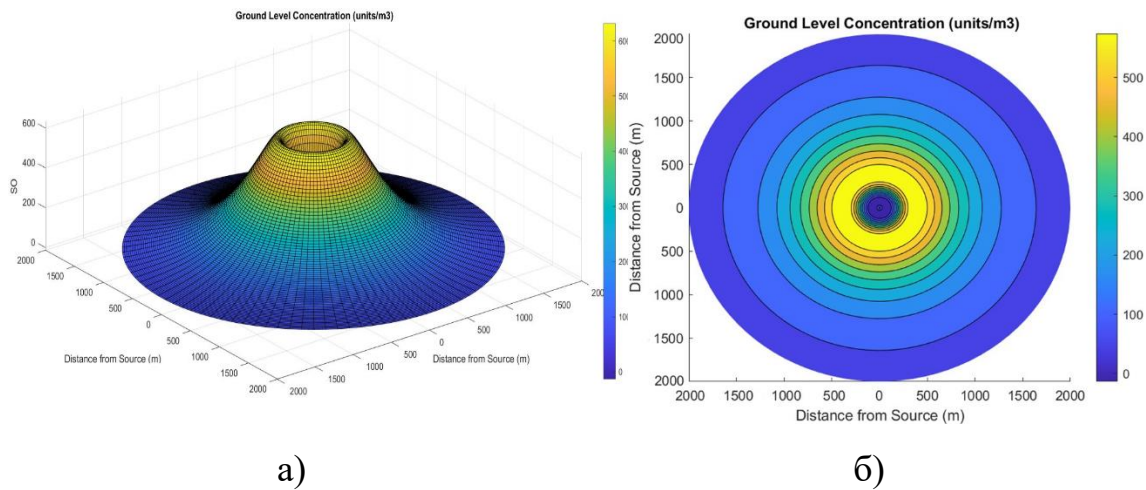


Рис. 6.16. Розподіл модельованої концентрації фонового рівня промислового забруднення в околі джерела забруднення

6.3.2. Ідентифікація залежності обсягів будівництва транспортної інфраструктури від використання низьковуглецевих матеріалів

Війна росії проти України продовжується, щодня збільшуючи кількість зруйнованої інфраструктури та житлових будівель, замінованих територій і пошкоджених природних екосистем. Інфраструктура вимагатиме масштабного відновлення та реконструкції, що неминуче призведе до збільшення викидів від будівельних робіт та функціонування нових підприємств. Крім того, розчищення та розмінування територій потребуватиме додаткових ресурсів та енергії, що також вносить свій внесок у загальний обсяг викидів.

Зростаюча потреба в будівництві та реконструкції транспортної інфраструктури внаслідок руйнування під час війни вимагає раціонального використання ресурсів і впровадження інноваційних матеріалів. Крім цього, в контексті сучасних глобальних викликів, пов'язаних зі зміною клімату та необхідністю зниження вуглецевого сліду, будівництво транспортних споруд з використанням низьковуглецевих матеріалів набуває особливого значення. Ефективне управління матеріальними ресурсами (низьковуглецевими матеріалами) в такому будівництві вимагає глибокого розуміння причинно-

наслідкових зв'язків між ключовими факторами і показниками, які характеризують ефективність такого управління.

Перехід до низьковуглецевого розвитку у будівництві розглядається у розрізі організації виробничих процесів, технологічних та екологічних аспектів використання будівельних матеріалів, нами в праці [146] досліджено вплив факторів, що характеризують використання низьковуглецевих матеріальних ресурсів на основні показники ефективності діяльності будівельного підприємства. Зокрема, запропоновано враховувати такий показник, як обсяг побудованої транспортної інфраструктури з низьковуглецевих будівельних матеріалів. Показник обсягу побудованої транспортної інфраструктури може формуватися на основі різних факторів та показників. Зростання цін на будівельні матеріали може підвищити вартість будівництва транспортних споруд та вплинути на обсяг виконаної продукції. Вартість будівництва може бути чутливою до змін у цінах на ключові низьковуглецеві будівельні матеріали, такі як скло, сталь, асфальт тощо. Зміни в індексах цін на роботи, які враховують зміни у вартості праці та послуг будівництва, можуть також впливати на вартість будівництва. Використання більш ефективних (низьковуглецевих) технологій та методів може допомогти зменшити вплив зростання цін на матеріали та роботи на кількість відходів.

Ефективніше використання низьковуглецевих матеріалів може знизити вартість та кількість відходів при будівництві. Тому доцільно дослідити залежність обсягу побудованої транспортної інфраструктури, зокрема у сфері транспортних споруд та наведених факторів (табл. 6.9).

Такий підхід уможливить розроблення рекомендацій для ефективної декарбонізації об'єктів інфраструктури на основі використання низьковуглецевих матеріалів.

Введемо позначення факторів та модельованого показника:

$x_{i,1}$ – середня ціна на асфальтобетонну суміш, грн/т;

$x_{i,2}$ – індекс ціни на будівельно-монтажні роботи, %;

$x_{i,3}$ – мінеральні відходи будівництва та знесення об'єктів, тис. т;

y_i – обсяг побудованої транспортної інфраструктури (транспортні споруди), млн. грн, $i = \overline{1,7}$.

Таблиця 6.9

Вхідні дані для ідентифікації

Рік	Середня ціна на асфальто-бетонну суміш, грн/т	Індекс ціни на будівельно-монтажні роботи, %	Мінеральні відходи будівництва та знесення об'єктів, тис. т	Обсяг виробленої будівельної продукції (транспортні споруди), млн.грн
2015	2421	121,9	897,5	[6509.61; 7956.19]
2016	2154,94	110,2	935,8	[8837.549; 10801.45]
2017	2386,92	116,3	974,1	[17100.9; 2.0901.1]
2018	3110,17	125,4	1023,1	[24685.47; 30171.13]
2019	3417,95	103,3	919,4	[30179.16; 36885.64]
2020	3467,84	103,5	873,2	[60740.1; 74237.89]
2021	3731,96	139,4	827	[79911.36; 97669.44]

Було сформовано допустиму множину структурних елементів для моделі залежності обсягу побудованих транспортних споруд від факторів на основі нелінійних структурних елементів у вигляді показникових функцій:

$$\lambda_s = \left\{ \begin{array}{l} \beta_1 \cdot x_1, \beta_1 \cdot x_2, \beta_1 \cdot x_3, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_3^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1 \cdot x_3^{\beta_2}, \\ \beta_1 \cdot x_2 \cdot x_3^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2} \cdot x_2^{\beta_3}, \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2} \cdot x_3^{\beta_3} \end{array} \right\}$$

Із використанням методів структурної та параметричної ідентифікації отримано таку структуру інтервальної моделі залежності модельованого показника від факторів використання низьковуглецевих матеріалів:

$$\lambda_s = \{ \beta_1 \cdot x_1^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_2^{\beta_2}, \beta_1 \cdot x_3^{\beta_2} \},$$

та оцінки параметрів для отриманої моделі

$$\hat{\beta} = (3.6368e + 04, 0.1447, 1.6216, 0.8526, 2.0465, -69.3625, 1.0370).$$

Відповідно, побудовано залежність на основі інтервальних даних та структури у такому вигляді:

$$y(X) = 3.6368 \cdot 10^4 + 0.1447 \cdot x_1^{1.6216} + 0.8526 \cdot x_2^{2.0465} - 69.3625 \cdot x_3^{1.0370}. \quad (6.11)$$

За результатами моделювання та верифікації отримане нелінійне алгебраїчне рівняння (6.11) адекватно відображає залежність обсягу побудованої транспортної інфраструктури України та факторів використання низьковуглецевих матеріалів будівельними підприємствами (рис. 6.17).

Практична цінність отриманих результатів для декарбонізації транспортної інфраструктури полягає у обґрунтуванні залежності обсягу від використання низьковуглецевих матеріальних ресурсів.

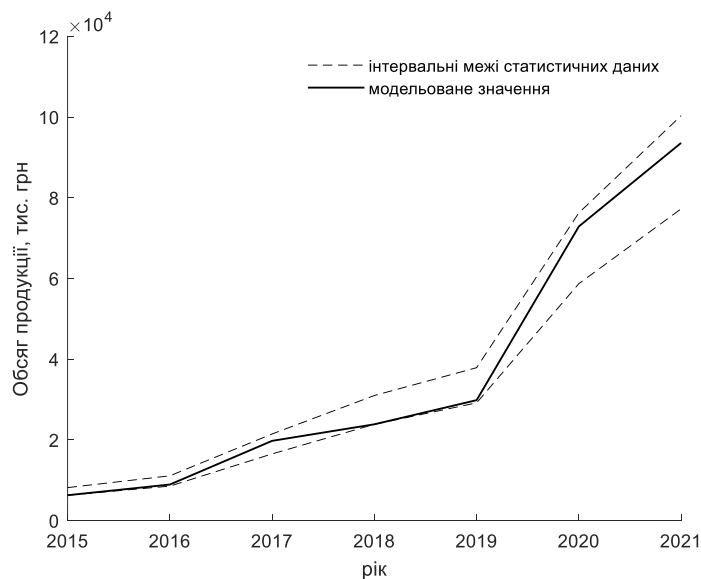


Рис. 6.17. Ілюстрація виконання умови (2.1) для побудованої моделі

Це доводить, що впровадження нових технологій дозволяє знизити витрати на будівництво, підвищуючи ефективність декарбонізації, оскільки ефективне використання матеріалів зменшує кількість відходів, що знижує вартість будівництва та підвищує обсяг продукції.

Висновки до розділу 6

1. 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 методи ідентифікації інтервальних моделей на основі онтологічного підходу.

2. Вперше побудовано інтервальні моделі залежності рН-середовища від чинників, які характеризують склад сировини та технологічні параметри для реакторів першого етапу 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.

3. Проведено чисельні експерименти для дослідження удосконаленого в п.2.4. методу параметричної ідентифікації з використанням додаткового критерію зупинки у вигляді умов (2.1) на основі нелінійних моделей залежності рН середовища у ферментаторі біореактора першого етапу біогазової установки від факторів впливу. Встановлено, що запропонований критерій зменшує кількість ітерацій у 4,5 рази, що є пропорційним такому ж зменшенню кількості обчислень цільової функції.

4. Побудовано інтервальну модель поширення промислового забруднення від точкового джерела, яка за рахунок застосування методів структурної ідентифікації на основі нарощування структурних елементів в

базисі гаусових моделей та параметричної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей, уможливорює спрощення процедури побудови розподілу концентрацій фонового рівня забруднення навколо промислового об'єкта та може слугувати інструментарієм для підтримки рішень щодо декарбонізації таких об'єктів.

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

ВИСНОВКИ

У представленій дисертаційній роботі вирішується науково-прикладна проблема зниження обчислювальної складності процедур реалізації методів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками шляхом формування нового комплексного підходу до ідентифікації таких математичних моделей, який ґрунтується на поєднанні знань у вигляді онтологічного опису предметної області теоретичних засад ідентифікації цих моделей, методів аналізу інтервальних даних та гібридних методів, які поєднують ефективні стратегії глобальної та локальної оптимізації.

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 інтероперабельністю 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 уможлиблює 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 бджолоїної 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 ефективно 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 уможлиблює 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 уможлиблює ефективне управління декарбонізацією транспортної інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abraham A., Jatoth RK., Rajasekhar A. Hybrid differential artificial bee colony algorithm. *J. Comput. Theor. Nanosci.* 2012. Vol. 9(2). P.249–257.
2. Abstract book of the First World Congress of Neural Monitoring in Thyroid and Parathyroid Surgery. Krakow, Poland. 2015. 161 p.
3. Akay B., Karaboga D. A survey on the applications of artificial bee colony in signal, image, and video processing. *Signal Image Video Process.* 2015. Vol. 9(4). P. 967–990.
4. Akay B., Karaboga D., Gorkemli B., and Kaya E. A survey on the artificial bee colony algorithm variants for binary, integer and mixed integer programming problems, *Appl. Soft Comput.*, 106, 107351, 2021. [CrossRef]
5. Alefeld G., Herzberger J. Introduction to interval computations. *Computer Science and Applied Mathematics.* Academic Press, Inc. [Harcourt Brace Jovanovich, Publishers]. – New York, 1983.
6. Alefeld G., Mayer G. Interval analysis: theory and applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics.* – 2000. – № 121. – P. 421-464.
7. Alshattnawi S., Afifi L., Shatnawi A.M., and Barhoush M.M. Utilizing Genetic Algorithm and Artificial Bee Colony Algorithm to Extend the WSN Lifetime, *Int. J. Comput.*, no. 21, pp. 25-31, 2022. [CrossRef]
8. Anastasakis L., Neil Mort N. The development of self-organization techniques in modelling: a review of the group method of data handling (GMDH)”. *ACSE Research Report.* 2001. 39 p.
9. Anders Forsgren, Philip E. Gill, Margaret H. Wright, Interior methods for nonlinear optimization, *SIAM review*, 44.4, pp. 525-597, 2002.
10. Banerjee P. A MATLAB compiler for distributed, heterogeneous, reconfigurable computing systems. *Proceedings 2000 IEEE Symposium on Field Programmable Custom Computing Machines.* – Napa Valley, 2000. – P. 39-48.
11. Beck A. Introduction to nonlinear optimization: Theory, algorithms, and applications with MATLAB, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2014.

12. Belfadel A., Amdouni E., Laval J., Cherifi C., Moalla N. Ontology-based software capability container for RESTful APIs. *9th IEEE International Conference on Intelligent Systems (IS 2018)*. Sep. 2018. Madeira, Portugal. P. 466-473.
13. Bertalanffy L. *General System Theory: Foundations*. New York: George Braziller: Development, Applications. – 296 p.
14. Betarte G., Giménez E. Martínez R., Álvaro P. Machine learning-assisted virtual patching of web applications. arXiv 2018, arXiv:cs.CR/1803.05529.
15. Blum Ch. *Hybrid Metaheuristics. An Emerging Approach to Optimization* / Ch. Blum, M.J.B. Aguilera, A. Roli. – Berlin: SpringerVerlag, 2008. – 289 p.
16. 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.
17. 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, 7841. <https://doi.org/10.3390/en15217841> (SJR Q1, Scopus)
18. Boukraâ, D., Boussaïd, O., Bentayeb, F. OLAP Operators for Complex Object. *Advances in Databases and Information Systems*. 2010. P. 103-116.
19. 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.
20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Burek P. Towards a modern ontology development environment. *Procedia Computer Science*. 2020. P. 176.

25. Calderón-Gómez, Huriviades, Luis Mendoza-Pittí, Miguel Vargas-Lombardo, José Manuel Gómez-Pulido, Diego Rodríguez-Puyol, Gloria Senci3n, and Marí3a-Luz Polo-Luque. Evaluating Service-Oriented and Microservice Architecture Patterns to Deploy eHealth Applications in Cloud Computing Environment. *Applied Sciences*. 2021. 11, no. 10: 4350. <https://doi.org/10.3390/app11104350>

26. Camazine S., Sneyd J. ABCA A model of collective nectar source by honey bees: Self-organization through simple rules. *Journal of Theoretical Biology*. – 1991. – № 149. – P. 547-571.

27. Cambridge environmental research consultants, environmental software and services, <https://www.cerc.co.uk/environmental-research.html>

28. Ceri S., Fraternali P., Matera M. Conceptual modeling of data-intensive web applications. *IEEE Internet Computing*. 2002. Vol.6(4). P. 20-30
29. Chai Zhengmeng and Jiang Haoxiang. A brief review on Decision Support Systems and its applications. *2011 IEEE International Symposium on IT in Medicine and Education*, 2011, pp. 401-405, doi: 10.1109/ITIME.2011.6132134.
30. Chimalakonda S., Nori K.V. An ontology based modeling framework for design of educational technologies. *Smart Learn. Environ.* 2020. Vol. 7. 28 p.
31. Christian Blum and Andrea Roli. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM Computing Surveys*, 35(3):268–308, 2003.
32. Christou I.T, Darrell W.L., De Long K., Martin W. Evolutionary algorithms. Springer-Verlag, New York. 2021. 602 p.
33. Cimiano P., Völker J. Text2Onto – a Framework for ontology learning and data-driven change discovery. *Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems (NLDB'2005)*. 2005. P. 227-238.
34. Cinar, S.; Cinar, S.O.; Wiczorek, N.; Soho, I.; Kuchta, K. Integration of Artificial Intelligence into Biogas Plant Operation. *Processes* 2021, 9, 85. <https://doi.org/10.3390/pr9010085>
35. Cunsheng Zhang, Yuxuan Sun, Tianyu Cao, Wenjuan Wang, Shuhao Huo, Ze-Hua Liu. Influence of organic load on biogas production and response of microbial community in anaerobic digestion of food waste. *International Journal of Hydrogen Energy*. Volume 47, Issue 77. 2022. Pages 32849-32860.
36. Da Silva M.A.P., Times V.C., De Araujo A.M.C., Da Silva P.C. A Microservice-Based Approach for Increasing Software Reusability in Health Applications. *In Proceedings of the 2019 IEEE/ACS 16th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 3–7 November 2019; pp. 1–8.
37. Debellis M. A Practical guide to building OWL ontologies using Protégé 5.5 and Plugins. 2021.

38. Dolzhenkov V. Software tools for ontology development. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2020. Vol.9. P.935-941.
39. Dubois, D., Hájek, P. & Prade, H. Knowledge-Driven versus DataDriven Logics. *Journal of Logic, Language and Information*. 2000. Vol. 9. P. 65–89.
40. Dyvak M, Porplytsya N., Pukas A., Voytyuk I., Huliiev N., Pryvrotskyy V. Artificial bee colony algorithm with modified operators of determining the profitable food sources for identification the models of atmospheric pollution by nitrogen dioxide. 2020 *10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies 'ACIT'*. Deggendorf, Germany, 2020. P. 122–125.
41. Dyvak M, Stakhiv P., Pukas A. Algorithms of parallel calculations in task of tolerance ellipsoidal estimation of interval model parameters. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*. 2012. Vol. 60, Is. 1. P. 159-164.
42. 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.
43. Dyvak M., Kasatkina N., Oliynyk I. Reduction of interval equations for interval system of linear algebraic equations. Proceedings: *13th International Conference "Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science"*. – Lviv-Slavsko, 2016. – P. 128-131.
44. Dyvak M., Kozak O., Pukas A. Interval model for identification of laryngeal nerves. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2010. Vol. 86, no. 1. P. 139-140.
45. 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.

46. 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

47. Dyvak M., Manzhula V., Melnyk A., Rusyn B., Spivak I. Modeling the Efficiency of Biogas Plants by Using an Interval Data Analysis Method. *Energies*. 202417 (14). P. 3537. <https://doi.org/10.3390/en17143537> (SJR Q2, Scopus)

48. 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.

49. 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, Tom 3302, pp. 99-107

50. Dyvak M., Maslyiak Y., Papa O., Savka N. Clustering and interval analysis of heterogeneous data sample. *Computer Sciences and Information Technologies: Proc. of the 12th Intern. Sci. and Tech. Conf. (CSIT'2017)*. Vol. 1. 2017. P. 528-532.

51. Dyvak M., Melnyk A., Kopnický M., Dostalek L., Krytskyi I., Dyvak A. Using an ontological approach for improvement of the interval model in the problem of the recurrent laryngeal nerve identification during thyroid surgery. CEUR-WS. 2021. Vol. 3038. P. 317-322.

52. Dyvak M., Melnyk A., Martsenyuk Y., Rohatynska N., Brukhanskyi R., Pytel S. Evolutionary method based on artificial bee colony and ontological approach for structural identification of interval discrete models of objects with

distributed parameters. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Spisska Kapitula, Slovakia. 2022. P. 95–100.

53. 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.

54. Dyvak M., Melnyk A., Rot A., Hernes M., Pukas A. Ontology of mathematical modeling based on interval data. *Complexity*. 2022. Vol. 2022. Article Id: 8062969. P. 1–19.

55. Dyvak M., Oliinyk I., Pukas A. Design of saturated interval experiments for modeling of recurrent laryngeal nerve identification process. 2019 *9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies ‘ACIT’2019*, Ceske Budejovice, Czech Republic. Lviv, 2019. P. 29–34.

56. Dyvak M., Oliinyk I. Estimation method for a set of solutions to interval system of linear algebraic equations with optimized “saturated block” selection procedure. *Computational Problems of Electrical Engineering*. – Lviv, 2017. – V.7. – No.1. – P. 17-24.

57. Dyvak M., Oliinyk 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.

58. Dyvak M., Oliinyk I., Maslyiak Y., Pukas A. Static interval model of air pollution by motor vehicles and its identification method. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the XIVth International Conference ‘TCSET’2018*. Lviv–Slavske: Lviv Polytechnic National University, 2018. P. 859–863.

59. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Kasatkina N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with

distributed parameters and control. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*: Proceedings of the 2017 14th International Conference. Lviv, Ukraine. 21–25 February 2017. P. 50–54.

60. Dyvak M., Porplytsya N., Tymets V., Maslyiak Y. Method of structural identification of a model for recurrent laryngeal nerve localization. *Computer Sciences and Information Technologies*: Proc. of the 13th Intern. Sci. and Tech. Conf. (CSIT'2018). 2018. Vol. 1. P.470-474.

61. Dyvak M., Pukas A., Kozak O. Tolerance estimation of parameters set of models created on experimental data. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*: Proceedings of the VIII International Conference 'TCSET'2008'. Lviv–Slavsko: Lviv Polytechnic National University, 2008. P. 24–26.

62. Dyvak M., Pukas A., Manzhula V., Kasatkina N., Komar M. and Zabchuk V. The Task of Parametric Identification the Interval Models with Nonlinear Parameters, Proceedings: *12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*, Ruzomberok, Slovakia, 2022, pp. 106-111, doi: 10.1109/ACIT54803.2022.9913166.

63. 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.

64. Dyvak M., Pukas A., Melnyk A., Voytyuk I., Valchyshyn S., Romanets I. Software architecture for modeling the interval static and dynamic objects. 2021 *11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 572–575.

65. Dyvak M., Pukas A., Oliynyk I. Macromodel of dynamics of the electric power generated by small hydroelectric power station based on interval data analysis. *Computational Problems of Electrical Engineering*: Proceedings of

abstracts of the 16th International Conference ‘CPEE’2015’. Lviv, Ukraine, 2015. P. 32–35.

66. 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>. (SJQR Q2, Scopus)

67. 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. 49–612. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v40.i4.40.

68. Dyvak M., Pukas A. Identification of the static system interval models by application of optimal localization experiment. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*. Proc. of the VII Intern. Conf. – Lviv-Slavske, 2003. – P. 180-184.

69. ДУВАК М., ОЛИЙНИК І., МАНЖУЛА В. 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.

70. Edward D. Weinberger. Correlated and uncorrelated fitness landscapes and how to tell the difference. *Biological Cybernetics*, 63:325–336, 1990.

71. EEA, 2014a, Air quality in Europe – 2014 report, EEA Report No5/2014, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.

72. Ellacuriaga, M.; García-Cascallana, J.; Gómez, X. Biogas Production from Organic Wastes: Integrating Concepts of Circular Economy. *Fuels*, 2021, 2, 144-167. <https://doi.org/10.3390/fuels2020009/>

73. Eric D. Taillard, Luca Maria Gambardella, Michael Gendreau, and Jean-Yves Potvin. Adaptive memory programming: A unified view of metaheuristics.

European Journal of Operational Research, 135(1):1–16, November 6, 2001. ISSN: 0377-2217. doi:10.1016/S0377-2217(00)00268-X.

74. Falbo R., Natali A., Mian P., Bertollo G., Ruy F. B. ODE: ontology-based software development environment. *Computer Science*. 2003. P.1124-1135.

75. Farlow S. The GMDH algorithm of Ivakhnenko. *American Statistician - AMER STATIST*. 1981. Vol.35. P. 210–215.

76. Fielding R. Architectural styles and the design of network-based software architectures. University of California, Irvine. – 2000.

77. Fred Glover and Gary A. Kochenberger, editors. Handbook of Metaheuristics, volume 57 of *International Series in Operations Research & Management Science*. Kluwer Academic Publishers / Springer, New York, USA, 2003.doi:10.1007/b101874. Series Editor Frederick S. Hillier.

78. Ganji M.D., Rahmanzadeh A. Chapter 6 – Mathematical modeling and simulation. In Smart Nanocontainers; Nguyen-Tri, P., Do, T.-O., Nguyen, T.A., Eds.; *Micro and Nano Technologies*. Elsevier: Amsterdam, Netherlands. 2020. P. 89–102.

79. Garden R. W. and Engelbrecht A. P. Analysis and classification of optimisation benchmark functions and benchmark suites, in Proc. IEEE CEC, pp. 1641-1649, 2014.

80. Garlan D., Shaw M. An introduction to software architecture. *Advances in Software Engineering and Knowledge Engineering*. – Hackensack, NJ, USA: World Scientific Publishing Company, 1993. – Vol. 2. – P. 1-39.

81. Gas Market Report, Q1-2024, International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/gas-market-report-q1-2024>

82. Global Optimization Toolbox, [Online]. Available at: <https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html>.

83. Golub N., M. Potapova, and Y. Karpenko, “Mathematical Modeling of the Biogas Production Process from the Distillery Spent Wash on the First Stage”, *Innov Biosyst Bioeng*, vol. 3, no. 2, pp. 96–104, Jun. 2019.

84. Gorgorió N., Albarracín L., Ärlebäck J., Laine A., Newton R., Villarreal A. Fundamental mathematical knowledge: progressing its specification. Linköping: Linköping University Electronic Press; 2019. (LiTH-MAT-R). URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-157096>.
85. Grenon P., Smith B. Foundations of an ontology of philosophy. *Synthese*. 2011. Vol. 182. P. 185-204.
86. Guedj, Benjamin, and Bhargav Srinivasa Desikan. 2020. "Kernel-Based Ensemble Learning in Python". *Information*. 11, no. 2: 63. <https://doi.org/10.3390/info11020063>.
87. Hahn B. MATLAB for engineers and scientists / B. Hahn, T. Valentine. Academic Press. – Orlando, 2016. – 428 p.
88. Hansen E., Walster G.W. Global Optimization using Interval Analysis. Marcel Dekker, Inc. New York-Basel. 2004. P. 492
89. Hassija, V., Chamola, V., Mahapatra, A. et al. Interpreting Black-Box Models: A Review on Explainable Artificial Intelligence. *Cogn Comput*. 16, 45–74 (2024). <https://doi.org/10.1007/s12559-023-10179-8>.
90. Hill H., Blunk M., Charalambous C., Lewis J., Phelps G., Sleep L., Ball D. Mathematical knowledge for teaching and the mathematical quality of instruction: An exploratory study. *Cognition and Instruction*. 2008. Vol. 26 (4). P. 430-511.
91. Husáková M., Bureš V. Formal ontologies in information systems development: a systematic review. *Information*. 2020. Vol. 11, no. 2. P. 66.
92. Ibrahim H. Osman. An introduction to metaheuristics. In M. Lawrence and C. Wilsdon, editors, *Operational Research Tutorial Papers*, pages 92–122. Stockton Press, Hampshire, UK, 1995.
93. IT Christou, WL Darrell, K. De Long, and W. Martin, Evolutionary Algorithms, SpringerVerlag: New York, NY, USA, 2021.
94. Itziar U., Nieto M., García M., Otaegui O. Design and implementation of an ontology for semantic labeling and testing: automotive global ontology (AGO). *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 17. 7782.

95. Ivakhnenko A. Polynomial theory of complex systems. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*. 1971. Vol. 4. P. 364-378.
96. Ivakhnenko A., Ivakhnenko G. The review of problems solvable by algorithms of the group method of data handling (GMDH). *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1995. Vol.5 (4). P. 527–535.
97. Ivakhnenko A.G., Müller J.-A. Recent Developments of Self-Organising Modeling in Prediction And Analysis of Stock Market. 1997.
98. Jinzhi L., Ma J., Zheng X., Wang G., Kiritsis D. Design ontology supporting model-based systems-engineering formalisms. *Journal of Latex Class Files*. Vol. 14. No. 8, August 2015.
99. Jonas Sjöberg, Qinghua Zhang, Lennart Ljung, Albert Benveniste, Bernard Delyon, Pierre-Yves Glorennec, Håkan Hjalmarsson, Anatoli Juditsky. Nonlinear black-box modeling in system identification: a unified overview, *Automatica*. Volume 31, Issue 12. 1995. Pages 1691-1724, [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(95\)00120-8](https://doi.org/10.1016/0005-1098(95)00120-8).
100. Jorgensen B. The theory of dispersion models. – CRC Press, 1997. – P. 237.
101. Juan S. et al. An Industrial air pollution dispersion system based on Gauss dispersion model. *Environmental Pollution & Control*. 2005. Vol. 7. P.11.
102. Judea Pearl. Heuristics: Intelligent Search Strategies for Computer Problem Solving. The Addison-Wesley series in artificial intelligence. Addison-Wesley Pub (Sd), April 1984.
103. Juneau J. Java 9 Recipes: A Problem-solution approach 2017. 3rd. ed. Apress, USA
104. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: Techn. rep. – TR06. – Erciyes: Erciyes Univ. Press, 2005. – 10 p.
105. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*. – 2007. – Vol. 39. – P. 459-471.

106. Katoch S., Chauhan SS., Kumar V. A review on genetic algorithms: past, present, and future. *Multimed Tools Appl.* 2021. Vol. 80, P.8091–8126.
107. Kelley W.G., Peterson A.C. Difference equations: an introduction with applications. Academic press. 2001.
108. Keshtkar, Ali & Abolhamd, Gity & Meyssami, Behrooz & Ghaforian, Hossein. (2003). Modeling of Anaerobic Digestion of Complex Substrates. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering.* 22. 61-74.
109. Kinghtes C.D., Peters C.A. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for Monod biodegradation kinetics using bivariate data. *Biotechnology and Bioengineering.* – 2000. – Vol. 69, № 2. – P. 160–170.
110. Kohn T., Rossum G., Bucher II G., Talin, Levkivskyi I. Dynamic pattern matching with Python. 16th ACM SIGPLAN *International Symposium on Dynamic Languages (DLS 2020)*. Proceedings of the Simposium. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA. 2020. P. 85–98.
111. Komarysta, Bohdana & Dzhygyrey, Iryna & Bendiuh, Vladyslav & Yavorovska, Olha & Andreeva, Antonina & Berezenko, Kateryna & Meshcheriakova, Iryna & Vovk, Oksana & Dokshyna, Sofiia & Maidanskyi, Ivan. (2023). Optimizing biogas production using artificial neural network. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2. 53-64. 10.15587/1729-4061.2023.276431.
112. Kovarik O., Kordik P. Optimizing Models Using Continuous Ant Algorithms. *Proc. of the 2nd Int. Conf. On Inductive Modelling ICIM–2008.* – K.: IRTC ITS NANU, 2008. – P. 124–128.
113. Kulik B., Fridman A. N-Tuple algebra as a generalized theory of relations. 2021.
114. Kumar A., Negi G., Pant S., Ram M., Dimri S.C., Availability-Cost Optimization of Butter Oil Processing System by Using Nature Inspired Optimization Algorithms, *Reliab. Theory Appl.*, SI 2, 188–200, 2021.
115. Kumkov S., Mikushina Y. Interval approach to identification of parameters of experimental process model. *15th GAMM-IMACS International*

Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetics and Verified Numerics.
– 2012. p. 90-93.

116. Kuntsevich V. M., Lychak M. M. Guaranteed estimations, adaptation and robustness in control systems. – Berlin: Springer, 1992. – 209 p/

117. Kurzhanski A. Identification Theory of Guaranteed Estimates. 1989/
DOI: 10.1007/978-3-642-75007-6_4.

118. Lange C. Ontologies and languages for representing mathematical knowledge on the Semantic Web. *Semant. Web* 4. 2013. Vol. 2, P. 119–158.

119. Lange C., Kohlhase M. A Semantic Wiki for mathematical knowledge management. *Emerging Technologies for Semantic Work Environments: Techniques, Methods, and Applications*. Edited by Rech, Jörg and Björn Decker, and Eric Ras. Hershey, PA: IGI Global. 2008. P. 47-68.

120. Laskri, N. & Nedjah, Nawel. (2015). Comparative Study for Biogas Production from Different Wastes. *International Journal of Bio-Science and Bio-Technology*. 7. 39-46. 10.14257/ijbsbt.2015.7.4.05.

121. Leal Sobral, Victor Ariel, Jacob Nelson, Loza Asmare, Abdullah Mahmood, Glen Mitchell, Kwadwo Tenkorang, Conor Todd, Bradford Campbell, and Jonathan L. Goodall. 2023. "A Cloud-Based Data Storage and Visualization Tool for Smart City IoT: Flood Warning as an Example Application" *Smart Cities* 6, no. 3: 1416-1434. <https://doi.org/10.3390/smartcities6030068>

122. Lemass B. *Structured Conceptual Design: The New Frontier*. Sydney: Pearson Prentice Hall. 2004. 134 p.

123. Lendyuk T., Melnyk A., Rippa S., Golyash I., Shandruk S. Individual learning path building on knowledge-based approach. 2015 IEEE *8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*, IDAACS 2015. Warsaw, Poland. September 24–26, 2015. P. 949–954.

124. Lennart Ljung. *System Identification: Theory for the User*, Prentice Hall, 1999, 608 p.

125. Leonardo Vanneschi and Marco Tomassini. A study on fitness distance correlation and problem difficulty for genetic programming. *In Graduate Student Workshop*, GECCO Conference, pages 307–310, 2002.

126. Leonardo Vanneschi, Manuel Clergue, Philippe Collard, Marco Tomassini, and S'ébastien V'ereel. Fitness clouds and problem hardness in genetic programming. *In Genetic and Evolutionary Computation – GECCO-2004, Part II*, pages 690–701, 2004. doi:10.1007/b98645.

127. Leonardo Vanneschi, Marco Tomassini, Philippe Collard, and S'ébastien V'ereel. Negative slope coefficient. A measure to characterize genetic programming. *In Proceedings of the 9th European Conference on Genetic Programming*, pages 178–189, 2006.

128. Lepikhin A., Makhutov N. & Shokin Yurii. (2020). Probabilistic multiscale modeling of fracture in heterogeneous materials and structures. Industrial laboratory. *Diagnostics of materials*. 86. 45-54. 10.26896/1028-6861-2020-86-7-45-54.

129. Luft, Angela, Nils Luft, and Kristian Arntz. 2023. "A Basic Description Logic for Service-Oriented Architecture in Factory Planning and Operational Control in the Age of Industry 4.0". *Applied Sciences*. 13, no. 13: 7610. <https://doi.org/10.3390/app13137610>

130. M. Dyvak, O. Kozak, A. Pukas, "Interval model for identification of laryngeal nerves," *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 86, no. 1, pp. 139-140, 2010.

131. Madala H., Ivakhnenko A. Inductive learning algorithms for complex systems modeling. Boca Raton: CRC Press. 1994.

132. Mahjourian, R. An Architectural Style for Data-Driven Systems. *High Confidence Software Reuse in Large Systems*. 2008. Vol.5030. P. 14–25.

133. Manuel Clergue, Philippe Collard, Marco Tomassini, and Leonardo Vanneschi. Fitness distance correlation and problem difficulty for genetic programming. In *GECCO'02: Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 724–732, 2002.

134. 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>

135. 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.

136. Marco Dorigo, Vittorio Maniezzo, and Alberto Colomi. The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics*, 26(1):29–41, 1996.

137. Meghea I., Mihai M., Demeter T. Gauss dispersion model applied to multiple punctual sources from an industrial platform. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management*. 2013. Vol. 1. P. 497.

138. Melnyk A., Shevchuk R., Huhul O., Shcherbiak I., Shevchuk A., Franko Y. Software architecture for mathematical modelling based on interval and ontology approach. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Spisska Kapitula, Slovakia. 2022. P. 101–105.

139. Milanese M., Norton J., Piet-Lahanier H., Walter E. Bounded approaches to system identification. New-York, London: Plenum Press. 1996. 357 p.

140. Moore R.E. Interval analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 1966. 145 p.

141. Moore R.E. Methods and applications of interval analysis. Philadelphia: SIAM. 1979. 190 p.

142. Moore R.E. Reliability in computing: the role of interval methods in scientific computing. Elsevier. 2014.

143. Moreno Torres B., Völker C., Nagel S.M., Hanke T., Kruschwitz S. An ontology-based approach to enable data-driven research in the field of NDT in civil engineering. *Remote Sens.* 2021. Vol. 13, 2426.

144. Moroz O. G., Stepashko V. S., “Combinatorial algorithm of MGUA with genetic search of the model of optimal complexity,” *Proceedings of the International Conference on Intellectual Systems for Decision Making and Problems of Computational Intelligence*, 2016, pp. 297–299

145. Musen M. The protégé project. *AI Matters.* 2015. Vol. 1, P. 4-12.

146. 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). C. 575. <https://doi.org/10.3390/en17030575>. (SJQ1, Scopus)

147. Nambiar, Athira, Divyansh Mundra. An Overview of Data Warehouse and Data Lake in Modern Enterprise Data Management. *Big Data and Cognitive Computing.* 2022. Vol.6(4). P. 132.

148. Nelles. O. Nonlinear System Identification. Springer Berlin, ISBN 3-540-67369-5, 2000.

149. Nickovic S. Kallos G., Papadopoulos A., Kakaliagou O. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere. *J Geoph Res*, 2001. – №106 – P. 18113–18129.

150. Nocedal, J. and S. J. Wright, Numerical Optimization, Second Edition. Springer Series in Operations Research, Springer Verlag, 2006.

151. Önen, S. & Kuchta, K. (2020). Evaluation of temperature changes in anaerobic digestion process. *Detritus*, 10(6), 11-18.

152. Pablo Moscato. Memetic algorithms. In *Handbook of Applied Optimization*, chapter 3.6.4, pages 157–167. Oxford University Press, 2002.

153. Pablo Moscato. On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts: Towards memetic algorithms. Technical Report C3P 826, Caltech Concurrent Computation Program 158-79, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA, Pasadena, CA, 1989.

154. Panov Pance, Džeroski Sašo, Soldatova, Larisa. OntoDM: An ontology of data mining. Proceedings - *IEEE International Conference on Data Mining Workshops*, ICDM Workshops 2008. P.752-760. 10.1109/ICDMW.2008.62.

155. Pasquill F. Atmospheric dispersion parameters in gaussian plume modeling: [part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values]. EPA-600/4-76-030b, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 27711. – 1976. – P. 237.

156. Patel J. Relational databases and SQL language. 2020.

157. Perri, Damiano, Marco Simonetti, and Osvaldo Gervasi. 2022. "Deploying Efficiently Modern Applications on Cloud" *Electronics* 11, no. 3: 450. <https://doi.org/10.3390/electronics11030450>

158. Peter F. Nelson, Wo Ye. Using computer modelling to simulate atmospheric movement and potential risk of pollutants from post-combustion carbon capture projects. *Energy procedia*. – November, 2014. – P. 11-14.

159. Petrowski A. and Ben-Hamida S. Evolutionary algorithms (computer engineering: metaheuristics book 9). 1st edition. Wiley-ISTE, 2017. 305 p.

160. Poggio D., M. Walker, W. Nimmo, L. Ma, M. Pourkashanian. Modelling the anaerobic digestion of solid organic waste – Substrate characterisation method for ADM1 using a combined biochemical and kinetic parameter estimation approach. *Waste Management*. Volume 53. 2016, Pages 40-54,

161. Polyanin A, Zaitsev V. Handbook of ordinary differential equations: exact solutions, methods and problems. CRC Press, 2017. 1496 p.

162. Porplytsya N., Dyvak M., Dyvak T. Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee colony functioning. *Computational Problems of Electrical Engineering*. – 2014. – Vol. 4, №2. – P. 57-68.

163. Potra, Florian A., Stephen J. Wright, "Interior-point methods", *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 124 (1-2), pp. 281-302. 2000. doi:10.1016/S0377-0427(00)00433-7

164. Pukas A., Dyvak M., Kozak O. Interval model for identification of laryngeal nerves. *Przegląd Elektrotechniczny* (Electrical Review). 2010. Vol. 86, Is.1. P. 139–140.

165. Pukas A., Dyvak M., Padletska N., Shidlovsky V., Dyvak A. Mathematical models of informative characteristic of tissues in surgical wound at monitoring the recurrent laryngeal nerve by electrophysiological method. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceedings of the XIV International Conference ‘CADSM’2017*. Polyana–Svalyava, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, 2017. P. 8–12.

166. Pukas A., Dyvak T. Features of solving of the task of parameter identification of linear interval difference functional. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the Xth International Conference ‘TCSET’2010*. Lviv–Slavske: Lviv Polytechnic National University, 2010. P. 42.

167. Pukas A., Dyvak M., I. Oliynyk, 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.

168. Pukas A., Kozak O., Rudyak R., Siver D. Information technology for the time complexity estimation of the parameters identification algorithm by interval approach. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceedings of the XI International Conference ‘CADSM’2011*. Polyana–Svalyava, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, 2011. P. 256–258.

169. Quinn M.J., Malishevsky A., Seelam N., Zhao Y. Preliminary results from a parallel MATLAB compiler. *Proceedings of the First Merged International Parallel Processing Symposium and Symposium on Parallel and Distributed Processing*. – Orlando, 1998. – P. 81-87.

170. Ramachandran A., Rustum R., Adeloye A.J. Review of Anaerobic Digestion Modeling and Optimization Using Nature-Inspired Techniques. *Processes*. 2019, 7, 953. <https://doi.org/10.3390/pr7120953>
171. Rastrigin L.A. Adaptation of complex systems. Zinatne: Riga, Latvia. 1981. 375 p.
172. Rastrigin, L.A. The Convergence of the Random Search Method in the External Control of Many-Parameter System. *Automation and Remote Control*, 24, 1963. pp. 1337-1342.
173. Richard Dawkins. The Selfish Gene. Oxford University Press, first: 1976, second edition, October 1989.
174. Riley J.R., Greggers U., Smith A.D., Reynolds D.R., Menzel R. The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance. *NATURE: International weekly journal of science* – 2005.–Vol. 435. – P. 205-207.
175. Rittle-Johnson B. Developing mathematics knowledge. *Child Development Perspectives*. 2017. Vol. 11, Iss. 3. P. 184-190.
176. Rob J. M. Vaessens, Emile H. L. Aarts, and Jan Karel Lenstra. A local search template. *In Parallel Problem Solving from Nature, PPSN II*, pages 67–76, 1992. In proceedings [1357].
177. Rob J. M. Vaessens, Emile H. L. Aarts, and Jan Karel Lenstra. A local search template. *Computers and Operations Research*, 25(11):969–979, November 1998. ISSN: 0305-0548. doi:10.1016/S0305-0548(97)00093-2.
178. Rohn J. Input-output model with interval data. *Econometrica*. – 1980. – Vol. 48. – P. 767-769.
179. Roldan-Molina G.R., Mendez J.R., Yevseyeva I., Basto-Fernandes V. Ontology fixing by using software engineering. technology. *Appl. Sci*. 2020. Vol.10. 6328.
180. Russel C. Eberhart and James Kennedy. A new optimizer using particle swarm theory. *In Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science MHS'95*, pages 39–43. IEEE Press, October 1995.

181. Russel C. Eberhart and Yuhui Shi. Comparison between genetic algorithms and particle swarm optimization. *In Proceedings of the 7th International Conference on Evolutionary Programming*, pages 611–616, 1998.
182. Saenz D. Advanced Java programming (Java SE 7). Virtual Training Company. 2013.
183. Sattar A., Salwana E., Surin M., Ahmad M., Mahmood A. Comparative analysis of methodologies for domain ontology development: a systematic review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2020. Vol. 11(5).
184. Scheme of the biogas plant. <https://biteco-energy.com/ua/help/1575899636/id39/>.
185. Schneider T., Šimkus M. Ontologies and data management: a brief survey. *Künstl Intell*, 2020. Vol. 34. P. 329–353.
186. Schnieder Maren, and Sheryl Williams. 2023. "Educational Mobile Apps for Programming in Python: Review and Analysis" *Education Sciences* 13, no. 1: 66. <https://doi.org/10.3390/educsci13010066>
187. Schweppe F.C. Recursive state estimation: unknown but bounded error and system inputs. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1968. Vol 1. P. 22–28.
188. Sean L. Essentials of Metaheuristics (Second edition) / L. Sean. – Raleigh: Lulu, 2013. – 250 p.
189. Shanmuga Sundaram J.P., Du W., Zhao Z. A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions, and Open Issues. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2020, 22, 371–388.
190. Shary S.P. Algebraic approach to the interval linear static identification, tolerance, and control problems, or one more application of Kaucher Arithmetic. *Reliable Computing*. 1996. 2(1). P. 3-33.
191. Shary S.P. Solving the linear interval tolerance problem. *Mathematics and Computer in Simulation*. 1995. Vol. 39. P. 53-85.
192. Shary, S. On optimal solution of interval linear equations, *SIAM J. Numer. Anal.*, 32, 1995, pp. 610–630.

193. Shary, S. Outer estimation of generalized solution sets to interval linear systems, *Reliable Computing*, 5, 1999, pp. 323–335.
194. Shokin Yurii, Winnicki Ireneusz, Jasinski Janusz & Pietrek Sławomir. (2020). High order modified differential equation of the Beam-Warming method, I. The dispersive features. *Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. 35. 83-94. 10.1515/rnam-2020-0007.
195. 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.
196. 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.
197. Silva Y., Almeida I., Queiroz M. SQL: from traditional databases to big data. 47th ACM Technical Symposium on Computing Science Education. *Proceedings of the Conference. Association for Computing Machinery*: New York, NY, USA. 2016. P. 413–418.
198. Skalicky S., Lopez S., Lukowiak M., Schmidt A. A parallelizing Matlab Compiler Framework and run time for heterogeneous systems. IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, *IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems*. – New York, 2015. – P. 232-237.
199. Slowik A. *Swarm Intelligence Algorithms: modification and applications*. 1st edition. CRC Press. 2020. 378 p.

200. Soldatova Larisa, Clare Amanda, Sparkes Andrew, King Ross. An ontology for a Robot Scientist. *Bioinformatics* (Oxford, England). 22. e464-71. 10.1093/bioinformatics/btl207.

201. Soldatova Larisa, King, Ross. An Ontology of Scientific Experiments. *Journal of the Royal Society, Interface the Royal Society*. 3. P.795-803. 10.1098/rsif.2006.0134.

202. Song, Y.-J.; Oh, K.-S.; Lee, B.; Pak, D.-W.; Cha, J.-H.; Park, J.-G. Characteristics of Biogas Production from Organic Wastes Mixed at Optimal Ratios in an Anaerobic Co-Digestion Reactor. *Energies*. 2021, 14, 6812. <https://doi.org/10.3390/en14206812>.

203. Stepashko V. Developments and prospects of GMDH-based inductive modeling. *Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies CSIT 2017*. 2018. P. 474-491.

204. Stepashko V. From Inductive to Intelligent Modeling. *Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2018)*. 2018. P. 32-35.

205. Stepashko V., Moroz O. Hybrid searching GMDH-GA algorithm for solving inductive modeling tasks. *Proceedings of the First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP'2016)*. 2016. P. 350-355.

206. Stephen A. Billings, *Nonlinear System Identification: NARMAX Methods in the Time, Frequency, and Spatio-Temporal Domains*, Wiley, 2013, 688 p.

207. Stickland T.R., Tofts C.M.N. and Franks N.R. A path choice algorithm for ants. *Naturwissenschaften*, 79(12):567–572, December 1992. ISSN: 0028-1042 (Print) 1432-1904 (Online). doi:10.1007/BF01131415.

208. Suresh P., Hsu S.-H., Akkisetty P., Reklaitis G., Venkatasubramanian V. OntoMODEL: ontological mathematical modeling knowledge management in pharmaceutical product development, 1: Conceptual framework. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010. Vol. 49. P. 7768-7781.

209. Suresh P., Joglekar G., Hsu SH., Akkisetty P., Hailemariam L., Jain A., Reklaitis G., Venkatasubramanian V. Onto MODEL: Ontological mathematical modeling knowledge management. *Computer-aided chemical engineering*. 2008. Vol. 25. P. 985-990.

210. Suresh S.S, Naidu M.M., Asha Kiran. S. An XML Based Knowledge-Driven Decision Support System for Design Pattern Selection. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 2012. Vol. 1(3) P. 1-13.

211. Teofilo F. Gonzalez, editor. Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics. *Chapmann & Hall/CRC Computer and Information Science Series*. Chapmann & Hall/CRC Press (Tailor & Francis Group), 2007.

212. Terry Jones and Stephanie Forrest. Fitness distance correlation as a measure of problem difficulty for genetic algorithms. *In Proceedings of the Sixth International Conference on Genetic Algorithms*, pages 184–192, 1995.

213. Terry Jones. Evolutionary Algorithms, Fitness Landscapes and Search. PhD thesis, The University of New Mexico. Albuquerque, New Mexico, USA, May 1995.

214. Thomas Back, David B. Fogel, and Zbigniew Michalewicz, editors. Handbook of Evolutionary Computation. Computational Intelligence Library. Oxford University Press in cooperation with the Institute of Physics Publishing / CRC Press, Bristol, New York, ringbound edition, April 1997.

215. Thomas Back, Zbigniew Michalewicz, and Xin Yao, editors. IEEE International Conference on Evolutionary Computation, CEC97, April 13–16, 1997

216. Thomas Back. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice: Evolution Strategies, Evolutionary Programming, Genetic Algorithms. Oxford University Press US, January 1996.

217. Thomas H. Introduction to algorithms. MIT Press – 2001. – 1292 p.

218. Tolerances and Stopping Criteria. [Online]. Available at: <https://se.mathworks.com/help/optim/ug/tolerances-and-stopping-criteria.html>

219. Trokanas N., Cecelja F. Ontology evaluation for reuse in the domain of Process Systems Engineering. *Comput. Chem. Eng.* 2016. Vol. 85. P. 177-187.

220. Tu SW., Eriksson H., Gennari JH., Shahar Y., Musen MA. Ontology-based configuration of problem-solving methods and generation of knowledge-acquisition tools: application of PROTEGE-II to protocol-based decision support. *Artif. Intell. Med.* 1995. Vol. 7(3). P. 257-289.

221. 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.

222. Vanderbei, R., *Linear Programming: Foundations and Extensions*, Springer US, 2014.

223. Victor J. Rayward-Smith, Ibrahim H. Osman, Colin R. Reeves, and George D. Smith, editors. *Modern Heuristic Search Methods*. Wiley, December 1996.

224. Victor J. Rayward-Smith. A unified approach to tabu search, simulated annealing and genetic algorithms. In Victor J. Rayward-Smith, editor, *Applications of Modern Heuristic Methods – Proceedings of the UNICOM Seminar on Adaptive Computing and Information Processing*, volume I, pages 55–78, January 25–27, 1994

225. Walter E., Pronzato L. Identification of parametric model from experimental data. London, Berlin, Heidelberg, New York, Paris, Tokyo: Springer, 1997. – 413 p.

226. Waltz, R. A., J. L. Morales, J. Nocedal, and D. Orban, “An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps”, *Mathematical Programming*, Vol 107, No. 3, pp. 391-408, 2006.

227. Weise, Thomas. *Global optimization algorithms-theory and application*. Self-Published Thomas Weise 361 (2009): 153.

228. Wright, Margaret H., "The interior-point revolution in optimization: History, recent developments, and lasting consequences", *Bulletin of the American*

Mathematical Society, 42, pp. 39–57, 2004 doi:10.1090/S0273-0979-04-01040-7. MR 2115066.

229. Wu C.F.J., Hamada M.S. Experiments: planning, analysis and optimization. Wiley. – 2009. – 743 p.

230. Yu Dawei, Liu Jibao, Sui Qianwen, Wei Yuansong. “Biogas-pH automation control strategy for optimizing organic loading rate of anaerobic membrane bioreactor treating high COD wastewater,” *Bioresource Technology*, 203. 10.1016/j.biortech.2015.12.010, 2015.

231. Zbigniew Michalewicz and David B. Fogel. How to Solve It: Modern Heuristics. Springer, second, revised and extended edition, December 2004.

232. Zoeteman A. A life cycle costing based approach to design and maintenance of railway infrastructure. *Journal on Transport and Infrastructure Research*. 2001. Vol. 4(1). P. 391-413.

233. 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.

234. Бакан Г.М., Куссуль Н.Н. Теоретико-множественная идентификация линейных объектов в классе размытых эллипсоидальных множеств. *Автоматика*. – 1990. – №4. – С. 72-78.

235. Булгакова О.С., Степашко В.С. Порівняльний аналіз ефективності ітераційних алгоритмів МГУА за допомогою обчислювальних експериментів. *Вісн. ЧДТУ*. – 2011. – № 1. – С. 41–44.

236. 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.

237. Вощинин А.П. Метод оптимизации объектов по интервальным моделям целевой функции. М.: МЭИ. – 1987. – 47 с.

238. Грановський В.А., Сирота Т.Н. Методи обробки експериментальних даних при вимірах, *Л.*, «Вища школа», 1990
239. Громова О. В. Аналіз моделей поширення речовин в атмосфері від стаціонарних джерел. *Наук. праці УкрНДГМІ*, 2004. – № 253. – С. 173-181.
240. Гура, К.Ю., Петрук, В.Г. Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації та екомодернізації енергетики України і світу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 5. 2021, С. 19–26. DOI:<https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>.
241. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. – Тернопіль: Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011. – 216 с.
242. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Парплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.
243. Дивак М. П., Олійник І. С., Пукас А. В. Особливості комп'ютерної реалізації методу локалізації параметрів інтервальних моделей із виділенням «насиченого блоку». *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2014. № 2. С. 59–71.
244. Дивак М. П., Пукас А. В. Концепція побудови міждисциплінарних математичних моделей системних характеристик складних об'єктів в умовах інтервальної невизначеності. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції 'ВОТТП-14-2015'*. Одеса, 2015. С. 23–25.
245. 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.*

246. 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.

247. 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].

248. 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>

249. 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.

250. Дивак М.П. Теоретичні засади побудови моделей "вхід–вихід" статичних систем методами аналізу інтервальних даних. Дис. доктора технічних наук. – Тернопіль: Тернопільська академія народного господарства. – 2003. – 304 с.

251. Дивак М.П., Козак О.Л. Оцінювання допусків параметрів статичних систем еліпсоїдними множинами на основі аналізу інтервальних даних. *Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіону*. – 2008. – Вип. 4. – С. 67-78.

252. 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.

253. 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.

254. 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>

255. 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>

256. 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.

257. 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.

258. Дивак М.П., Олійник І.С. Архітектура програмної системи для моделювання статичних систем на основі аналізу інтервальних даних. *Міжнародний науково-технічний журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія»*. – Вінниця, 2017. – №2(39). – С. 70-81.

259. Дивак М.П., Олійник І.С. Метод формування оптимального «насиченого блоку» у задачі локалізації розв'язків інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь. *Збірник наукових праць «Індуктивне*

модельовання складних систем». Міжнар. наук.- навч. центр інформ. технологій та систем НАН та МОН України. – Київ, 2016. – Вип. 8. – С. 79-99.

260. 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.

261. 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 різницевого оператора. *Керуючі системи та машини*. 2013. №2. С. 72-78.

262. Дивак М.П., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Мельник А.М. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів: монографія. Тернопіль: Університетська думка. 2021. 212 с.

263. Дивак М.П., Стахів П.Г. Ідентифікація моделей об'єктів в умовах інтервальної невизначеності на основі методів аналізу інтервальних даних. *Пр. міжн. конф. з управління «АВТОМАТИКА – 2000»*. – Львів, 2000.–Т.2. – С. 90-97.

264. Дивак М.П., Стахів П.Г. Реалізація методу локалізації параметрів інтервальних моделей з виділенням насиченого блоку експерименту на паралельних обчислювальних графах. *Електроніка і зв'язок*. – 2001. №12. – С. 120-124.

265. Дивак М.П., Франко Ю.П. Оцінка можливостей МГЕС «Топольки» методами аналізу інтервальних даних. *Збірник наукових праць ДонНТУ серії «Інформатика, кібернетика і обчислювальна техніка»*. – 2011. – Вип. 10(153) – С. 274-278.

266. 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.

267. 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.

268. Клименко М., Прищепа А., Вознюк Н. Моніторинг довкілля: Підручник. К.: Академвидав, 2006. – 359 с.

269. Колодчак О.М. Інтелектуальний аналіз даних. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи та мережі*. 2013. № 773. С. 49-58.

270. 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

271. Личак М. М., Кравченко, А. В. Математичне моделювання та оптимізація дискретного керування орієнтацією космічного апарату. *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки*. 2012.

272. 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>

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

274. 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.

275. 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. № 1. С. 65-75. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-43-1-65-75>

276. 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. Том 54, №2. С. 94-104. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2022-54-2-103-114>

277. 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>

278. 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.

279. 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.

280. 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.

281. 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.

282. 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, АСІТ'2016*, Тернопіль: ТНЕУ, 2016, С. 23-25.

283. 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.

284. 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.

285. 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.

286. Матвійчук Я. М. Математичне макромоделювання динамічних систем: теорія і практика – Л.: Вид-во ЛНУ, 2000. – 214 с.

287. 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.

288. Мельник А.М. Архітектура програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного

підходу. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки.* 2022. №3. С. 265–273.

289. Мельник А.М. Онтологія як програмна надбудова до системи для математичного моделювання на основі інтервальних даних. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія.* 2022. Том. 54. №2. С. 26–38.

290. 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>

291. Мокін Б. І., Мокін В. Б., Мокін О. Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем: Навчальний посібник – В.: Вінницький національний технічний університет, 2010. – 263 с.

292. Олійник І.С. Ідентифікація параметрів інтервальних моделей статичних систем методами оптимального планування насичених експериментів. Дисертація на здобуття наукового ступеня: кандидата технічних наук, Львів, 2018, 175 с.

293. Олійник І.С. Удосконалення алгоритму визначення «насиченого блоку» у задачі параметричної ідентифікації інтервальної системи лінійних алгебричних рівнянь. *Науковий вісник національного лісотехнічного університету України: збірник науково-технічних праць.* – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип.26.5. – С. 345-363.

294. 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.*

295. Попов О. О. Стохастична модель забруднення приземної атмосфери від підприємств паливної енергетики (на прикладі ТЕЦ). *Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є.Пухова НАН України.* – Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2009 – № 53 – С. 10-17.

296. Порплиця Н.П., Гураль І.В., Дивак М.П. Метод структурної ідентифікації моделей процесу бродіння у біогазових установках із застосуванням алгоритму бджолоїної колонії. *Науковий вісник НЛТУ України*, 2017. – Т. 27, № 1. С.215-221.

297. Степашко В. С. Елементи теорії індуктивного моделювання. – Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія / Кол. авторів. – Київ: Наукова думка, 2010. – С. 481-496.

298. Степашко В.С., Булгакова О.С. Узагальнений ітераційний алгоритм методу групового врахування аргументів. *Керуючі системи та машини*. – 2013. – № 2. – С. 5-17.

299. Степашко В.С., Булгакова О.С., Зосімов В.В. Гібридні алгоритми самоорганізації моделей для прогнозування складних процесів. *Індуктивне моделювання складних систем*. – Вип. 2. – 2010. – С. 236-246.

300. Степашко В.С., Єфіменко С.М., Савченко Є.А. Комп'ютерний експеримент в індуктивному моделюванні. Київ: Наукова думка. 2014. 222 с.

301. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія. Під заг. ред. С.О. Субботіна. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375 с.

302. Томашевський В.М. Моделювання систем. К: Видавнича група ВНУ. 2005. 352 с.

303. Франко Ю.П. Моделювання роботи малої гідроелектростанції (МГЕС) з використанням методів множинного оцінювання. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. – 2013. – №11. – С. 238-242.

304. Шило Г.М., Воропай О.Ю., Гапоненко М.П. Інтервальні методи призначення експлуатаційних допусків // *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2003. № 2 (10). С. 78-82.

ДОДАТОК А

OWL-КОД ОНТОЛОГІЧНИХ ОПИСІВ

```

<?xml version="1.0"?>
<rdf:RDF xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#"
  xmlns:owl="http://www.w3.org/2002/07/owl#">

  <!-- Declaration of Classes -->
  <owl:Class rdf:about="#Characteristics"/>
  <owl:Class rdf:about="#Equation"/>
  <owl:Class rdf:about="#ExperimentalData"/>
  <owl:Class rdf:about="#IdentificationParametersMethods"/>
  <owl:Class rdf:about="#IdentificationProcess"/>
  <owl:Class rdf:about="#IdentificationStructureMethods"/>
  <owl:Class rdf:about="#IdentificationTask"/>
  <owl:Class rdf:about="#InputVariables"/>
  <owl:Class rdf:about="#MathematicalModel"/>
  <owl:Class rdf:about="#Objects"/>
  <owl:Class rdf:about="#OutputVariables"/>
  <owl:Class rdf:about="#Parameters"/>
  <owl:Class rdf:about="#Results"/>
  <owl:Class rdf:about="#StructuralElements"/>
  <owl:Class rdf:about="#SubjectDomain"/>

  <!-- Declaration of Object Properties -->
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasStructuralElements"/>
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasParameters"/>
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasModel"/>
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasIdentification"/>
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasMethodIP"/>
  <owl:ObjectProperty rdf:about="#hasResult"/>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasMethodIS"/>
<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasObject"/>
<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasSubjectDomain"/>

<!-- Declaration of Data Properties -->
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#id"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#characteristicName"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#featureName"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#featureValue"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeEquation"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#charEquation"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#name"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#experimentDate"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#methodName"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#operators"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#description"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#inProcessing"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeVariables"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#xValue"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#yValue"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeParameters"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#value"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#hasInterpretation"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#setStructuralElement"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeElements"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#subjectDomainName"/>
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#subjectDomainDescription"/>

<!-- Class Hierarchies -->
<rdf:Description rdf:about="#InputVariables">
  <rdf:subClassOf rdf:resource="#ExperimentalData"/>
</rdf:Description>

```

```

<rdf:Description rdf:about="#OutputVariables">
  <rdf:subClassOf rdf:resource="#ExperimentalData"/>
</rdf:Description>

```

```

<!-- Object Properties -->

```

```

<rdf:Description rdf:about="#hasStructuralElements">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#Equation"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#StructuralElements"/>
</rdf:Description>

```

```

<rdf:Description rdf:about="#hasParameters">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#Equation"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Parameters"/>
</rdf:Description>

```

```

<rdf:Description rdf:about="#hasModel">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#Results"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#MathematicalModel"/>
</rdf:Description>

```

```

<rdf:Description rdf:about="#hasIdentification">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#IdentificationProcess"/>
</rdf:Description>

```

```

<rdf:Description rdf:about="#hasMethodIP">
  <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationProcess"/>

```

```

    <rdfs:range rdf:resource="#IdentificationParametersMethods"/>
</rdf:Description>

<rdf:Description rdf:about="#hasResult">
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationProcess"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#Results"/>
</rdf:Description>

<rdf:Description rdf:about="#hasMethodIS">
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationProcess"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#IdentificationStructureMethods"/>
</rdf:Description>

<rdf:Description rdf:about="#hasObject">
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#Objects"/>
</rdf:Description>

<rdf:Description rdf:about="#hasSubjectDomain">
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#ObjectProperty"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="#Objects"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#SubjectDomain"/>
</rdf:Description>

<!-- Data Properties -->
<rdf:Description rdf:about="#id">
    <rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
    <rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
    <rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>

```

```
</rdf:Description>
```

```
<rdf:Description rdf:about="#characteristicName">
```

```
<rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
```

```
<rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
```

```
<rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
```

```
</rdf:Description>
```

```
<rdf:Description rdf:about="#featureName">
```

```
<rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
```

```
<rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
```

```
<rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#string"/>
```

```
</rdf:Description>
```

```
<rdf:Description rdf:about="#featureValue">
```

```
<rdf:type rdf:resource="http://www.w3.org/2002/07/owl#DatatypeProperty"/>
```

```
<rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
```

```
<rdfs:range rdf:resource="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer"/>
```

```
</rdf:Description>
```

```
<!-- Definition for StructuralElements class -->
```

```
<owl:Class rdf:about="#StructuralElements"/>
```

```
<!-- Definition for properties of StructuralElements class -->
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#hasSetElement">
```

```
<rdfs:domain rdf:resource="#StructuralElements"/>
```

```
<rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
```

```
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#setStructuralElement">
```

```
<rdfs:domain rdf:resource="#StructuralElements"/>
```

```
<rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
```



```
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeElements">
  <rdfs:domain rdf:resource="#StructuralElements"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<!-- Definition for SubjectDomain class -->
```

```
<owl:Class rdf:about="#SubjectDomain"/>
```

```
<!-- Definition for properties of SubjectDomain class -->
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#description">
  <rdfs:domain rdf:resource="#SubjectDomain"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#name">
  <rdfs:domain rdf:resource="#SubjectDomain"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<!-- Definition for ObjectProperty to link classes -->
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasStructuralElements">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Equation"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#StructuralElements"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```
<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasParameters">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Equation"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Parameters"/>
</owl:ObjectProperty>
```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasModel">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Results"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#MathematicalModel"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasObject">
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Objects"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasCharacteristics">
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Characteristics"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasIdentification">
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#IdentificationProcess"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasInputData">
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#InputVariables"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasOutputData">
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationTask"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#OutputVariables"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasMethodIP">
  <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationProcess"/>

```

```

    <rdfs:range rdf:resource="#IdentificationParametersMethods"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasMethodIS">
    <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationProcess"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#IdentificationStructureMethods"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasResult">
    <rdfs:domain rdf:resource="#IdentificationProcess"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#Results"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasEquation">
    <rdfs:domain rdf:resource="#MathematicalModel"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#Equation"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasSubjectDomain">
    <rdfs:domain rdf:resource="#Objects"/>
    <rdfs:range rdf:resource="#SubjectDomain"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<!-- Definition for Characteristics class -->

```

```

<owl:Class rdf:about="#Characteristics"/>

```

```

<!-- Definition for properties of Characteristics class -->

```

```

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#id">
    <rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
    <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#characteristicName">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#featureName">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#featureValue">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Characteristics"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:integer"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<!-- Definition for ExperimentalData class -->
<owl:Class rdf:about="#ExperimentalData"/>

```

```

<!-- Definition for properties of ExperimentalData class -->
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#name">
  <rdfs:domain rdf:resource="#ExperimentalData"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#experimentDate">
  <rdfs:domain rdf:resource="#ExperimentalData"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:dateTime"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<!-- Definition for InputVariables class -->
<owl:Class rdf:about="#InputVariables">
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#ExperimentalData"/>

```

```
</owl:Class>
```

```
<!-- Definition for properties of InputVariables class -->
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeVariables">
```

```
  <rdfs:domain rdf:resource="#InputVariables"/>
```

```
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
```

```
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#xValue">
```

```
  <rdfs:domain rdf:resource="#InputVariables"/>
```

```
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
```

```
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<!-- Definition for OutputVariables class -->
```

```
<owl:Class rdf:about="#OutputVariables">
```

```
  <rdfs:subClassOf rdf:resource="#ExperimentalData"/>
```

```
</owl:Class>
```

```
<!-- Definition for properties of OutputVariables class -->
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeVariables">
```

```
  <rdfs:domain rdf:resource="#OutputVariables"/>
```

```
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
```

```
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#yValue">
```

```
  <rdfs:domain rdf:resource="#OutputVariables"/>
```

```
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
```

```
</owl:DatatypeProperty>
```

```
<!-- Definition for Parameters class -->
```

```
<owl:Class rdf:about="#Parameters"/>
```

```

<!-- Definition for properties of Parameters class -->
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeParameters">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Parameters"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#value">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Parameters"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:decimal"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<!-- Definition for MathematicalModel class -->
<owl:Class rdf:about="#MathematicalModel"/>

```

```

<!-- Definition for properties of MathematicalModel class -->
<owl:ObjectProperty rdf:about="#hasEquation">
  <rdfs:domain rdf:resource="#MathematicalModel"/>
  <rdfs:range rdf:resource="#Equation"/>
</owl:ObjectProperty>

```

```

<!-- Definition for Objects class -->
<owl:Class rdf:about="#Objects"/>

```

```

<!-- Definition for properties of Objects class -->
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#description">
  <rdfs:domain rdf:resource="#Objects"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

```

```

<!-- Definition for StructuralElements class -->
<owl:Class rdf:about="#StructuralElements"/>

```

```

<!-- Definition for properties of StructuralElements class -->
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#hasSetElement">
  <rdfs:domain rdf:resource="#StructuralElements"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#setStructuralElement">
  <rdfs:domain rdf:resource="#StructuralElements"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#typeElements">
  <rdfs:domain rdf:resource="#StructuralElements"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

<!-- Definition for SubjectDomain class -->
<owl:Class rdf:about="#SubjectDomain"/>

<!-- Definition for properties of SubjectDomain class -->
<owl:DatatypeProperty rdf:about="#description">
  <rdfs:domain rdf:resource="#SubjectDomain"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

<owl:DatatypeProperty rdf:about="#name">
  <rdfs:domain rdf:resource="#SubjectDomain"/>
  <rdfs:range rdf:resource="&xsd:string"/>
</owl:DatatypeProperty>

<owl:AnnotationProperty rdf:about="#description"/>
<owl:AnnotationProperty rdf:about="#name"/>

```

```
<!-- Individuals -->
```

```
<!-- Subject Domain -->
```

```
<owl:NamedIndividual rdf:about="#subjectDomain1">
```

```
<rdf:type rdf:resource="#SubjectDomain"/>
```

```
<rdfs:label>Генерування сонячної електроенергії</rdfs:label>
```

```
<description>Генерація сонячної (фотоелектричної) електроенергії – це процес перетворення сонячної енергії в електричну за допомогою фотоелектричних (PV) панелей...</description>
```

```
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- Objects -->
```

```
<owl:NamedIndividual rdf:about="#object1">
```

```
<rdf:type rdf:resource="#Objects"/>
```

```
<rdfs:label>Модуль сонячної електростанції</rdfs:label>
```

```
<description>Модуль сонячної електростанції складається із 40 панелей типу LG NeON R 450W...</description>
```

```
</owl:NamedIndividual>
```

```
<!-- Characteristics -->
```

```
<owl:NamedIndividual rdf:about="#characteristics1">
```

```
<rdf:type rdf:resource="#Characteristics"/>
```

```
<id rdf:datatype="&xsd;integer">1</id>
```

```
<characteristicName rdf:datatype="&xsd;string">Розмірність</characteristicName>
```

```
<featureName rdf:datatype="&xsd;string">низька</featureName>
```

```
<featureValue rdf:datatype="&xsd;integer">26</featureValue>
```

```
</owl:NamedIndividual>
```

```
<owl:NamedIndividual rdf:about="#characteristics2">
```

```
<rdf:type rdf:resource="#Characteristics"/>
```

```
<id rdf:datatype="&xsd;integer">2</id>
```

```
<characteristicName rdf:datatype="&xsd;string">Складність</characteristicName>
```

```
<featureName rdf:datatype="&xsd;string">локальні мінімуми</featureName>
```



```

    <featureValue rdf:datatype="&xsd:boolean">true</featureValue>
</owl:NamedIndividual>

<!-- Identification Parameters Methods -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="#identificationMethod1">
    <rdf:type rdf:resource="#IdentificationParametersMethods"/>
    <methodName rdf:datatype="&xsd:string">Структурна ідентифікація на основі аналізу
градієнта цільової функції</methodName>
    <algorithm rdf:datatype="&xsd:string">IS_1.m</algorithm>
    <applicationConditions rdf:datatype="&xsd:string">диференційована цільова
функція</applicationConditions>
</owl:NamedIndividual>

<owl:NamedIndividual rdf:about="#identificationMethod2">
    <rdf:type rdf:resource="#IdentificationParametersMethods"/>
    <methodName rdf:datatype="&xsd:string">Параметрична ідентифікація на основі
градієнтних методів</methodName>
    <algorithm rdf:datatype="&xsd:string">IP_1.m</algorithm>
    <applicationConditions rdf:datatype="&xsd:string">диференційована цільова функція,
низька розмірність та локальні мінімуми, середня розмірність, висока
розмірність</applicationConditions>
</owl:NamedIndividual>

<!-- Mathematical Model -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="#model1">
    <rdf:type rdf:resource="#MathematicalModel"/>
    <rdfs:label>Модель</rdfs:label>
    <description>y(x)=426.6487-22.0263
x_1+0.006x_2^2.9319+763.8778x_2^0.6913</description>
</owl:NamedIndividual>

<!-- Results -->
<owl:NamedIndividual rdf:about="#results1">
    <rdf:type rdf:resource="#Results"/>

```

```
<rdfs:label>Результати</rdfs:label>

<description>1. Модель описує залежність генерованої електроенергії модулем
сонячної електростанції від зовнішніх факторів: температура навколишнього
середовища...</description>

</owl:NamedIndividual>

<!-- Properties Linking -->
<rdf:Description rdf:about="#object1">
  <hasCharacteristics rdf:resource="#characteristics1"/>
  <hasCharacteristics rdf:resource="#characteristics2"/>
</rdf:Description>

<rdf:Description rdf:about="#identificationMethod1">
  <hasModel rdf:resource="#model1"/>
  <hasResult rdf:resource="#results1"/>
</rdf:Description>
</rdf:RDF>
```

ДОДАТОК Б

АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор Тернопільської міської
комунальної лікарні №2

канд.мед.наук Р.Д. Левчук

« 25 » 09 2024 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи

Манжули Володимира Івановича

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

У процесі проведення хірургічних операцій на щитоподібній залозі використано результати дисертаційної роботи докторанта кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Манжули Володимира Івановича, а саме нові методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які забезпечили побудову математичної моделі для виявлення поворотного гортанного нерва.

Розроблена автором інтервальна нелінійна модель характеристик сигналу – реакцій на подразнення тканин в хірургічній рані, які, на відміну від існуючих, за рахунок застосування нових гібридних методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей потребують менше часу на їх ідентифікацію, що, відповідно, забезпечує оперативність моніторингу області локалізації поворотного гортанного нерва під час проведення операції та зменшує ризик його пошкодження.

За період з січня по вересень 2024 року інтервальну нелінійну модель характеристик сигналу при інтраопераційній ідентифікації нервів гортані застосовано у 58 випадках операцій тиреоїдектомій проведених у хірургічному відділенні Тернопільської міської комунальної лікарні №2. У всіх випадках відмічено високу чутливість сигналу при пошуках поворотного нерва серед тканин операційної рани.

Відповідальний за впровадження
завідувач хірургічного відділення

В.В. Паничев

ЗАТВЕРДЖУЮ

Виконавчий директор

ТОВ «Теофіпольська енергетична
компанія»

Володимир МАРТИНЮК

20 травня 2014 р.



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Манжули Володимира Івановича
на тему "Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей
статичних систем з нелінійними характеристиками"

Ми, комісія у складі: Резніченко Дмитро Олександрович та Архіпович Олександр Олексійович, склали даний акт про те, що при удосконаленні системи управління біогазовими установами використано результати дисертаційної роботи докторанта Західноукраїнського національного університету МАНЖУЛИ Володимира Івановича, а саме:

- інтервальні моделі, з гарантованими прогностичними властивостями, які характеризують рН-середовище в залежності від конкретного виду біосировини твердої та рідкої фракцій, температури та вологості. Базуючись на використанні різних видів сировини, розроблені на основі експериментальних даних моделі описують різні конфігурації структури та обсягів сировини для добового завантаження.

Отримані математичні моделі застосовуються для контролю рівня рН середовища в біореакторі шляхом визначення оптимальних обсягів сировини кожного виду у період завантаження в залежності від температури та вологості субстрату.

Інженер-механік груповий
Технік з експлуатації та ремонту
устаткування

Резніченко Д.О.

Архіпович О.О.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Манжули Володимира Івановича
«Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками»

Даний акт складений про те, що при організації роботи комунального підприємства теплових мереж “Тернопільміськтеплокомуненерго” Тернопільської міської ради використано результати дисертаційної роботи докторанта кафедри комп’ютерних наук Західноукраїнського національного університету Манжули Володимира Івановича, а саме, 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 та гібридних методів, що поєднують ефективні стратегії глобального пошуку і методи локальної оптимізації.

Розроблені автором на основі запропонованого комплексного підходу до ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних розроблено інтервальні моделі, що відображають поширення промислового забруднення від точкового джерела, яка складається із структурних елементів в базисі гаусових моделей і з гарантованою точністю відтворює властивості фоновому рівню забруднення навколо промислового об’єкта.

Запропоновані моделі слугують інструментарієм для підтримки рішень щодо декарбонізації об’єктів виробництва теплової енергії (котельні), які працюють на газоподібному паливі.

Директор
КП “Тернопільміськтеплокомуненерго”



А.К. Чумак



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТзОВ «Топольки»

Чайківський Я.Ф.

« 18 » 08 2024 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Манжули Володимира Івановича

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

Ми, комісія у складі: Заліщук Ігор Орестович, Тераз Василь Іванович, склали даний акт про те, що при організації роботи ТзОВ «Топольки» використано результати дисертаційної роботи докторанта кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Манжули Володимира Івановича, а саме нові методи структурної та параметричної ідентифікації моделей статичних систем на основі аналізу інтервальних даних, які забезпечили побудову математичної моделі для оцінювання потенційних можливостей використання наявних гідроресурсів та збільшення кількості генерованої електроенергії.

Розроблені автором інтервальні моделі прогнозування потужності малої гідроелектростанції, які, на відміну від існуючих, за рахунок застосування нових гібридних методів структурної та параметричної ідентифікації мають простішу структуру у вигляді нелінійного алгебраїчного рівняння, що забезпечило їх використання в системі комп'ютерного моделювання для прийняття рішень щодо оптимальних обсягів генерованої електроенергії та для оцінювання потенційних можливостей використання наявних гідроресурсів малою гідроелектростанцією.

Головний бухгалтер ТзОВ «Топольки»

І.О. Заліщук

Інженер ТзОВ «Топольки»

В.І. Тераз

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
Манжули Володимира Івановича
**«Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей
статичних систем з нелінійними характеристиками»**

Даний акт складений про те, що при реалізації програмних проєктів в ТОВ "АПІКО УКРАЇНА" використано результати дисертаційної роботи докторанта кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету Манжули Володимира Івановича, а саме 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 та гібридних методів, які поєднують ефективні стратегії глобального пошуку і методи локальної оптимізації.

Реалізована на основі нового комплексного підходу архітектура програмного забезпечення для математичного моделювання статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних, використовується для відтворення властивостей статичних нелінійних характеристик об'єктів із гарантованою точністю при реалізації проєктів в різних сферах діяльності. Нова архітектура імплементує підсистему 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 ChatGPT, програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API на всіх етапах математичного моделювання.



Директор ТОВ «АПІКО УКРАЇНА»

Микола СТРИЛЕЦЬКИЙ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор Західноукраїнського
національного університету

Оксана ДЕСЯТНЮК

« 16 » 2024 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи

Манжули Володимира Івановича

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

Комісія в складі: голови – декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, к.т.н., доцента Якименка І.З. та членів: начальника науково-дослідної частини, д.е.н., професора Семанюк В.З., начальника планово-фінансового відділу Кушніра О.Р. склали цей акт, про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Манжули В.І. використанні під час виконання науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету згідно з пріоритетним напрямом «Інформаційні та комунікаційні технології» з безпосередньою участю автора, а саме:

– НДР «Математичне та комп'ютерне моделювання об'єктів з розподіленими параметрами на основі поєднання онтологічного та інтервального аналізу» (2023-2024, держреєстраційний номер 01220001497). Автором розроблено онтологічні описи теоретичних засад ідентифікації математичних моделей складних об'єктів на основі аналізу інтервальних даних;

– НДР «Національна концепція екобезпеки суспільства та інклюзія циркулярної економіки в умовах пандемії» (2021-2022 рр., держреєстраційний номер 01210109485). Автором розроблено математичні моделі для підтримки рішень щодо декарбонізації промислових об'єктів та об'єктів транспортної інфраструктури;

– НДР «Математичне та програмне забезпечення для ідентифікації та моніторингу особливо небезпечних джерел забруднення ґрунту та ґрунтових вод»

(2020-2021 рр., держреєстраційний номер 0120U102040). Автором розроблено та реалізовано гібридні методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками;

– НДР «Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах шиї» (2017-2018 рр., держреєстраційний номер 0117U000410). Автором розроблено метод параметричної ідентифікації моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі аналізу інтервальних даних та побудовано інтервальну нелінійну модель розподілу амплітуди інформаційного сигналу на області хірургічного втручання для виявлення зворотного гортанного нерву під час операції на щитовидній залозі;

– НДР «Теорія побудови та методи реалізації в реальному часі міждисциплінарних математичних моделей зміни стану складних об'єктів» (2014-2015 рр., держреєстраційний номер 0114U000569). Автором розроблено концепцію зниження обчислювальної складності методів ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками на основі формалізації оптимізаційної задачі параметричної ідентифікації з нелінійною диференційованою цільовою функцією та використання гібридних методів оптимізації для опису станів складних об'єктів;

– НДР «Інформаційна технологія для ідентифікації і візуалізації зворотного гортанного нерву в процесі хірургічної операції на щитовидній залозі» (2012-2013 рр., держреєстраційний номер 0112U000078). Автором сформульовано задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками з гарантованою точністю як оптимізаційну задачу пошуку точкового розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь з диференційованою нелінійною цільовою функцією.

А також за госпдогвірною тематикою:

– НДР «Моделювання динаміки процесів у біогазових установках» (2023-2024, держреєстраційний номер 01230103785, замовник – ТОВ "Геофіпольська енергетична компанія"). Автором розроблено інтервальні моделі процесів у біогазових установках, які описують залежність рН середовища від складу завантаженої у біореактор сировини та технологічних параметрів процесів виробництва біогазу на основі багатокомпонентного субстрату, та використовуються для визначення допустимих варіацій значень рН середовища в

залежності від співвідношення сухої та рідкої фракції сировини з метою забезпечення стабільності процесу бродіння в біореакторах першого етапу;

– НДР «Макромоделювання якості ґрунтів як об'єкта із розподіленими параметрами в умовах інтервальної невизначеності» (липень 2014-грудень 2015 рр., держресстраційний номер 0114U006089, замовник – ФО-П Мадюдя А.І.). Автором розроблено алгоритмічне забезпечення для ідентифікації макромоделей в умовах інтервальної невизначеності;

– НДР «Розподілена система контролю технологічного процесу виробництва гіпсокартону» (грудень 2012-червень 2013 рр., держресстраційний номер 0112U003917, замовник - ПП «Українські гіпсокартонні системи»). Автором розроблено алгоритмічне забезпечення розподіленої системи контролю технологічного процесу виробництва для задач ідентифікації математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних.

Декан факультету комп'ютерних
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент



Ігор ЯКИМЕНКО

начальник науково-дослідної
частини, д.е.н., професор



Віта СЕМАНІУК

начальник
планово-фінансового відділу



Олексій КУШНІР

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з навчально-методичної
роботи
Західноукраїнського національного
університету
Віктор ОСТРОВЕРХОВ
2024 р.



АКТ

про впровадження в освітній процес Західноукраїнського національного
університету результатів дисертаційної роботи
Манжули Володимира Івановича
«Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних
систем з нелінійними характеристиками»

Даний акт складений про те, що результати дисертаційної роботи Манжули Володимира Івановича «Методи та програмні засоби ідентифікації інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками» використані в освітньому процесі факультету комп'ютерних інформаційних технологій Західноукраїнського національного університету для студентів спеціальності «Інженерія програмного забезпечення» та «Інформаційні системи та технології». При викладанні дисциплін «Моделювання систем», «Методи та програмні засоби теоретико-множинного інтервального підходу», «Інтервальний аналіз даних» розглядаються методи побудови інтервальних моделей статичних систем з нелінійними характеристиками, які забезпечують побудову моделей таких систем у вигляді алгебричних рівнянь. На відміну від існуючих, запропоновані методи структурної та параметричної ідентифікації побудовані на основі теоретичних засад розв'язування оптимізаційних задач із застосуванням гібридних методів глобальної оптимізації.

При викладанні дисциплін «Архітектура та проєктування програмного забезпечення» та «Технологія розробки програмного забезпечення та систем моделювання» розглядається середовище для побудови інтервальних моделей

статичних систем з нелінійними характеристиками, яке, на відміну від існуючих, імплементує підсистему інтервального моделювання в сервісно-орієнтовану архітектуру із врахуванням оптимізації обчислювальних схем за допомогою використання платформи Google Cloud Run, моделі розподілених обчислень MapReduce, інтелектуалізованої консультативно-діагностичної підсистеми на базі ChatGPT, безкоштовних програмно-інтерпретованих засобів та використання RESTful API на всіх етапах математичного моделювання, що у сукупності забезпечує спрощення процесу моделювання.

Декан факультету комп'ютерних
інформаційних технологій,
к.т.н., доцент



Ігор ЯКИМЕНКО

Завідувач кафедри комп'ютерних наук
д.т.н., професор



Андрій ПУКАС

ДОДАТОК В
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ ПРО
АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ 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.49–612. DOI: 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). C. 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, АСІТ'2016*, Тернопіль: ТНЕУ, 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 І*

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.