

**ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**МЕЛЬНИК АНДРІЙ МИКОЛАЙОВИЧ**



УДК 519.876.5 : 004.891.2

**ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНІ ПРОГРАМНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ІНТЕРВАЛЬНОГО  
АНАЛІЗУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

(12 – інформаційні технології)

**РЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Тернопіль-2023

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДОКТОРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Розвиток інформаційних технологій передбачає використання інтелектуалізованих систем підтримки рішень, керованих моделями, даними та знаннями, в умовах невизначеності. Розвиток таких систем може забезпечуватися використанням математичного моделювання як процесу побудови математичних моделей із застосуванням методів їх ідентифікації, так і оперування побудованими математичними моделями. Це дає можливість створити низку математичних макромodelей складних об'єктів, які використовуються в процесах підготовки та прийняття рішень.

До побудови таких modelей існує два підходи: дедуктивний та індуктивний. При дедуктивному підході необхідно встановити загальний вигляд моделі, а потім перевірити її адекватність на експериментальних даних, що ускладнює застосування цього підходу при побудові макромodelей систем підтримки прийняття рішень, керованих моделями, даними та знаннями.

Індуктивний підхід, навпаки, ґрунтується на експериментальному дослідженні властивостей складного об'єкту із подальшою ідентифікацією математичної моделі. Побудовані в межах такого підходу моделі є простими і часто використовуються в інтелектуалізованих системах підтримки прийняття рішень та в експертних системах, керованих знаннями. Проте, для побудови таких modelей, необхідно розв'язувати задачі структурної ідентифікації математичних modelей складних об'єктів. Особливо ці задачі ідентифікації ускладнюються, коли експериментальні дані отримані в інтервальному вигляді, а отримані моделі мають гарантовані прогностичні властивості.

Зокрема, найбільш значущі результати при розробці методів ідентифікації modelей складних об'єктів отримали українські та зарубіжні вчені Бакан Г.М., Грановський В.А., Дивак М.П., Кветний Р.Н., Кунцевич В.М., Личак М.М., Гребеннік І.В., Пшеничний Б.М., Шокін Ю.І., Згуровський М.З., Milanese M., Norton J.P., Vicino E., Schwepper F.S., та ін., а при проведенні досліджень modelей у вигляді різницевих операторів варто відзначити наукові школи вчених: Ципкіна Я.З., Дивака М.П., Івахненка О.Г., Степашка В.С., Akaike H., Rissanen J., Pollard D. та ін. Розробці систем підтримки прийняття рішень у сфері математичного моделювання з використанням онтологічного підходу присвячені праці таких зарубіжних та українських вчених: Gruber T., King M., Staab S., Noy N., McGuinness D., Палагіна О.В., Пасічника В.В., Шаховської Н.Б., Литвина В.М., Пасічника Р.М., Досина Д.Г., Степашка В.С., Лупенка С.А.

Спираючись на припущення, що точність математичної моделі повинна бути співмірна із точністю результатів експерименту, які представлено у вигляді числових інтервалів, що гарантовано включають спостережувані значення характеристик об'єкта, отримані для фіксованих умов його проведення, доцільно для побудови таких modelей використати методи аналізу інтервальних даних, а самі моделі матимуть вигляд інтервальних різницевих рівнянь. Разом із тим, представлення цих modelей у вигляді інтервальних різницевих рівнянь хоча і має переваги для комп'ютерного моделювання, проте вимагає застосування достатньо складних, у порівнянні із використанням стохастичних підходів, методів структурної та параметричної ідентифікації.

Розроблені математичні та комп'ютерні моделі відзначаються високою обчислювальною складністю, яка необхідна для забезпечення адекватності та достатньої точності для прийняття рішень.

Проблема складності пов'язана із необхідністю розширення сфери застосування макромоделей у певній предметній області при збереженні її прогностичних властивостей. З іншого боку, спираючись на гіпотезу про те, що онтологічний опис предметної області моделювання дає можливість формалізувати та розширити умови використання інтервальної моделі, необхідно розробити гібридні методи налаштування структури моделі та параметрів з метою підвищення її прогностичних властивостей.

Саме це протиріччя становить суть наукової проблеми: зниження обчислювальної складності структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів з одночасним забезпеченням гарантованої точності цих моделей у межах, що необхідні для розв'язування задач прийняття рішень та дослідження властивостей цих об'єктів.

У процесі вирішення цієї проблеми розглядаються комп'ютерні (дискретні) моделі складних об'єктів у різних прикладних сферах. Розроблення методів та засобів побудови дискретних моделей складних об'єктів у вигляді інтервальних різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних для розширення сфери та умов застосування моделей у поєднанні із зниженням обчислювальної складності їх побудови є актуальними задачами, розв'язування яких розвине теорії ідентифікації та математичного моделювання, а також слугуватиме поштовхом для розвитку прикладних досліджень у сферах охорони довкілля, медицини та інших галузях.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.** Дисертаційна робота виконувалася в межах пріоритетного напрямку: «Інформаційні та комунікаційні технології» відповідно до закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та пов'язана з науковими дослідженнями, які виконувалися за держбюджетною тематикою кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету:

– НДР "Математичне та комп'ютерне моделювання об'єктів з розподіленими параметрами на основі поєднання онтологічного та інтервального аналізу" (2022-2024 рр., № держреєстрації 0122U001497). Автором розроблено онтологію математичного моделювання на основі інтервальних даних.

– НДР "Розвиток систем підтримки рішень, керованих моделями та даними в умовах невизначеності." (2022 р., № держреєстрації 0121U114705, відповідальний виконавець). Автором розроблено метод вибору математичної моделі в рамках онтологічного підходу для моделювання на основі інтервальних даних.

– НДР "Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах ший" (2017-2018 рр., № держреєстрації 0117U000410). Автором удосконалено метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей ідентифікації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічної операції на органах ший.

А також за госпдоговірною тематикою:

– НДР «Реінженерія веб-порталу підприємства та імплементація мобільного додатку до нього» (травень 2020 - вересень 2020 рр., № держреєстрації 0120U102833, замовник – ТзОВ «Терногаз», відповідальний виконавець). Автором

апробовано метод фільтрування даних на основі метрики оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах.

– НДР «Онлайн система «Терногаз» (липень 2019 - серпень 2019 рр., № держреєстрації 0119U102841, замовник – ТзОВ «Терногаз», відповідальний виконавець). Автором апробовано метрику оцінки актуальності інформації.

– НДР „Модернізація програмної системи підтримки діяльності Центру надання адміністративних послуг Тернопільської міської ради” (жовтень 2017 – грудень 2017 рр., № держреєстрації 0117U003870, замовник – Тернопільська міська рада, відповідальний виконавець); НДР „Розширення функціоналу програмної системи підтримки діяльності Центру надання адміністративних послуг Тернопільської міської ради” (вересень 2016 – грудень 2016 рр., № держреєстрації 0116U008541, замовник – Тернопільська міська рада, відповідальний виконавець). У цих НДР автором розроблено метод структурної ідентифікації дискретних моделей динаміки реакцій користувачів на повідомлення в тематичних групах соціальних мереж та апробовано його для інтелектуалізації системи надання адміністративних послуг.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є зниження обчислювальної складності процесів моделювання характеристик складних об’єктів в умовах інтервальної невизначеності у спосіб розробки та поєднання методів аналізу інтервальних даних і знання-орієнтованого підходу як до опису предметної області досліджуваного об’єкта, так і до області побудови даного класу математичних моделей із використанням онтології.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв’язати такі завдання:

- провести аналіз відомих методів ідентифікації моделей характеристик об’єктів в умовах невизначеності та підходів до реалізації онтологічного опису їх застосування у задачах структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей;
- розробити концепцію та метод ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об’єктів на основі поєднання методів аналізу інтервальних даних та знання-орієнтованого підходу із використанням онтології;
- розробити метод верифікації інтервальних моделей на основі метрики оцінки актуальності інформації і методу фільтрування даних та побудувати інтервальну дискретну модель динаміки реакцій користувачів на повідомлення в тематичних групах соціальних мереж;
- удосконалити метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об’єктів з метою зниження його складності;
- розробити програмний комплекс для інтервального моделювання з відкритою програмною архітектурою та репозиторій інтервальних моделей характеристик складних об’єктів;
- провести апробацію нових й удосконалених методів та розробленого програмного комплексу для розв’язування прикладних задач побудови моделей характеристик складних об’єктів в умовах інтервальної невизначеності.

*Об’єкт дослідження* – процеси індуктивного моделювання складних об’єктів на основі аналізу інтервальних даних.

*Предмет дослідження* – знання-орієнтовані на основі онтологічного підходу програмні системи для інтервального аналізу та моделювання складних об’єктів.

**Методи дослідження.** Для розв'язання задач моделювання складних об'єктів на основі поєднання інтервального та онтологічного підходів використано методи теорії систем, математичного моделювання, теорії ідентифікації, інтервальної математики, математичної статистики та оптимізації, теорії ймовірності; для побудови онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних використано системний аналіз, методи реляційної алгебри; для розв'язання задач реалізації комп'ютерного середовища та генерування інструментальних засобів для моделювання – системний підхід та об'єктно-орієнтований аналіз, проектування та програмування, функціональне та комплексне тестування систем.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає у тому, що:

*вперше:*

- запропонована нова концепція ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, яка передбачає поєднання методів аналізу інтервальних даних та знання-орієнтованого підходу як до опису предметної області досліджуваного об'єкта, так і до області побудови даного класу математичних моделей із використанням онтології, що в сукупності створило можливість розробки нових, більш ефективних з обчислювальної точки зору, методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів;

- запропоновано та обґрунтовано новий гібридний метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на поєднанні методів інтервального аналізу, поведінкових моделей бджолиної колонії та знання-орієнтованому підході опису предметної області об'єктів на основі онтології, що у сукупності забезпечило зниження обчислювальної складності структурної ідентифікації;

- при розробці комп'ютерного середовища для інтервального моделювання запропоновано та обґрунтовано метод верифікації моделей, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на поєднанні методу фільтрування даних та застосуванні метрики оцінки актуальності інформації, що в сукупності забезпечує повноту моделі та знижує обчислювальну складність її ідентифікації;

- розроблено інтервальну дискретну модель у вигляді різницевого рівняння, що описує динаміку реакцій користувачів на повідомлення в тематичних групах соціальних мереж, в якій, на відміну від існуючих, враховано реакції користувачів на інформаційні повідомлення, що дало змогу побудувати їх стійкий портрет та оптимальний розклад публікацій спеціалізованої групи для максимізації кількості реакцій на повідомлення;

- розроблено комп'ютерне середовище для математичного моделювання складних об'єктів на основі інтервальних дискретних моделей, яке, на відміну від існуючих, ґрунтується на знання-орієнтованому підході опису області побудови даного класу математичних моделей із застосуванням онтології, що забезпечує його адаптацію та інтерпретацію в програмний код під задану предметну область та під конкретні вимоги користувача;

**удосконалено** метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, який на відміну від існуючих, містить обчислювальні процедури адаптивного налаштування вибору структурних елементів у спосіб встановлення для кожного елемента множини ймовірності його вибору і зміни цього розподілу на різних фазах поведінкової моделі бджолиної колонії, що в сукупності

знижує обчислювальну складність реалізації методу;

***набули подальшого розвитку:***

- комп'ютерні середовища для інтервального моделювання та аналізу, в яких, на відміну від існуючих, реалізована відкрита архітектура програмного забезпечення, що в сукупності забезпечує зниження часової складності процедур як розробки, так і застосування інтервальних математичних моделей;

- репозиторій інтервальних дискретних моделей забруднення атмосфери автотранспортом та інтервальних моделей візуалізації зворотного гортанного нерва під час операції на щитовидній залозі який, на відміну від існуючих, вміщує онтологічний опис як предметної області їх застосування, так і умови розробки цих моделей, що в сукупності спрощує процедури побудови зазначеного класу математичних моделей для користувачів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Створено багатфункціональний програмний комплекс, в якому реалізовано методи побудови інтервальних моделей складних об'єктів, а саме методи їх структурної та параметричної ідентифікації, які реалізовані на основі поведінкових моделей бджолиної колонії та знання-орієнтованому підході з використанням онтологічного опису. Програмний комплекс використано для побудови моделей в екології, медицині, веб-орієнтованих інформаційних системах та інженерії програмного забезпечення.

Результати роботи впроваджені: у Державній установі «Тернопільський обласний центр контролю та профілактики хвороб Міністерства охорони здоров'я України» для підтримки прийняття рішень щодо забруднення атмосферного повітря у м. Тернопіль; у КНП «Тернопільська комунальна міська лікарня №2» при проведенні операцій на щитовидній залозі; у відділі «Центр надання адміністративних послуг» Тернопільської міської ради для побудови оптимального розкладу публікацій спеціалізованої групи для максимізації кількості реакцій на повідомлення на заданому інтервалі часу; в департаменті цифрової трансформації Тернопільської обласної державної адміністрації при впровадженні сервісно-орієнтованих корпоративних систем; у компанії «Eleks» (м. Тернопіль) для оцінювання інформаційних дописів користувачів соціальної спільноти на основі використання методу фільтрування даних, побудованого з використанням метрики оцінки актуальності інформації. На підставі проведених у дисертаційній роботі досліджень розроблено комплексне методичне забезпечення, що використовується в освітньому процесі на кафедрі комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету при викладанні дисциплін для студентів спеціальності 121 «Інженерія програмного забезпечення». У додатках до дисертації подано акти використання результатів дисертаційного дослідження.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, які викладені у роботі, отримані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, автору належать такі результати: [1, 53, 57, 62, 64] – формалізований опис компонентів моделі управління знаннями в організаційно-технічних системах; [2, 36-38, 46, 58, 63] – застосування знання-орієнтованого підходу до опису предметної області досліджуваного об'єкта із використанням онтології; [3-5] – застосування онтологій до опису області побудови математичних моделей; [5, 43] – застосування алгоритму реалізації гібридного методу ідентифікації математичної моделі динаміки концентрацій діоксиду азоту; [6, 17] – нова концепція ідентифікації інтервальних



дискретних моделей складних об'єктів, яка передбачає поєднання методів аналізу інтервальних даних, знання-орієнтованого підходу із використанням онтології; [7, 41, 42, 47, 51] – постановки та аналіз задач побудови математичних моделей складних об'єктів; [8] – алгоритмічна та програмна реалізація методу ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами та управлінням; [9] – реалізація методу ідентифікації інтервальної моделі в задачі виявлення зворотного гортанного нерва на хірургічній рані; [10, 11] – реалізація алгоритмів моделювання добового циклу зміни концентрації діоксиду азоту; [12] – адаптація методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів із адаптивним налаштуванням вибору структурних елементів для ідентифікації нелінійних інтервальних моделей; [13] – модуль ідентифікації інтервальних дискретних моделей у системі екологічного моніторингу; [14, 29] – інтервальна дискретна модель динаміки реакцій користувачів на повідомлення в тематичних групах соціальних мереж; [15, 16, 28, 30, 40, 50] – система показників для метрик оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах; [20] – метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів із адаптивним налаштуванням вибору структурних елементів; [21, 31] – гібридний метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів; [24] – метод верифікації математичних моделей на основі поєднання методу фільтрування даних та застосування метрики оцінки актуальності інформації; [25, 32, 39, 44, 48, 49] – архітектура комп'ютерного середовища для математичного моделювання на основі інтервальних дискретних моделей складних об'єктів; [26, 35] – алгоритми реалізації методу фільтрування даних та застосування метрик оцінки актуальності інформації; [27, 33] – репозиторій інтервальних моделей складних об'єктів; [34, 52, 45, 54, 59, 65] – алгоритми інтеграції даних інформаційних систем з неоднорідними онтологічними специфікаціями в комп'ютерних середовищах для інтервального моделювання та аналізу даних; [55, 56, 60, 61] – реалізації принципів відкритої архітектури програмного забезпечення для комп'ютерних середовищ для інтервального моделювання та аналізу даних.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися та обговорювалися на 22 міжнародних та всеукраїнських конференціях, у тому числі на 15 міжнародних науково-технічних конференціях:

“The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”, CADSM (Львів-Поляна, 2013, 2015, 2017); “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science”, TCSET (Львів-Славсько, 2016, 2018, 2022); IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (September 24–26, 2015, Warsaw, Poland); “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH (Lviv-Polyana, 2017); “Data Stream Mining & Processing” DSMP (Lviv-Novoiavorivsk, 2018); “Advanced Computer Information Technologies” ACIT (Ceske Budejovice, Czech Republic, 2018, 2019; Deggendorf, Germany, 2020; Spišská Kapitula, Slovakia, 2022); Перша міжнародна мережева науково-практична конференція “Інформаційне суспільство: стан і перспективи розвитку в світлі регіональних особливостей” (Краків-Жешув-Львів-Тернопіль, 2012); 7 Всеукраїнських науково-технічних конференціях: “Сучасні комп'ютерні інформаційні технології” ACIT (Тернопіль, 2012, 2013, 2015, 2016, 2017); “Комп'ютерні інформаційні технології” CIT (Тернопіль, 2019, 2020), а також

наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук Західноукраїнського національного університету (2012-2022).

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 65 наукових праць, зокрема 24 статті [1-16, 18-25] у наукових періодичних фахових виданнях, у тому числі 17 статей у наукових фахових виданнях України [1, 2, 5, 8, 12-24] та 7 статей у закордонних періодичних виданнях [3, 4, 6, 7, 9, 10, 11], 10 статей [1-4, 6-11] включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science (з них, відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, дві статті віднесено до квартилю Q1-Q2 [6, 7], дві – до квартилю Q3 [1, 9] та три – до квартилю Q4 [2, 4, 8]), 1 монографія [17] та 40 публікацій у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій [26-65] (з них 27 публікацій [26-52] включено в наукометричні бази Scopus та/або Web of Science). Загалом 37 публікацій включено до наукометричних баз Scopus та/або Web of Science.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи складає 351 сторінка, із них 290 сторінок основного тексту, 91 рисунок, 28 таблиць, список використаних джерел із 266 найменувань, 5 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та основні завдання дослідження. Визначено об'єкт, предмет, наведено використані методи дослідження, вказано наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів роботи. Наведено відомості про впровадження результатів роботи, представленні відомості про апробацію, публікації та надано характеристику особистого внеску здобувача у роботах, які виконані у співавторстві. Подано опис структури та обсягу дисертаційної роботи.

У **першому розділі** окреслено ряд завдань щодо побудови систем, орієнтованих на знання та моделі. Здійснено аналіз методів та засобів побудови моделей характеристик складних об'єктів в умовах невизначеності. При цьому, проведено порівняльний аналіз недоліків та переваг методів дедуктивного та індуктивного підходів. Виділено випадки, в яких для побудови моделей характеристик складних об'єктів обґрунтовано використання індуктивного підходу та методів аналізу інтервальних даних.

Розглянуто постановки задач структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів у вигляді різницевих рівнянь. Проведено аналіз цих методів та обґрунтовано для зниження обчислювальної складності їх реалізації використання знання-орієнтованого підходу як до опису предметної області досліджуваного об'єкта, так і області побудови даного класу математичних моделей.

Здійснено постановку проблеми дисертаційного дослідження, яка полягає у зниженні обчислювальної складності структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів з одночасним забезпеченням гарантованої точності цих моделей у межах необхідних для розв'язування задач, прийняття рішень та дослідження властивостей цих об'єктів.



У другому розділі роботи розглянуто метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів та вдосконалено його на основі введення обчислювальних процедур на різних фазах поведінкової моделі бджолиної колонії адаптивного налаштування вибору структурних елементів у спосіб обчислення для кожного елемента ймовірності його вибору при синтезі поточної моделі. Описано алгоритм реалізації методу. Проведено обчислювальні експерименти для дослідження обчислювальної складності. На прикладах структурної ідентифікації ряду інтервальних дискретних моделей підтверджено підвищення ефективності вдосконаленого методу.

Задача структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів породжена отриманням інтервальних даних у формі

$$[z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+], i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J, h = 0, \dots, H, k = 0, \dots, K, \quad (1)$$

де  $[z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+]$  – нижня та верхня межі експериментально отриманої характеристики об'єкта в точці з дискретними координатами  $i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J, h = 0, \dots, H$  та у дискретні моменти часу  $k = 0, \dots, K$ .

Математичну модель характеристики об'єкта у загальному вигляді розглядаємо, як дискретну модель у такому вигляді:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T(v_{i-d,j-d,h-d,k-d}, v_{i-d+1,j-d,h-d,k-d}, \dots, v_{j-d+1,d,d,d}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \dots, v_{i,j,h-1,k}) \cdot \vec{g}, i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K \quad (2)$$

де  $v_{i,j,h,k}$  - означає прогнозоване чи модельоване значення вимірної характеристики об'єкта в точці з дискретними координатами  $i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H$ , та у дискретні моменти часу  $k = d, \dots, K$ ;  $d$  – порядок різницевої схеми (2);  $\vec{g}$  – вектор параметрів моделі, значення яких необхідно оцінити на основі інтервальних даних;  $\vec{f}^T$  - вектор базисних функцій, які перетворюють значення модельованої характеристики для попередніх точок та дискретних моментів часу. Тобто, для кожної базисної функції матимемо у виразі (2) для перетворення, в загальному вигляді, такий вектор:

$$\vec{V} = (v_{i-d,j-d,h-d,k-d}, v_{i-d+1,j-d,h-d,k-d}, \dots, v_{j-d+1,d,d,d}, \dots, v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \dots, v_{i,j,h-1,k})^T \quad (3)$$

Критерій достатньої точності математичної моделі (2), за таких умов запишемо так:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+] \subset [z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+] \forall i = 0, \dots, I, \forall j = 0, \dots, J, \forall h = 0, \dots, H, \forall k = 0, \dots, K, \quad (4)$$

де  $[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+]$  - є числовим інтервалом модельованої характеристики об'єкта.

Структуру моделі визначає набір взаємопов'язаних компонент:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\vec{V}) \cdot g_1^s; f_2^s(\vec{V}) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\vec{V}) \cdot g_{m_s}^s\}, \quad (5)$$

а їх адитивна згортка

$$Q(\lambda_s) = f_1^s(\vec{V}) \cdot g_1^s + f_2^s(\vec{V}) \cdot g_2^s + \dots + f_{m_s}^s(\vec{V}) \cdot g_{m_s}^s \quad (6)$$

формує дискретну модель об'єкта.

У виразі (5),  $s$  – означає певний набір структурних елементів. Оскільки для обчислень за різницевою схемою (2) необхідно задати початкові умови

$$[\hat{v}_{0,0,0,0}^-; \hat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, [\hat{v}_{1,d-1,1,0}^-; \hat{v}_{1,d-1,1,0}^+] \subseteq [z_{1,d-1,1,0}^-; z_{1,d-1,1,0}^+], \dots, \quad (7)$$

$$[\hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+].$$

для усіх моделей претендентів, то беручи до уваги ще і умови для точності моделі (4) і різні їх структури, то усі моделі- претенденти матимуть такий вигляд :

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}(\lambda_s, [\vec{V}])] = [f_1^s([\vec{V}])] \cdot \hat{g}_1^s + [f_2^s([\vec{V}])] \cdot \hat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s([\vec{V}])] \cdot \hat{g}_{m_s}^s, \quad (8)$$

а для їх ідентифікації отримуємо інтервальну систему нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР)

$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_{0,0,0,0}^-; \hat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]; \\ z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_1^s + [f_2^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_{m_s}^s \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K. \end{array} \right. \quad (9)$$

У виразі (8):  $f_i^s([\vec{V}]) = f_i^s([\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}, \dots, [\hat{v}_{i,j-d,h,k}], \dots, [\hat{v}_{i,j,h-1,k}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k})$ , а  $[\vec{V}] = [\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}, \dots, [\hat{v}_{i,j-d,h,k}], \dots, [\hat{v}_{i,j,h-1,k}]]$ - інтервальний вектор з компонентами, які означають інтервальні оцінки модельованої характеристики. При чому, на початкових дискретах ці інтервали є вимірними, а в подальшому їх обчислюємо на основі інтервальної різницевої схеми у вигляді (8). Математичний вираз у вигляді (8) називаємо інтервальною дискретною моделлю об'єкта, яку налаштовуємо на основі спостережень за модельованою характеристикою об'єкта.

Якщо в ІСНАР (9) зафіксувати структуру моделі, тобто поточний вектор базисних функцій, то з її розв'язку можемо отримати невідомі оцінки  $\hat{g}^s$  параметрів моделі. Враховуючи високу обчислювальну складність розв'язування цієї системи (комбінаторну) на практиці, обчислюють тільки точкові оцінки параметрів  $\hat{g}^s$ . При цьому процес оцінювання трансформують до розв'язання такої оптимізаційної задачі:

$$\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \xrightarrow{\lambda_s = \{f_1^s([\vec{V}]) \cdot g_{l1}^s, f_2^s([\vec{V}]) \cdot g_{l2}^s, \dots, f_{m_s}^s([\vec{V}]) \cdot g_{lm_s}^s\}} \min, \quad (10)$$

$$(m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], f_1^s([\vec{V}]), f_2^s([\vec{V}]), \dots, f_{m_s}^s([\vec{V}]) \in F,$$

$$\hat{g}_{jl}^s \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}], j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, S \quad (11)$$

де  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$  – величина, яка характеризує кількість елементів s-ї структури моделі;  $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}]) \}$  - множина елементів структури інтервальної моделі;  $g_{li}^{low}, g_{li}^{up}$  - нижнє та верхнє можливе значення кожного параметра моделі.

У виразі (10) показник якості  $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$  - критеріальну функцію, формуємо із ІСНАР (9) і вона має такий вигляд:

$$\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \left| \begin{aligned} &mid(f_1^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{l1}^s + f_2^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{l2}^s + \dots \\ &+ f_m^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{lm}^s) - mid([z_{i,j,h,k}]) \end{aligned} \right| \right\} \quad (12)$$

якщо  $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \emptyset, \exists i = d, \dots, I, \exists j = d, \dots, J, \exists h = d, \dots, H, \exists k = d, \dots, K$ , або:

$$\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \begin{aligned} &wid(f_1^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{l1}^s + f_2^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{l2}^s + \dots \\ &+ f_m^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{lm}^s) - wid(f_1^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{l1}^s + \\ &+ f_2^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{l2}^s + \dots + f_m^s([\vec{V}]) \cdot \hat{g}_{lm}^s) \cap [z_{i,j,h,k}] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

якщо  $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \emptyset, \forall i = d, \dots, I, \forall j = d, \dots, J, \forall h = d, \dots, H, \forall k = d, \dots, K$ , де  $mid(\bullet), wid(\bullet)$  - є операціями визначення центру інтервалу та його ширини відповідно.

Отже, як бачимо, критеріальна функція  $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$  оптимізаційної задачі (10), (11) є дискретною і достатньо складною. Її значення можливо обчислити тільки алгоритмічно. Це суттєво ускладнює задачу структурної ідентифікації. Більше того, успішність отримання розв'язку цієї задачі залежить від повноти формування множини структурних елементів  $F$ . Також кількість обчислень значень цієї функції в оптимізаційній процедурі (10), (11) визначає її часову обчислювальну складність.

Базовим методом структурної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів є метод, побудований на поведінкових моделях бджолиної колонії. Підставою на удосконалення обчислювальної процедури відомого методу є такі міркування. Одною із основних обчислювальних проблем реалізації зазначеного методу є формування початкової множини  $F$  структурних елементів моделей-претендентів та вибір конкретних структурних елементів при формуванні нових моделей-претендентів. Саме ця процедура суттєвим чином ускладнює відому обчислювальну схему методу. Розглядаючи різні можливості спрощення цієї процедури, у випадку повноти множини структурних елементів, пропонується в процесі реалізації обчислювальної схеми синтезу структур моделей-претендентів враховувати історію «успішного» вибору тих чи інших структурних елементів. Тут під «успішним» вибором структурного елемента вважатимемо випадок, коли додавання певного структурного елемента чи заміна іншого елемента на цей призводить до покращення прогностичних властивостей (точності) моделі-претендента в сенсі використання показника у критерії якості оптимізаційної задачі.

Саме такий підхід використано в удосконаленому методі. Отже, процес розв'язування оптимізаційної задачі (10), (11) складається з чотирьох фаз, які імітують поведінку колонії медоносних бджіл при пошуку найкращих джерел нектару.

*Фаза ініціалізації.* Основним процесом даної фази є ініціалізація основних параметрів методу:  $LIMIT$ ;  $S$ ;  $[I_{\min}; I_{\max}]$ ;  $mcp = 0$  – поточний ітераційний номер;  $MCN$  – визначена кількість ітерацій; визначена множина структурних елементів  $F$ ; сформована початкова множина  $\Lambda_0$  (з потужністю  $S$ ) структур  $\lambda_s$  випадковим вибором набору елементів із множини елементів  $F$ . Кожен структурний елемент із

множини  $F$  пронумеруємо за допомогою десяткових чисел для забезпечення зручності оперування. В такому разі кожен структурний елемент із множини  $F$  кодується десятковим кодом, а кожен структуру  $\lambda_s$  при організації обчислень та формуванні структур замінюємо набором десяткових чисел  $\{N_1, N_2, \dots, N_{ms}\}$ .

Основне завдання при реалізації методу на основі висловленого припущення «про необхідність встановлення пріоритетності обрання структурних елементів із множини на основі їх історії «успішності» вибору», полягає у визначенні та формальному представленні історії «успішності» вибору. Варто зазначити, що «успішність» вибору елементів структури апіорі має ймовірнісну природу. Отже, для опису цих процедур вибору у відомому методі використаємо ймовірнісний підхід.

Тому, на цій фазі ініціалізації, на відміну від відомого методу, додатково поставимо у відповідність кожному структурному елементу  $f_i ([\vec{V}]) \in F$  ймовірність його вибору  $P_i(f_i([\vec{V}])) = P_i$  із усієї множини  $F$ . Відповідно, на початковій фазі ймовірність вибору будь-якого елемента без наявної історії вибору є однаковою для усіх елементів, тобто:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots = P_m = \frac{1}{m}. \quad (14)$$

*Фаза робочих бджіл.* Фаза робочих бджіл в ПМБК, в методі структурної ідентифікації ІДМ, означає перетворення поточних структур у нові. При цьому оператор  $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ , здійснює перетворення структури ІДМ у вигляді (8), на підставі правил ПМБК, пов'язаних із процедурами дослідження робочими бджолами околу відомого джерела нектару. По суті методу структурної ідентифікації, на поточній ітерації реалізації, оператор  $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$  на основі кожної із структур  $\lambda_s$  ІДМ будує одну «нову» структуру  $\lambda'_s$ , що близька до поточної в сенсі співпадіння більшості їх структурних елементів.

Нові структури  $\lambda'_s$  для кожної поточної формуємо випадковим вибором елементів із множини  $F$  та заміни частини елементів, також обраних випадково у поточній структурі  $\lambda_s$ .

Якщо заміна відповідних елементів виявилася успішною, тобто, коли значення критеріальної функції  $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$  оптимізаційної задачі (10), (11) зменшується, то кожному із цих обраних із  $F$   $n_s$ -елементів  $f_i([\vec{V}])$  підвищуємо ймовірність вибору в майбутньому, на підставі частотного методу обчислення ймовірності, а саме:

$$P_i = \begin{cases} P_i + \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)}\right), \text{ якщо: } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \wedge (P_i < \frac{1}{m_s}) \\ P_i, \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \leq \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \vee (P_i \geq \frac{1}{m_s}) \end{cases}, \quad (15)$$

де  $\lambda_s, \lambda'_s$  - означає поточну та новозгенеровану структури відповідно; символи  $\wedge, \vee$

означають операції кон'юнкції та диз'юнкції, відповідно;  $\Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)}\right) \in [1, 2]$  -

значення функції «премії» за успішність вибору даного елемента структури.

При цьому у випадку обчислення ймовірності  $P_i$  за формулою

$$P_i = P_i + \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)}\right), \text{ якщо: } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \wedge (P_i < \frac{1}{m_s}), \quad (16)$$

тобто, у випадку успішності вибору  $n_s$  елементів із множини  $F$ , проводимо перерахунок ймовірності вибору для усіх інших структурних елементів, які не використовувалися для новозгенерованої структури  $\lambda'_s$ . Із цією метою використовуємо таку формулу:

$$P_j = P_j - \left( \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \left( \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)}\right) \right)}{m - n_s} \right), \quad j \neq i. \quad (17)$$

З метою визначення кількості елементів у поточній структурі введено змінну  $n_s$ , значення якої задає кількість елементів поточної структури  $\lambda_s$  моделі, які потрібно замінити іншими структурними елементами. При цьому приймається така гіпотеза: «значення  $n_s$  пропорційно залежне від значення критеріальної функції  $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$  для фіксованої структури». В результаті застосовують таку формулу:

$$n_s = \begin{cases} \text{int} \left( \left( \frac{\min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s = 1 \dots S \}}{1 - \frac{\min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s = 1 \dots S \}}{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}} \right) \cdot m_s \right), \\ \text{if } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \neq \min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s = 1 \dots S \} \text{ and } n_s \neq 0; \\ 1, \text{ if } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) = \min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s = 1 \dots S \} \text{ or } n_s = 0. \end{cases} \quad (18)$$

Зазначена фаза завершується попарною селекцією з метою вибору з поточної та згенерованої структур кращої. Для цього використовуємо оператор попарної селекції із пари структур  $\lambda_s, \lambda'_s$ :

$$D_1(\lambda_s, \lambda'_s): \lambda_s^1 = \begin{cases} \lambda_s, \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \leq \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \\ \lambda', \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \end{cases}. \quad (19)$$

Оператором  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  обираємо «кращі» структури попарним порівнянням із поточних множин  $\Lambda_{mcn}, \Lambda'_{mcn}$  і на основі цього формуємо множину структур першого ряду  $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1, s = 1 \dots S$ .

*Фаза бджіл дослідників.* У ПМБК є процес, коли бджоли-дослідники за ймовірністю обирають нові джерела нектару. В задачі структурної ідентифікації це означає, що необхідно згенерувати певну кількість нових структур на основі існуючої множини відібраних структур, сформованої на попередній фазі. Формування нових структур в «околі» існуючих  $\lambda_s^1$  означає внесення незначних змін в набір структурних елементів кожної із поточних структур. Для виконання цієї процедури спочатку необхідно для кожної структури  $\lambda_s^1$  з  $\Lambda_{mcn}^1$  визначити кількість

$R_s$  структур, які будуть згенеровані на її основі. Зазначений показник  $R_s$  у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії визначає кількість бджіл-дослідників, які обрали відоме джерело-нектару. Характеристикою розміщення джерела нектару (його координатами) в даному випадку є поточна структура  $\lambda_s^1$ .

Для обчислення кількості  $R_s$  ймовірних структур, сформованих на основі поточної, приймаємо припущення: кількість бджіл-дослідників, про які повідомила робоча бджола, прямо пропорційно залежить від його якості.

Отже, цей показник має ймовірнісний характер і ґрунтується на визначенні для поточного джерела нектару ймовірності того, що сформована група бджіл-дослідників зупиниться саме на околі  $s$ -того джерела нектару.

Таким чином, для обчислення ймовірної кількості новосформованих структур ІДМ на основі поточної структури спочатку для кожної структури обчислюємо цю ймовірність  $P_s(\lambda_s^1)$  на підставі якості кожної із поточних структур, яка як відомо є значенням критеріальної функції  $\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s)$  оптимізаційної задачі (10), (11):

$$P_s(\lambda_s^1) = \frac{1}{\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s) \cdot \sum_{s=1}^S \frac{1}{\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s)}}, s = 1 \dots S - 1. \quad (20)$$

Тоді, на підставі цієї ймовірності, обчислюємо ймовірні значення кількості «нових» сформованих наборів структур моделей, які формуються на основі відомої структури  $\lambda_s^1$  за наступним співвідношенням:

$$R_s = \text{ToInt}(P_{s-1}(\lambda_{s-1}^1) \cdot S), s = 2 \dots S, R_1 = 0. \quad (21)$$

Далі на цій фазі використовуємо оператор  $O_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$ , який здійснює перетворення кожної структури відповідно до процедури в ПМБК «дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками». Тільки на відміну від фази бджіл розвідників, де формувалася в околі поточної одна структура, в даному випадку визначення кількості структур навколо поточної здійснюється за допомогою виразу (21) на основі ймовірності, обчисленої за виразом (20).

Отже, можемо стверджувати, що оператор  $O_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$  подібний до оператора  $O_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$  і означає перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  з  $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcs}^1$  першого ряду формування, які згенеровані на  $mcs$  ітерації методу, у множини структур  $\lambda_s'$  (де  $s = 1 \dots S$ ). Його подібність полягає в тому, що як і у випадку застосування оператора  $O(\Lambda_{mcs}, F)$  на фазі робочих бджіл ПМБК, на цій фазі нові  $R_s$  структур  $\lambda_s'$  для кожної поточної формуємо випадковим вибором елементів із множини  $F = \{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}]) \}$  та заміни частини елементів у поточній структурі  $\lambda_s^1$  також обраних випадково. При цьому в кожному випадку використовуємо вже «адаптований», на основі формул (15)-(17), на попередніх ітераціях закон розподілу ймовірності вибору структурних  $\{ f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}]) \}$  елементів.

На завершальному етапі цієї фази обчислюємо новий «адаптований» на основі формул (15)-(17) закон розподілу ймовірності вибору структурних елементів. При цьому спираємося на обчислені значення критеріальної функції задачі (10), (11).



Далі проводимо групову (на відміну від випадку фази робочих бджіл, де проводили попарну селекцію) селекцію «кращої» структури із поточної та сформованої в її околі множини. З цією метою використовуємо оператор групової селекції  $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$ , який здійснює процес синтезу множини «кращих» структур інтервальної моделі  $\Lambda_{mcn}^2$  із визначених множин  $\Lambda_{mcn}^1$  та  $\Lambda''_{mcn}$  за допомогою селекції структур  $\lambda_s^2$  на основі показників якості, де  $\Lambda''_{mcn} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}, s=1..S$ . Цей оператор виконує процедури порівняння якості структур за аналогією оператора  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  (19), але на відміну від останнього, обирає по одній структурі із кожної групи, сформованої для кожної із поточних структур. Таким чином, в результаті застосування цього оператора отримуємо для другого ряду формування  $\Lambda_{mcn}^2$  множини структур ІДМ і при цьому кількість обраних структур завжди залишається рівною  $S$ .

З метою уникнення зациклень при попаданні в локальний мінімум критеріальної функції мети оптимізаційної задачі (10), (11) використовуємо процедури ПМБК на *фазі бджіл-розвідників*.

Зазначена фаза ПМБК необхідна для обрання нових джерел нектару внаслідок вичерпання поточних джерел нектару. В методі структурної ідентифікації ця фаза реалізується у спосіб формування нових структур випадковим чином. При цьому всі елементи структури обираються випадково із множини  $F$  точно так, як на фазі ініціалізації.

Саме для цього для кожної поточної структури  $\lambda_s$  на фазі ініціалізації і на наступних фазах формування нових структур уводимо лічильник  $Limit_s$ , зміна значення якого в ПМБК моделює процес зменшення кількості нектару згідно із процедурою знаходження вичерпаних джерел нектару. Отже, кожна структура  $\lambda_s^2$  моделі, для якої виконується умова  $Limit_s \geq LIMIT$ , вважатиметься локальним мінімумом.

Генерування нових структур у такому випадку здійснюємо оператором  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ , який генерує «нову» структуру  $\lambda_s^2$  випадковим чином з множини  $F$  всіх елементів структури, де їх кількість визначається також випадково, вибором відповідного числа з інтервалу  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ .

В дисертації також наведено обґрунтування введених виразів (15)-(17) для адаптивного налаштування закону розподілу ймовірності вибору структурних  $\{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$  елементів, а також представлено алгоритм реалізації методу.

Таким чином, наведені зміни в обчисленнях на кожній із зазначених фаз ПМБК дають можливість адаптивно налаштовувати процедури вибору структурних елементів для ІДМ, виходячи із обчислення на кожній ітерації ймовірностей вибору  $P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_m$  для кожного елемента. Такий підхід встановлює пріоритетність для вибору одних структурних елементів над іншими. Далі в дисертаційній роботі наведено результати дослідження обчислювальної складності реалізації методу.

На прикладах структурної ідентифікації ряду інтервальних дискретних моделей показано, що при реалізації цього методу досягається зниження обчислювальної складності у порівнянні із відомим методом на 4% - для задач з

невеликою розмірністю, а саме для 2 параметрів моделі, а із зростанням розмірності задачі до 6 параметрів в моделі досягається зниження обчислювальної складності у порівнянні із відомим методом на 21.48%. У таблиці 1 наведено результати дослідження обчислювальної складності реалізації методу з адаптивним налаштуванням вибору елементів для проведених обчислювальних експериментів.

Таблиця 1 – Порівняння обчислювальної складності

|                                                       | Експеримент №1              |                                             | Експеримент №2              |                                             | Експеримент №3              |                                             |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
|                                                       | Кількість параметрів моделі | Кількість ітерацій знаходження функції мети | Кількість параметрів моделі | Кількість ітерацій знаходження функції мети | Кількість параметрів моделі | Кількість ітерацій знаходження функції мети |
| Метод ПМБК з випадковим вибором структурних елементів | 2                           | 15566861                                    | 4                           | 19789004                                    | 6                           | 25412347                                    |
| Метод ПМБК з адаптивним налаштуванням                 | 2                           | 15028474                                    | 4                           | 18106271                                    | 6                           | 19953774                                    |
| Зниження обчислювальної складності, у %               | 4%                          |                                             | 8.5%                        |                                             | 21.48%                      |                                             |

Як бачимо з таблиці 1, із збільшенням розмірності та складності задачі ідентифікації ефективність застосування процедури адаптивного налаштування вибору структурних елементів зростає.

У **третьому розділі** запропоновано нову концепцію ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, яка передбачає поєднання методів аналізу інтервальних даних, знання-орієнтованого підходу як до опису предметної області досліджуваного об'єкта так і області побудови даного класу математичних моделей із використанням онтології. У цьому розділі на підставі новоствореної концепції подано результати розробки нового гібридного методу структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів. Наведено дослідження щодо створення та використання репозиторію ряду інтервальних дискретних моделей в сфері екології, який вміщує онтологічний опис як предметної області застосування цих моделей, так і умови їх розробки.

Оскільки методи моделювання складних систем, побудовані на основі інтервального аналізу даних, вимагають мінімальної кількості інформації про досліджувану систему, то їх використання суттєво збільшує клас аналізованих систем.

Разом із тим ці методи для використання як дослідниками, так і користувачами-практиками є значно обмеженим, а тому розробка онтологічного підходу для даного напрямку математичного моделювання, який є більш практично-орієнтованим ніж підходи, які пропонуються в межах інших напрямків математичного моделювання. Потреба в автоматизованому, систематичному, багаторазовому використанні математичних моделей, як середовища отримання, накопичення та багаторазового використання знань цілком виправдана в контексті

великої кількості інформації про процес та продукцію знань, що генеруються та зберігаються.

Онтологія математичного моделювання на основі інтервальних даних, дозволяє розширити можливість дослідників об'єктів різної природи, дані з яких отримуємо в інтервальному виді, а також практиків при застосуванні для моделювання процесів в медичних галузях, галузях екологічного моніторингу та інших. Декларативна частина онтологічного підходу складається з онтології формалізованих математичних моделей (декларативна онтологія), яка містить визначення моделей та інформаційний репозиторій. Онтологія використання математичних моделей (операційна онтологія) містить проектні дані, умови експлуатації, параметри обладнання для використання моделей. Модельна онтологія складається з модельного класу, який має як атрибути та екземпляри. Клас рівнянь, який позначає модельні рівняння (інтегральні рівняння, алгебраїчні рівняння або функції), параметри моделі, залежні та незалежні змінні, універсальні класи констант.

Усі вищезазначені атрибути класу моделі по суті описують знання про модель інтуїтивно зрозумілим і явним чином, що робить модельне представлення більш систематичним, комп'ютерно-інтерпретованим та узагальненим за своєю суттю.

Особливістю пропонованого підходу є те, що компоненти створеної таким чином моделі є повністю і 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.

Онтологія формалізованих математичних моделей містить функціональне представлення моделі у вигляді графічної інтерпретації для діагностики неточностей на основі вдосконаленої моделі. На рисунку 1 представлено підмножину понять і відношень, які зафіксовані в загальній онтологічній моделі.

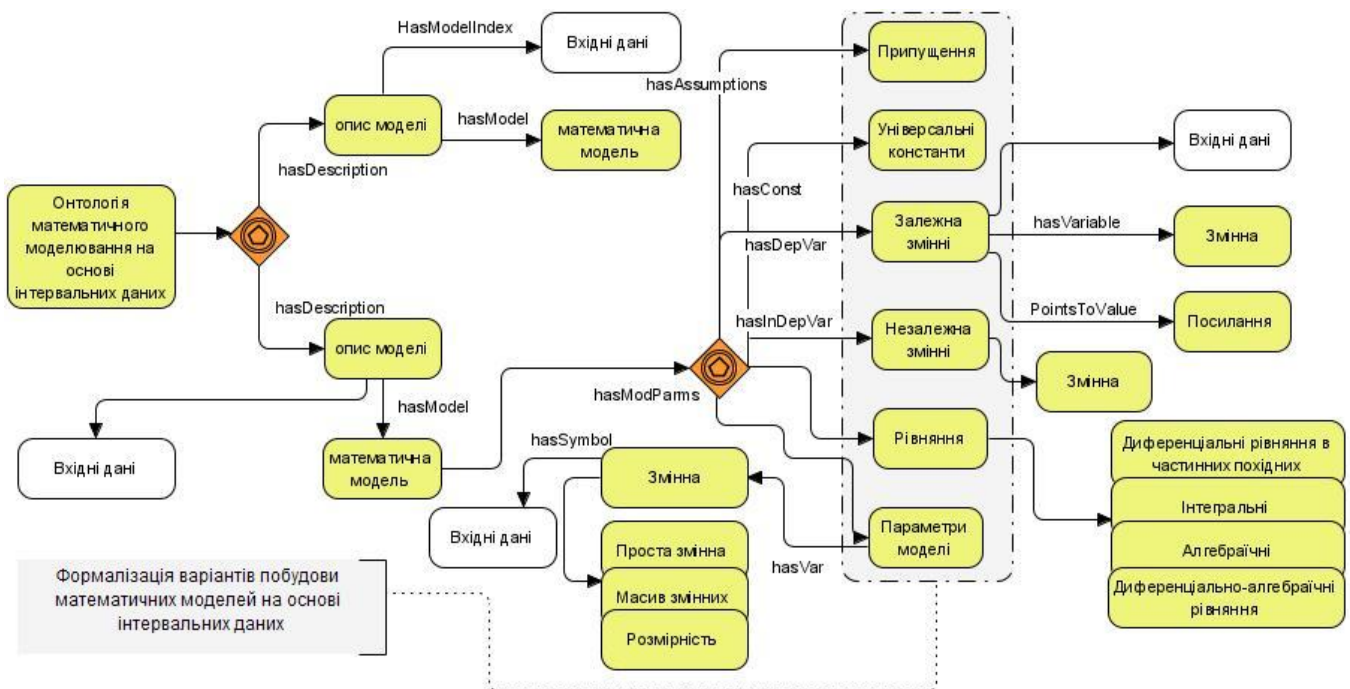


Рисунок 1 – Схема опису онтології математичних моделей на основі інтервальних даних

Онтологія математичної моделі складається з операційного класу, підкласами якого є різні операції, які виникають в процесі реалізації моделі, а також містять умови реалізації кожної з операцій. Ця онтологія також складається з класу результатів, у якому зберігається результати розв'язку моделі, а також результати проведення експериментів.

Процедурна частина онтологічного підходу складається з механізму побудови на основі методів аналізу даних відношень, які аналізують рівняння в онтологічній інтерпретації математичних моделей та переводять їх у вирази, які можна інтерпретувати в інші зовнішні програмні середовища.

На основі аналізу структури математичних моделей на основі інтервальних даних, процесу моделювання та особливостей проведення експериментів, математичну модель  $Mm$  з токи зору онтологічного підходу можна формалізувати за допомогою наступних структур:

$$Mm = \langle Ma, Mi, Mo, Par, Mr, Mc, Mmt \rangle, \quad (22)$$

де  $Ma$  - предметна область, в межах якої будується або використовується математична модель;  $Mi$  - описи математичної моделі;  $Mo$  - множина об'єктів використання моделі;  $Par$  - множина параметрів;  $Mr$  - множина, яка описує результат побудови моделей об'єктів;  $Mc$  - множина характеристик перебігу експериментів;  $Mmt$  - множина методів ідентифікації параметрів моделей.

$$Ma = \langle IdMa, NmMa \rangle, \quad (23)$$

де  $IdMa$  - ідентифікатор вибраної предметної області;  $NmMa$  - предметна область.

Описи математичної моделі мають наступну структуру:

$$Mi = \langle IdMi, NmMi, IdMa \rangle, \quad (24)$$

де  $IdMi$  - ідентифікатор рівняння;  $NmMi$  - формалізований опис рівнянь математичної моделі;

Структура опису множини об'єктів, де може бути використана модель, має наступне представлення:

$$Mo = \langle IdMo, NmMo, IdMa, IdMi \rangle, \quad (25)$$

де  $IdMo$  - ідентифікатор об'єкта;  $NmMo$  - інформація, що описує структуру об'єкта використання моделі. Опис кортежу набору параметрів можна представити за допомогою наступного відношення:

$$Par = \langle IdPar, PT, PV, IdMa, IdMi, IdMo \rangle, \quad (26)$$

де  $IdPar$  - ідентифікатор параметра;  $PT$  - тип параметра;  $PV$  - значення параметрів моделі.

Представлення результатів побудови моделей об'єктів виглядає наступним чином:

$$Mr = \langle IdMr, RNm, IdMa, IdMi, IdMo \rangle, \quad (27)$$

де  $IdMr$  - ідентифікатор результату;  $RNm$  - твердження, які описують результат.

Характеристики опису експериментів представлені наступним відношенням:

$$Mc = \langle IdMc, MA, Dsc, IdMa, NA, IdMo, IdMi, IdPar \rangle, \quad (28)$$

де  $IdMc$  - ідентифікатор ознак, які впливають на умови проведення експериментів;  $MA$  - основні характеристики;  $Dsc$  - твердження, яке описує умови використання математичної моделі;  $NA$  - альтернативні характеристики.

Кортеж для множини методів структурної ідентифікації  $SuMth$  математичної моделі представлено наступним відношенням:

$$SuMth = \langle IdMmt, NmMth, Ac, IdMth \rangle, \quad (29)$$

де  $IdMmt$  – ідентифікатор методу;  $NmMth$  – метод ідентифікації структури моделі;  $Ac$  — набір операторів, що визначає метод,  $IdMth$  — ідентифікатор методу параметричної ідентифікації.

Набір методів ідентифікації параметрів моделей буде представлено наступним чином

$$Mth = \langle IdMth, NmMth, Ac \rangle, \quad (30)$$

де  $IdMth$  – ідентифікатор методу параметричної ідентифікації моделі;  $NmMth$  – метод структурної ідентифікації моделі;  $Ac$  — це множина операторів, що визначає метод.

Виходячи із формалізації математичних моделей та схеми їх використання, запропоновано гібридний метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, який на відміну від існуючих ґрунтується на поєднанні методів інтервального аналізу, поведінкових моделей бджолоїної колоній та знання-орієнтованому підході опису предметної області об'єктів на основі онтології.

Вибір математичної моделі спочатку здійснюється на основі аналізу вибраної або суміжної предметної області. Для забезпечення найкращої результативності формалізованої математичної моделі вибираємо її параметри та бажаний результат її розв'язання. Для подолання невизначеності використання математичної моделі визначаємо множину потенційних методів ідентифікації, що можуть бути використані. Взаємодія параметрів, умов перебігу та методів ідентифікації супроводжується інформаційними потоками, що дозволяють їх в майбутньому значно розширити або вдосконалити.

Представимо цей метод у вигляді послідовності кроків:

1) фіксуємо  $IdMa\_C$  предметної області, яка вибирається користувачем в ході використання. Позначення “ $\_$ ” означає префікс вибору,  $C$  - процедуру вибору. Результатом є запропонований набір математичних моделей для набору об'єктів  $Mo\_C$ .

2) Вибираємо об'єкт використання математичної моделі. Формальний опис цієї процедури наступний:

$$Mo\_C = \pi_{IdMo, NmMo} \left( \sigma_{Mo(Idma)=IdMa\_C \wedge Mo(IdMi)=IdMi\_C} (\tau(Mo)) \right), \quad (31)$$

де  $\pi$  – операція проєкції алгебри кортежів,  $\sigma$  – операція вибірки з множини за заданими атрибутами та умовами,  $\tau$  – операція впорядкування за значеннями відповідних атрибутів.

Результатом операції є вибраний об'єкт із набором можливих моделей, якщо такі є в репозиторії.

3) Вибираємо умови застосування моделі за наступною формальною процедурою:

$$Mc\_C = \pi_{IdMc, Dsc, IdPar} \left( \sigma_{\substack{Mc(Idma)=IdMa\_C \wedge Mc(IdMi)= \\ =IdMi\_C \wedge Mc(IdMo)=IdMo\_C}} (Mc) \right). \quad (32)$$

4) Вибір моделі. Цей процес здійснюємо за допомогою наступної процедури:

$$Mi\_C = \pi_{IdMi, IdMc, NmMi} \left( \sigma_{Mi(IdMa)=IdMa\_C \wedge Mc(IdMc)}(\tau(Mi)) \right). \quad (33)$$

5) Щоб вибрати  $Mi\_C$  і  $Mb\_C$ , формується набір, який представляє результати побудови об'єктних моделей за допомогою наступного опису:

$$Mr\_C = \pi_{IdMr, RNm} \left( \sigma_{\substack{Mr(IdMa)=IdMa\_C \wedge Mr(IdMi)= \\ =IdMi\_C \wedge Mr(IdMo)=IdMo\_C}}(\tau(Mr)) \right). \quad (34)$$

Якщо в репозиторії немає адекватних моделей для опису об'єкта, продовжуємо процес побудови моделі.

6) Вибір умов застосування моделі (характеристики проведення експерименту):

$$Mc\_C = \pi_{IdMc, Dsc, IdPar} \left( \sigma_{\substack{Mc(IdMa)=IdMa\_C \wedge Mc(IdMi)= \\ =IdMi\_C \wedge Mc(IdMo)=IdMo\_C}}(Mc) \right). \quad (35)$$

7) Користувач обирає метод ідентифікації структури моделі за наступною процедурою:

$$Mmt\_C = \pi_{IdMmt, IdMth} \left( \sigma_{\substack{Mmt(IdMa)=IdMa\_C \wedge Mmt(IdMi)= \\ =IdPi\_C \wedge Mmt(IdMo)=IdMo\_C \wedge Mmt(IdPar)=Par\_C}}(Mmt) \right). \quad (36)$$

8) Визначаємо структуру моделі та відповідну множину параметрів моделі:

$$SuMth\_C = \pi_{IdMmt, Ac, IdMth} \left( \sigma_{\substack{SuMth(IdMa)=IdMa\_C \wedge SuMth(IdMi)= \\ =IdMi\_C \wedge SuMth(IdMo)= \\ =IdMo\_C \wedge SuMth(IdMth)=IdPar\_C}}(\tau(SuMth)) \right), \quad (37)$$

$$Par\_C = \pi_{IdPar, Ac} \left( \sigma_{\substack{Par(IdMa)=IdMa\_C \wedge Par(IdMi)= \\ =IdMi\_C \wedge Par(IdMo)=IdMo\_C}}(\tau(Par)) \right). \quad (38)$$

Результатом цієї операції є множина моделей для відповідних вибраних об'єктів в рамках досліджуваної предметної області.

9) Для деяких  $Mi$  і  $Mo$  формується множина, яка описує результати побудови моделі:

$$Mr\_C = \pi_{IdMr, RNm} \left( \sigma_{\substack{Mr(IdMa)=IdMa\_C \wedge Mr(IdMi)= \\ =IdMi\_C \wedge Mr(IdMo)=IdMo\_C}}(\tau(Mr)) \right). \quad (39)$$

Виконання кроків 1-5 дає можливість вибрати адекватну модель опису досліджуваного об'єкта в репозиторії інтервальних математичних моделей. Кроки 1, 2, 6-9 використовуються у разі відсутності математичних моделей у репозиторії.

Запропонований метод дозволяє вибрати модель з відповідними параметрами, яка найкраще задовольняє відповідні умови, описує ситуацію і знаходиться у досліджуваній або суміжній із досліджуваною предметній області, а запропонований онтологічний опис дає можливість розробити функціональне програмне середовище для моделювання на основі інтервальних даних.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що гібридний метод ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів ефективніший у порівнянні з відомими методами ідентифікації, а при знаходженні

структури моделі у репозиторії для подібних за функціонуванням об'єктів обчислювальна складність зменшується у 18795 разів за рахунок уникнення процедури структурної ідентифікації.

У **четвертому розділі** запропоновано та обґрунтовано *метрику оцінки актуальності інформації на різних веб-ресурсах*. На цій основі розроблено *метод верифікації моделей, який ґрунтується на поєднанні методу фільтрування даних та застосуванні метрик оцінки актуальності інформації, що у сукупності забезпечує повноту моделі та знижує обчислювальну складність на її ідентифікацію*. Досліджено їх ефективність та показано можливості їх застосування для забезпечення повноти моделі.

Особливо важливим моментом є забезпечення повноти структури інтервальної математичної моделі. Це насамперед пов'язано із сутністю самого підходу до математичного моделювання на основі інтервального аналізу, який вимагає мінімальної кількості інформації про досліджувану систему. Тому дуже важливим моментом є те, що ця мінімальна кількість інформації достатньо повно описувала досліджуваний об'єкт та дозволяла забезпечити повноту структури моделі.

Верифікація моделі на реальних даних дозволяє оцінити адекватність побудованої математичної моделі. Вибірка таких даних може бути отримана або на основі відповідних вимірювань, або з достовірних інформаційних джерел.

Досліджуючи якість та достовірність інформації, виділено основні характеристики, які можна застосувати для оцінки актуальності інформації про сервіси. Пропонується базову множину показників, які будуть використані для демонстрації ефективності методу оцінки неактуальної інформації в корпоративних інформаційних системах.

Інтерпретованість ( $I_p$ ) - визначає наявність метаданих та документації для правильної інтерпретації (функціональних та нефункціональних) властивостей сервісів. Ця метрика дозволяє побудувати систему зважених коефіцієнтів для класифікації службових документів, які використовуються при реалізації сервісів. У таблиці 2 представлено опис властивостей, які використовуються для оцінки інтерпретованості.

Таблиця 2 – Типи показників та інформації для оцінки інтерпретованості

| Тип (Тип)             | Інформація про сервіс                          | Приклади                                                                                                   |
|-----------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $P$ (Патерн)          | Сервіси та схеми їх формування та використання | Web Services Description Language, WSDL, умови запиту та відповіді, моделі даних                           |
| $D$<br>(Документація) | Документи                                      | Опис методів API                                                                                           |
| $Nh$                  | Нефункціональні властивості                    | QoS, локація, локалізація, доступність, надійність, відповідь, час відгуку, актуальність відповіді ресурсу |
| $Fd$                  | Першоджерело                                   | Версії патернів, нефункціональні характеристики                                                            |
| $Rs$                  | Достовірність джерела                          | Довірена доменна зона, зареєстрований програмний продукт в сертифікованому центрі                          |

Виходячи із представлених типів інформації, показник інтерпретованості  $I_p$  оцінюємо наступним співвідношенням:

$$I_p = \sum estimation(type_i) \times v_i / \sum v_i, \quad (40)$$

де  $v(type_i) \in [0,1]$ ,  $\sum v(type_i) = 1$  та  $estimation(type_i) \in [0,1]$  – вагові коефіцієнти, які визначають значимість показників для оцінки інтерпретованості та коефіцієнти, які визначають ступінь доступності інформації, відповідно для кожного типу із набору  $type_i \in \{P, D, Nh, Fd, Rs\}$ .

Оцінка  $estimation(type_i)$  може бути отримана з використанням спеціальних програмних засобів (парсерів, аналізаторів), які збирають та класифікують інформацію такого аналізованого типу.

Іншими важливими показниками, від яких залежить актуальність інформації, яку отримуємо на основі сервісів, є повнота  $F$  та своєчасність  $T$ . Показник повноти (41) визначає відношення між отриманими нефункціональними показниками  $Nh_p$  та їх мінімальним визначеним набором  $Nh_{min}$ .

Показник  $Nh_{min}$  включає всі показники  $Nh_p$ , які вважаються релевантними для вибору сервісу, який надається компанією чи організацією, яка, своєю чергою, є власником інформаційної системи. Наприклад,  $Nh_{min}\{A, R, An, Tm\}$ , де  $A$  – доступність,  $R$  – надійність,  $An$  – відповідь,  $Tm$  – тривалість отримання відповіді.

$$F = 1 - \frac{\|Nh_p \cap Nh_{min}\|}{Nh_{min}}. \quad (41)$$

Показник своєчасності  $T$  визначає наскільки актуальним є опис нефункціональних характеристик  $Nh$ . Показник своєчасності визначається як відношення перевірених часових характеристик  $T_{exp}$  та їх імплементованих значень  $T_{norm}$ :

$$T = 1 - \min\left(\frac{T_{exp}}{T_{norm}}, 1\right). \quad (42)$$

Вперше при розробці комп'ютерного середовища для інтервального моделювання, запропоновано та обґрунтовано метод верифікації моделей, який на відміну від існуючих ґрунтується на поєднанні методу фільтрування даних та застосуванні метрики оцінки актуальності інформації, що у сукупності забезпечує повноту моделі та знижує обчислювальну складність на її ідентифікацію.

На основі метрики оцінки актуальності інформації можна сформулювати метод фільтрування даних, який базується на двох основних типах описів: на основі всіх службових документів або на основі описів нефункціональних характеристик  $Nh$ .

Для реалізації методу фільтрування даних, за допомогою метрики необхідно встановити зважені коефіцієнти та визначити коефіцієнти для різних типів службових документів. Встановлення цих коефіцієнтів можна здійснити, наприклад, на основі службової інформації, яка надається власником сервісної системи, але зважені коефіцієнти для нефункціональних властивостей будуть залежати від сформованого запиту.



На рисунку 2 представлено процедуру визначення зважених коефіцієнтів для нефункціональних властивостей.

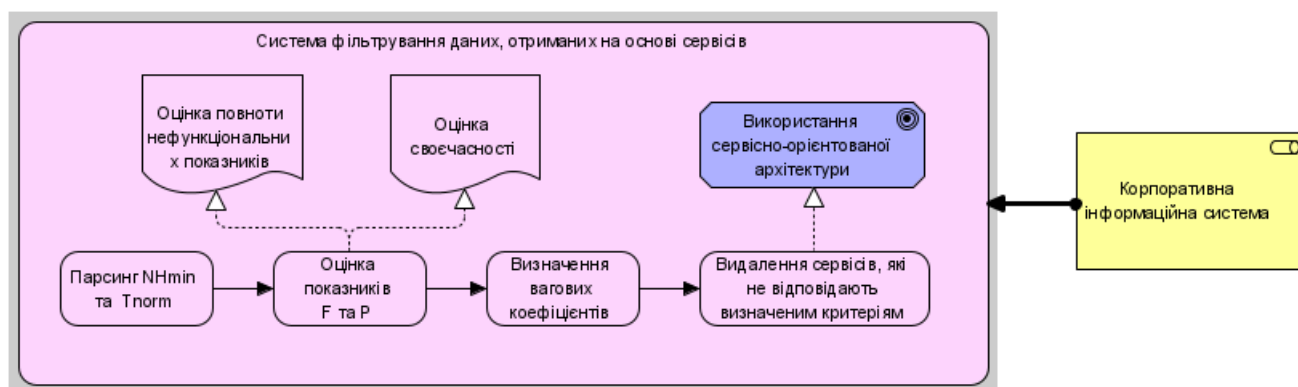


Рисунок 2 – Схема методу фільтрування даних, на основі сервісів

Як бачимо з наведеної схеми, метод фільтрування даних передбачає такі етапи:

- на основі показників оцінки актуальності інформації, які сформовані в метриці інтерпретованості  $I_p$  необхідно встановити вагові коефіцієнти та оцінити кожен тип  $(P, D, Nh, Fd, Rs)$  показників для кожного сервісу;
- встановлення залежності між інформацією, яка надана корпоративною системою, та показниками, які отримані на основі конкретних запитів;
- на наступному етапі, виходячи із сформованого набору запитів, необхідно визначити показники  $Nh_{\min} \{A, R, An, Tm\}$  та  $T_{norm}$ ;
- проведення оцінки на основі метрики оцінки актуальності інформації (показники повноти та своєчасності);
- встановлення порогів для фільтрації нерелевантних джерел надання інформації через сервіси;
- фільтрація сервісів, інформація з яких знаходиться нижче встановленої межі.

Метод фільтрування даних доцільно використовувати перед вибором власника сервісів (корпоративної інформаційної системи) з метою якісного формування комунікаційної складової для отримання лише актуальної та достовірної інформації.

Запропоновані методи дозволяють значно підвищити якість оцінки актуальності інформації, що безпосередньо впливає на ефективність побудови математичних моделей в розрізі забезпечення повноти структури моделі, опису об'єкта моделювання, стійкості до зміни стану середовища чи умов отримання інтервальних даних.

У **п'ятому розділі** дисертаційної роботи представлено *нове комп'ютерне середовище для математичного моделювання на основі інтервальних дискретних моделей складних об'єктів, яке ґрунтується на знання-орієнтованому підході опису області побудови даного класу математичних моделей із застосуванням онтології, що забезпечує його адаптацію та інтерпретацію в програмний код під задану предметну область та під конкретні вимоги користувача*. Наведено елементи рішень цього середовища, наприклад, реалізована відкрита архітектура програмного забезпечення, діаграми класів та реляційні моделі баз даних. Також описано програмну реалізацію комп'ютерного середовища з елементами користувацького інтерфейсу.

В процесі виконання дисертаційного дослідження було створено нове комплексне програмне середовище для моделювання складних об'єктів у вигляді інтервальних різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних, яке забезпечує спрощення доступу користувачів до запропонованих засобів моделювання.

Програмний комплекс належить до класу об'єктно-орієнтованих систем, розроблений із використанням технології Spring Framework на мові програмування Java, а також інтерпретатором Python. В якості Python інтерпретатора було обрано Jython, який повністю написаний на Java і добре підходить для реалізації спеціалізованих аплетів. Загальна архітектура комплексу представлена на рисунку 3.

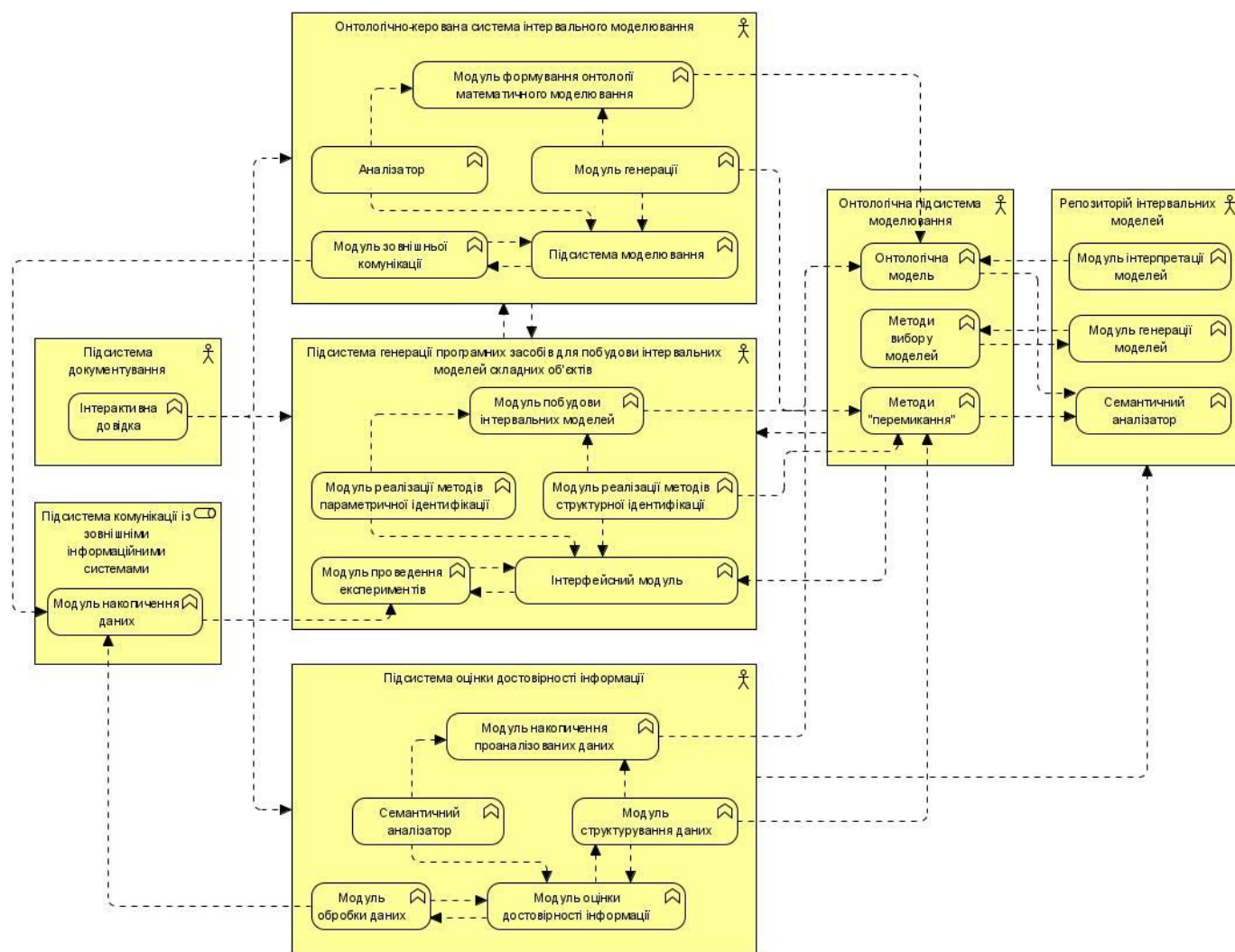


Рисунок 3 – Загальна архітектура програмного комплексу

Із представленої архітектури програмного комплексу можна виділити декілька основних підсистем:

- онтологічно-керована система інтервального моделювання, яка включає модуль формування онтології математичного моделювання, модуль генерації, модуль реалізації семантичного аналізатора, модуль зовнішньої комунікації, модуль моделювання;

- онтологічна підсистема моделювання, яка включає модуль представлення самої онтологічної моделі, модуль реалізації методів вибору моделей, модуль перемикавання параметрами у зв'язку із зміною умов моделювання;

- підсистема «Репозиторій інтервальних моделей», яка включає модуль інтерпретації моделей, модуль генерації моделей, семантичний аналізатор;
- підсистема «Репозиторій інтервальних моделей», яка включає модуль інтерпретації моделей, модуль генерації моделей, семантичний аналізатор;
- підсистема оцінки достовірності інформації, яка включає модуль обробки даних, які отримані із зовнішніх інформаційних систем, семантичний аналізатор, модуль оцінки достовірності інформації, модуль структурування даних та модуль накопичення проаналізованих даних;
- підсистема генерації програмних засобів для побудови інтервальних моделей складних об'єктів, яка включає модуль побудови інтервальних моделей, модулі реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації, модуль проведення експериментів та інтерфейсний модуль;
- підсистема комунікації із зовнішніми інформаційними системами, яка використовується для збору та накопичення даних з метою їх використання в середовищі моделювання;
- підсистема документування, яка використовується з метою формування інтерактивної довідки із описом основних особливостей використання програмного комплексу для моделювання складних об'єктів.

Програмний комплекс складається із шести великих компонент, які об'єднані у відповідні підсистеми, які детально представлено на рисунку 4.

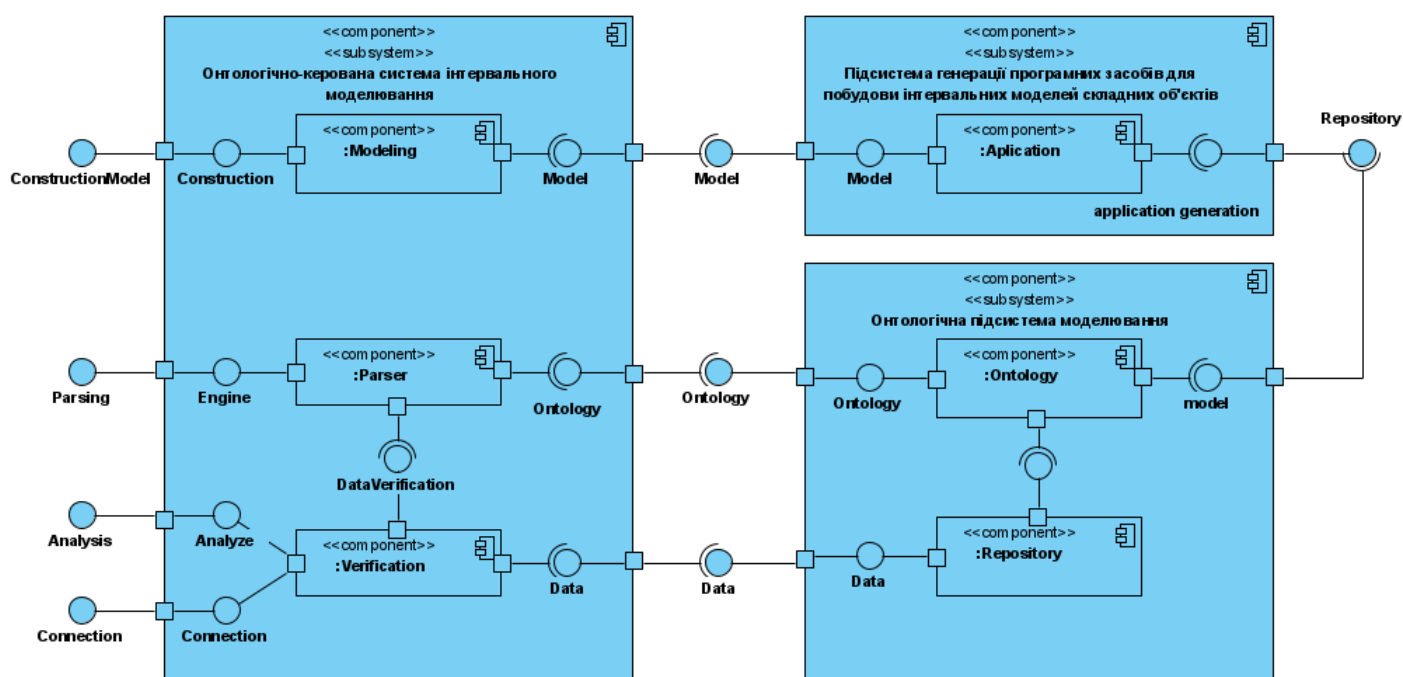


Рисунок 4 – Діаграма компонентів програмного комплексу для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу

Перша компонента Modeling є основою для реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації. Друга компонента Parser, слугує засобом для реалізації методів аналізу та структурування даних. Третя компонента Verification є основою для реалізації методів оцінки достовірності та актуальності отриманої в процесі аналізу інформації. Четверта компонента слугує базою для реалізації онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних. П'ята компонента Repository є основою для формування репозиторію математичних моделей. Шоста

компонента Application використовується для генерування інструментальних засобів для математичного моделювання в межах вибраної предметної області.

Як видно з рисунка 4, взаємодія між компонентами реалізована за допомогою відповідних класів – Data, Ontology, Model, ApplicationGeneration, Repository.

Генерація інструментальних засобів для математичного моделювання здійснюється у формі окремого веб-додатку, а в якості веб-сервера, що написаний на Java, використовується Apache Tomcat.

Знання-орієнтований підхід на базі онтології програмно імплементовано до формалізації як самих математичних моделей на основі інтервальних даних, так і формалізації особливостей їх використання (рисунк 5).

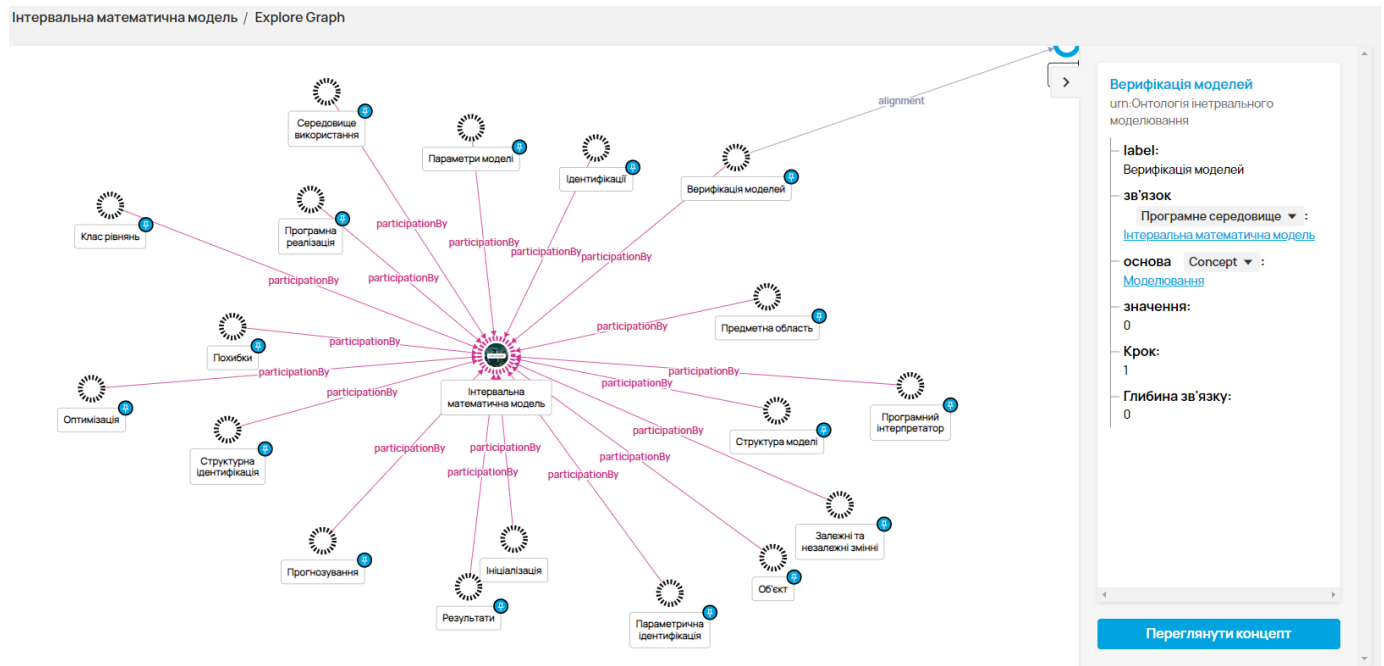


Рисунок 5 – Представлення фрагмента онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу у формі онтологічного графа

Такий підхід дозволяє значно спростити процес створення математичної моделі, маніпулювання, повторного використання та апробації у реалізованому програмному середовищі, так і спрощує процес синхронізації у відповідних зовнішніх програмно-інтерпретованих середовищах.

**Шостий розділ** присвячено застосуванню розроблених методів, репозиторію інтервальних моделей та програмного комплексу для моделювання характеристик складних об'єктів до розв'язування прикладних задач, а саме: для моделювання електрофізіологічних характеристик тканин хірургічної рани в задачах виявлення місцезнаходження зворотного гортанного нерва під час операцій на щитоподібній залозі; моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту; моделювання динаміки реакцій користувачів на повідомлення в тематичних групах соціальних мереж. Досліджено ефективність застосування розроблених методів для розв'язування низки прикладних задач.

На початку розділу розглядається процес побудови математичної моделі електрофізіологічних характеристик тканин хірургічної рани в задачах виявлення місцезнаходження зворотного гортанного нерва під час операцій на щитоподібній залозі.

Використовуючи онтологію математичного моделювання на основі інтервальних даних, а також реалізований програмний комплекс для математичного моделювання з використанням інтервального та онтологічного підходів, побудовано репозиторій інтервальних математичних моделей для виявлення зворотного гортанного нерва та наведено приклади генерації відповідних інструментальних засобів.

Останнім часом технологія визначення локалізації зворотного гортанного нерву (ЗГН) під час операції на щитовидній залозі використовує інтервальні різниці рівняння. Підлаштувати їх під конкретного пацієнта легше, оскільки в процесі операції достатньо вибрати одну з раніше побудованих моделей для оперованих пацієнтів і налаштувати різницеву схему для наступного пацієнта. Для цього хірургу достатньо провести кілька подразнень тканин операційної рани імпульсним струмом силою до 2 мА. Однак і в цьому випадку ситуація складна. Часто такі моделі є неточними, а відповідно сама технологія стає неефективною.

Попередні спостереження за хворими під час ряду операцій на щитовидній залозі показали, що електрофізіологічні властивості тканин операційної рани хворих значною мірою залежать від патології щитовидної залози. Тому було вирішено удосконалити існуючу технологію за рахунок використання онтологічної моделі, яка містить усі набуті знання про патології пацієнтів, які перенесли операцію з видалення пухлини щитоподібної залози.

Розглянемо особливості побудови наведеної моделі у вигляді інтервального різницевого рівняння. Припустимо, ми провели серію подразнень тканин операційної рани силою струму до 2 мА. Нехай результати цих стимулів отримали характеристики інформаційного сигналу в інтервальному вигляді. Тоді результати цих подразників представлені наступним чином:

$$[z_{i,j}] = [z_{i,j}^-, z_{i,j}^+], i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, [z_0(i,j)] \in [z_{i,j}^-, z_{i,j}^+], \quad (43)$$

де  $[z_0(i,j)]$  – значення сигналу, отриманого після обробки даних реакції на подразнення хірургічної рани  $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$ ;  $z_{i,j}^-, z_{i,j}^+$  – мінімальне та максимальне значення коридору амплітуди сигналу;  $i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J$  – дискретні координати просторового розподілу характеристик операційної рани.

У формулі (43) враховуються основні похибки технічних або інших засобів. Модель ідентифікації ЗГН розглядається як дискретне рівняння, тобто різницеве рівняння у наступному вигляді:

$$[\hat{v}_{i+1,j+1}] = [\hat{v}_{i+1,j+1}^-; \hat{v}_{i+1,j+1}^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{i,j}]) \cdot \hat{g}, \quad (44)$$

$$i = d + 1, \dots, I, j = d + 1, \dots, J,$$

де  $\vec{g}$  – вектор невідомих параметрів дискретного різницевого рівняння;  $d$  – порядок різницевого рівняння;  $\vec{f}^T(\bullet)$  – вектор спеціальних функцій, можуть бути лінійними, що визначають структуру дискретного рівняння;  $\hat{v}_{i,j}$  – прогнозоване значення головної амплітуди в точці із заданими дискретними координатами  $i, j$ .

Виходячи з умов (44) гарантування точності математичної моделі в межах точності основного проведеного експерименту, рівняння (45) буде налаштовано за вказаним критерієм:

$$[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] \subset [z_{i,j}^-; z_{i,j}^+], \forall i = 1, \dots, I, \forall j = 1, \dots, J. \quad (45)$$

Підставляючи у формулу (45) іншу рекурентну формулу (44) замість інтервальних оцінок  $[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+]$ , отримуємо інтервальну систему нелінійних

алгебраїчних рівнянь із визначеними значеннями інтервалу:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_{0,0}^-; \hat{v}_{0,0}^+] \subseteq [z_{0,0}^-; z_{0,0}^+]; \\ \vdots \\ [\hat{v}_{d,d}^-; \hat{v}_{d,d}^+] \subseteq [z_{d,d}^-; z_{d,d}^+]; \\ z_{d+1,d+1}^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{i,0}], \dots \\ \dots, [\hat{v}_{d,d}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g} \leq z_{d+1,d+1}^-; \\ \vdots \\ z_{I,J}^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{i,0}], \dots \\ \dots, [\hat{v}_{I,J-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g} \leq z_{I,J}^-; \\ i = d + 1 \dots I, \quad j = d + 1 \dots J, \quad k = 0 \dots K. \end{array} \right. \quad (46)$$

На відміну від лінійного випадку у такій системі представлені нелінійні параметри. Для її ідентифікації використано метод, заснований на моделі поведінки штучної бджолиної колонії. Таким чином, використовуючи параметричну та структурну ідентифікацію, отримуємо інтервальну математичну модель, яка описує розподіл максимальної амплітуди інформаційного сигналу на поверхні операційної рани. Для прикладу візьмемо модель, яка побудована під час проведення експериментальних досліджень.

На останній ітерації реалізації методу отримано таку структуру моделі ідентифікації зворотного гортанного нерва:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] = & -0.0161 + 0.503 \cdot [\hat{v}_{i,j-2}^-; \hat{v}_{i,j-2}^+] \\ & + 0.2145 \cdot [\hat{v}_{i-1,j}^-; \hat{v}_{i-1,j}^+] + 0.7969 \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \\ & + 0.6344 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1}^-; \hat{v}_{i-1,j-1}^+] \cdot \\ & \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+], \\ & i = 1 \dots 4, j = 2 \dots 4, \end{aligned} \quad (47)$$

де  $[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] \subset [z_{i,j}^-; z_{i,j}^+] = [z_{i,j} - z_{i,j} 0,02; z_{i,j} + z_{i,j} 0,02]$   $i \in \{i=0, j=0, \dots, 4\} \vee \{i=0, \dots, 4, j=0, 1\}$  – початкові умови.

Як бачимо, щоб налаштувати цю модель під конкретного пацієнта, потрібно встановити 14 точок початкових умов. Це означає, що в процесі операції хірург повинен зробити не менше 14 подразнень тканин операційної рани в певних точках. Однак, використання репозиторію моделей, які були побудовані для прооперованих пацієнтів, дозволяє використовувати його для наступних пацієнтів, що значно скорочує час операції на підготовчому етапі, коли хірург виявляє ЗГН.

На основі онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних, яка детально описана в 3 розділі роботи, а також реалізованого програмного комплексу для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходів побудовано репозиторій інтервальних моделей для виявлення зворотного гортанного нерва.

Для практичного використання інтервальних моделей із репозиторію було згенеровано відповідний інструментальний засіб, який представлено на рисунку 6. Даний інструмент дозволяє перемикати вибором моделі, враховуючи зміни стану, середовища чи умови отримання інтервальних даних.



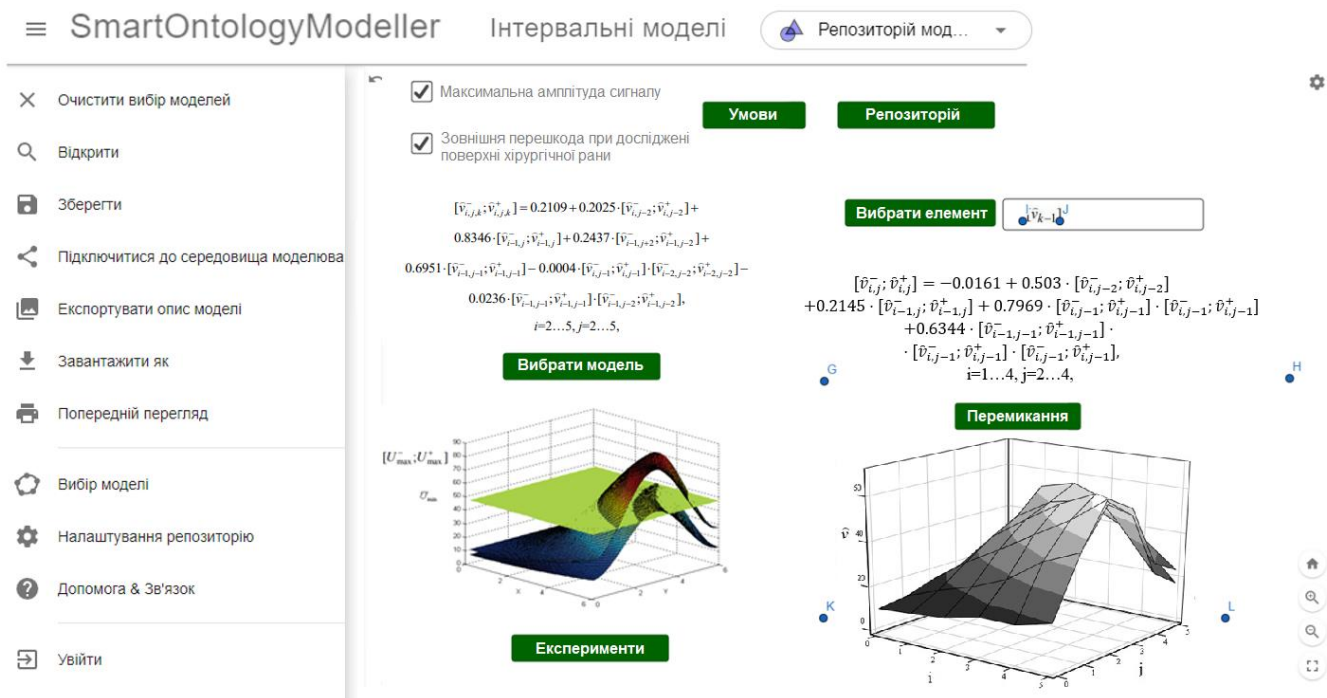


Рисунок 6 – Приклад перемикавання інтервальної моделі для задачі візуалізації ЗГН під час операції на щитоподібній залозі в згенерованому інструментальному засобі

Необхідно також відзначити, що використання знайденої структури інтервальної моделі для задачі візуалізації зворотного гортанного нерву під час операції на щитоподібній залозі із побудованого раніше репозиторію інтервальних математичних моделей дозволило суттєво знизити час на побудову самої моделі, що підтвердило зниження обчислювальної складності при побудові інтервальних математичних моделей для даного класу складних об'єктів.

На рисунку 7 представлено приклад реалізації онтології інтервальної математичної моделі для задачі візуалізації зворотного гортанного нерву під час операції на щитовидній залозі в середовищі SmartOntologyModeller.

Далі у розділі розглядається моделювання процесів забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами нестационарними джерелами забруднення. Проблемою застосування інтервального підходу для даного класу об'єктів є складність використання побудованої інтервальної моделі у випадку інших умов середовища. Вирішення цієї проблеми досягається шляхом реалізації онтології інтервальної математичної моделі для задачі моделювання динаміки концентрації шкідливих речовин в розробленому середовищі. У дисертаційній роботі розглянуто застосування зазначеного методу для побудови моделі поширення забруднень шкідливих викидів автотранспорту із використанням процесу математичного моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів NO<sub>2</sub> (діоксид азоту) на перехресті центральних вулиць м. Тернопіль.

Результати експериментів показали, що побудована у праці модель динаміки концентрацій діоксиду азоту не є універсальною, тобто не може бути використана для моделювання в інших точках міста або за інших погодних умов. Це пов'язано із неврахуванням дії різних, в тому числі і випадкових чинників, які є характерними для конкретної точки, у якій здійснюється моделювання. До такого виду чинників відносять: природна вентиляція, наявність вертикальних та горизонтальних потоків повітря тощо.

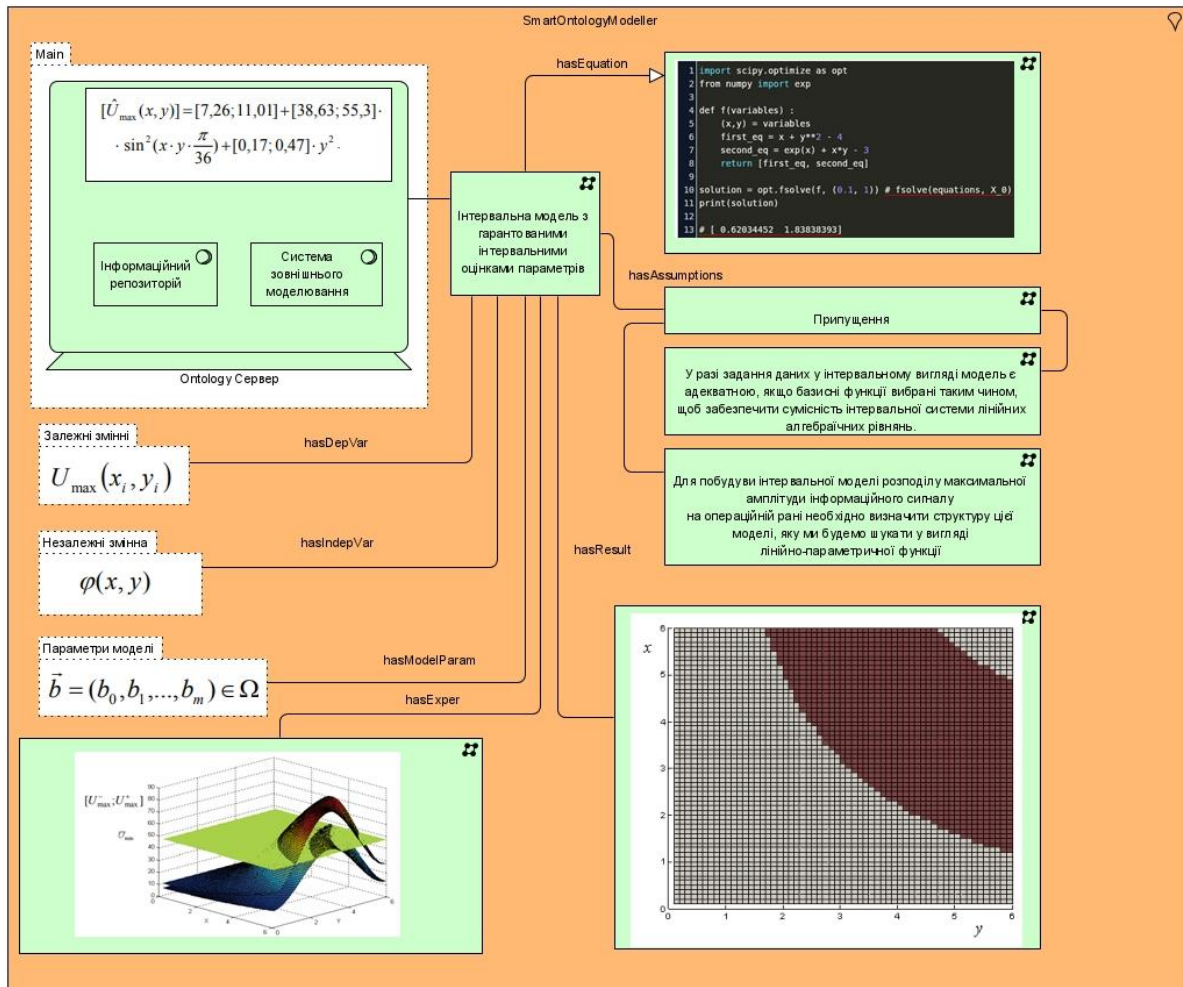


Рисунок 7 – Приклад реалізації онтології інтервальної моделі для задачі візуалізації ЗГН в процесі проведення операцій в середовищі SmartOntologyModeller

Практична реалізація онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних характеризується формуванням спільних елементів структур, виходячи із специфічних особливостей їх практичного використання для окремих предметних областей.

Таким чином, для підвищення прогностичних властивостей моделей пропонуємо модифікувати вищеписаний підхід із використанням нелінійного елементу в моделі, який виконує функцію перемикача для обрання адекватної моделі, в залежності від умов її застосування та відповідної зміни середовища використання.

В інформаційному репозиторію зберігається база напрацьованих математичних моделей, яка включає такі основні компоненти: формалізовані математичні моделі (рівняння, функції, параметри, константи); графічна інтерпретація результатів моделювання (графіки, таблиці, різноманітні схеми); результати проведення експериментальних досліджень (опис предметної області, характеристики перебігу експериментів, результати застосування математичних моделей). На основі методу вибору математичної моделі в рамках онтологічного підходу для моделювання на основі інтервальних даних можна здійснювати перемикання моделями з інформаційного репозиторію в залежності від умов та специфіки проведення відповідних експериментальних досліджень.

На рисунку 8 наведено приклад перемикання вибором математичної моделі на основі інтервальних даних в залежності від зміни предметних характеристик моделі.



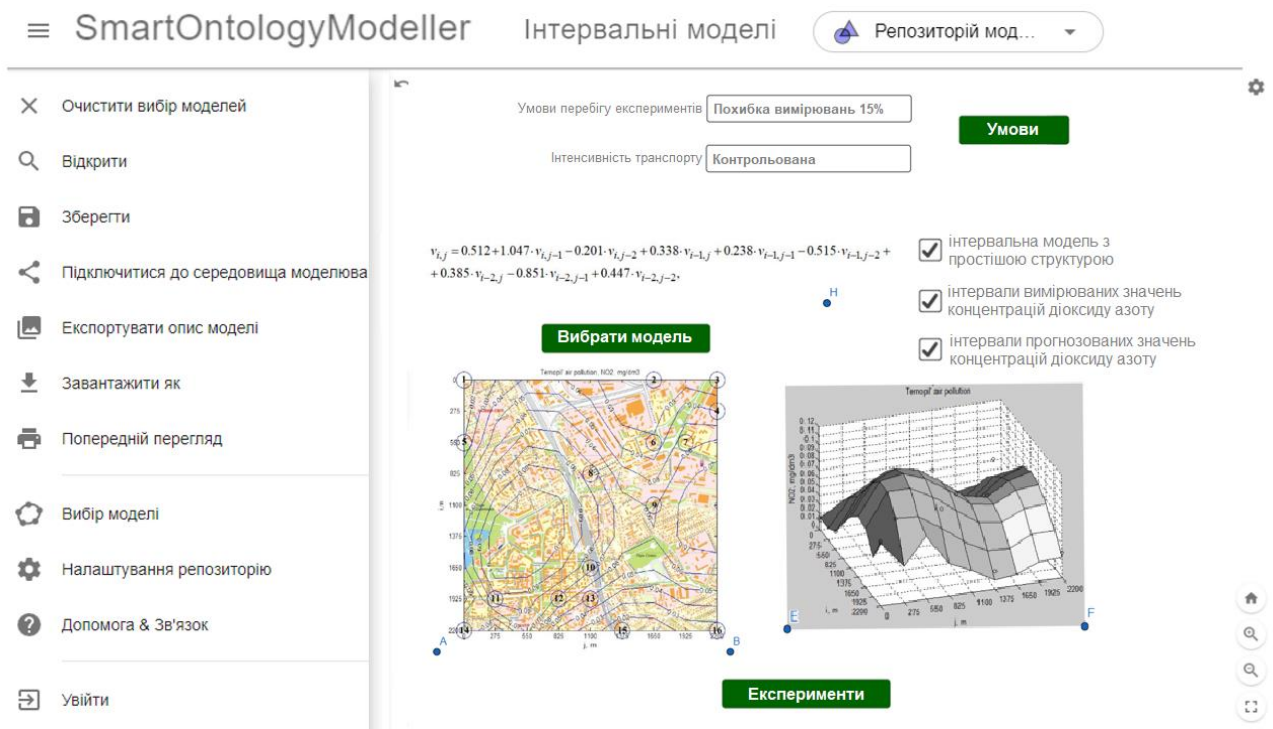


Рисунок 8 – Приклад перемикавання вибору математичної моделі в залежності від зміни умов середовища моделювання або умов перебігу відповідного експерименту

Перемикавання відбувається за рахунок зміни умов середовища моделювання. Наприклад, зміна керуючої характеристики «концентрація окису вуглецю» на «концентрація діоксиду азоту» при однакових інших умовах перебігу проведення експериментів.

У результаті проведеного аналізу вибірки даних для розглянутого прикладу, вдалося з'ясувати причину неможливості побудови єдиної моделі для дослідження динаміки концентрацій діоксиду азоту на перехрестях внаслідок забруднень автотранспортом, а саме – через неоднозначність зв'язку між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспорту для різних точок міста. Підсумовуючи проведений аналіз, для усунення цієї проблеми необхідно здійснювати управління вибраним структурним елементом моделі.

У кінці даного розділу пропонується інтервальна модель, яка побудована на основі реальних реакцій користувачів на інформаційні повідомлення і дозволяє побудувати їх стійкий портрет з метою побудови оптимального розкладу публікацій спеціалізованої групи для максимізації кількості реакцій на повідомлення з урахуванням обмежень, зумовлених політикою публікацій окремих груп в соціальних мережах.

Складність такої задачі супроводжується необхідністю врахування великої кількості факторів, які характеризуються структурною та поведінковою неоднорідністю соціальних мереж та відповідними обмеженнями технологій збору та накопичення даних. Дослідження великих соціальних мереж повинно враховувати поведінку учасників окремих соціальних груп, їх адаптацію до змін.

Одиницею інформації, що передається через соціальну мережу, є інформаційне повідомлення (IP). Інформаційне повідомлення описується кортежем параметрів

$$IP = \langle r, Id, timep, themep, vp, r \rangle, \quad (48)$$

де  $r$  - джерело повідомлення,  $Id$  - ідентифікатор повідомлення,  $timep$  - час публікації повідомлення,  $thetep$  - тематика,  $vp = \{vp_i\}$  - віральність,  $r = \{r_i\}$  - число, яке характеризує різні типи реакцій на новину.

Віральність інформаційного повідомлення характеризує здатність контенту до самостійного поширення. Деякі параметри інформаційного повідомлення можуть у процесі моделювання динамічно змінюватися. Наприклад, кількість реакцій на повідомлення є прикладом динамічно змінюваних параметрів для різних часових проміжків. При цьому у соціальних мережах підтримуються різні типи каналів поширення інформації: «користувач-користувач», «група-група», «група-користувач».

В соціальних мережах поширення інформації визначається не тільки параметрами індивідуальних реакцій, але і деякою визначеною топологією графа зв'язків (наявність підписників, друзів) для досліджуваних тематичних груп. Вхідними даними моделі є:

- публікаційна активність групи та користувачів у мережі (стаття та її основні атрибути, наприклад, дата публікування, текст інформаційного повідомлення, кількість коментарів та поширень);
- наявність реакції та користувацька активність (наявність цифрового сліду користувача у мережі);
- топологічні дані (характеризують типологію взаємодії для визначених елементів мережі).

Вихідним результатом моделі є інформація, яка описує реакцію користувачів в динаміці на визначені повідомлення, а також реакції груп користувачів до різних тем. Можна виділити кілька типів користувачів, які характеризують деяке інформаційне повідомлення: перший тип це користувачі, які переглянули та прочитали повідомлення, а другий тип – користувачі, які мають можливість бачити це повідомлення.

Для моделювання та прогнозування інформаційних процесів реалізовано модель поширення інформації в соціальній мережі. Дана модель є дискретною: кожній ітерації відповідає певний момент часу:

$$v_k = g_1 + g_2 v_{k-1} + g_3 v_{k-2} + g_4 v_{k-3} + g_5 v_{k-4}, k = 4, \dots, 11. \quad (49)$$

Результати зіставлення модельованих результатів із експериментальними наведено на рисунку 9. Як бачимо отримана модель (49) із коефіцієнтами  $g_1 = 0.011021$ ,  $g_2 = -0.276223$ ,  $g_3 = 1.388641$ ,  $g_4 = -0.057636$ ,  $g_5 = 0.22417$ , забезпечує виконання умов і в цьому сенсі є адекватною.

На основі підходу до моделювання базових показників активності користувачів в тематичній групі соціальної мережі побудовано інтервальну математичну модель портрету користувачів тематичної групи з проблем екології у соціальній мережі Facebook. Він дозволяє врахувати характерні для нелінійних систем особливості, такі як: залежність збурень від поточних значень показника, циклічність процесів, стрибкоподібні зміни характеристик. Для врахування таких явищ, з одного боку, і для можливості використання корисних властивостей лінійних систем ідентифікації, з іншого, в роботі реалізується підхід на основі класифікації можливих станів досліджуваного показника. В області значень показника вибираються інтервали. При знаходженні значень показника всередині інтервалу його динаміка описується найпростішими лінійними рівняннями.

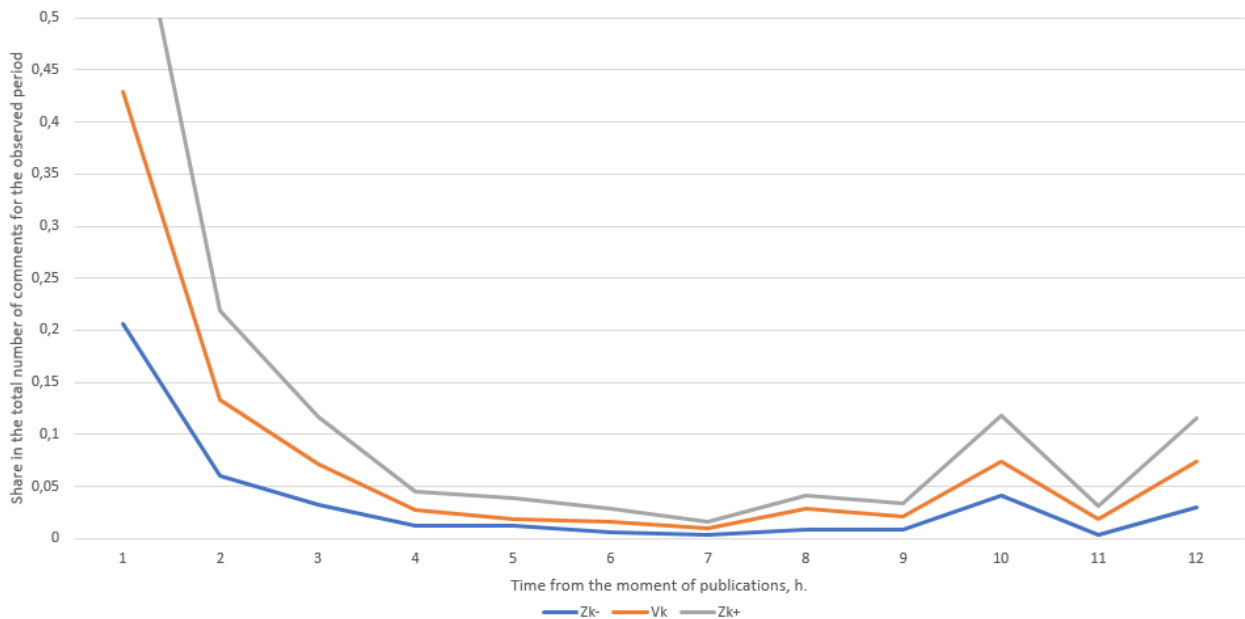


Рисунок 9 – Результати параметричної ідентифікації структури (49)

Запропонована в роботі інтервальна модель, яка побудована на основі реальних реакцій користувачів на інформаційні повідомлення дозволяє побудувати їх стійкий портрет з метою побудови оптимального розкладу публікацій спеціалізованої групи для максимізації кількості реакцій на повідомлення з урахуванням обмежень, зумовлених публікаційною політикою окремих груп в соціальних мережах.

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено, що використання онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу, репозиторію побудованих інтервальних математичних моделей для досліджуваних складних об'єктів дозволило знизити обчислювальну складність при побудові математичних моделей для даного класу об'єктів.

## ВИСНОВКИ

Отримані у дисертації наукові результати у сукупності вирішують науково-прикладну проблему зниження обчислювальної складності структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів з одночасним забезпеченням гарантованої точності цих моделей в межах, необхідних для розв'язування задач прийняття рішень та дослідження властивостей цих об'єктів.

При цьому отримано такі наукові та практичні результати.

1. Проведено аналіз відомих методів та алгоритмів ідентифікації моделей характеристик складних об'єктів в умовах невизначеності і сформульовано можливі напрями розвитку цих методів. Проведено порівняльний аналіз відомих методів та засобів подання та обробки знань в інформаційних системах. Встановлено, що у випадку обмежених за значеннями вимірювальних похибок доцільно використовувати методи аналізу інтервальних даних. Обґрунтовано, що для формалізованого опису предметної області та умов розробки математичних моделей, доцільно використати знання-орієнтований підхід на основі онтології. Обґрунтовано для моделювання певних складних об'єктів використання методу структурної ідентифікації на основі поведінкової моделі бджолиної колонії.

Сформульовано основні недоліки зазначеного методу, які базуються на високій обчислювальній складності реалізації.

2. Розроблено концепцію ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів на основі поєднання методів аналізу інтервальних даних, знання-орієнтованого підходу як до опису предметної області досліджуваного об'єкта, так і до області побудови даного класу математичних моделей із використанням онтології. В рамках такої концепції розроблено новий гібридний метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів на основі поєднання методів інтервального аналізу, поведінкових моделей бджолиної колонії та знання-орієнтованого підходу до опису предметної області об'єктів на основі онтології.

У результаті порівняння з відомими методами структурної ідентифікації встановлено, що розроблений гібридний метод ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів ефективніший, а при знаходженні структури моделі у репозиторії для подібних за функціонуванням об'єктів обчислювальна складність зменшується у 18795 разів за рахунок уникнення процедури структурної ідентифікації.

3. Розроблено метрику оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах, яка ґрунтується на показниках інтерпритованості, своєчасності та повноти інформації, що дозволила сформувати основу для управління якістю та контекстом у веб-сервісах. Розроблено метод фільтрування даних на основі метрики оцінки актуальності інформації в сервісно-орієнтованих системах.

У результаті проведених досліджень встановлено, що якість оцінки актуальності інформації безпосередньо впливає на ефективність побудови математичних моделей у розрізі забезпечення повноти структури моделі, опису об'єкта моделювання, стійкості до зміни стану середовища чи умов отримання інтервальних даних.

4. Удосконалено метод структурної ідентифікації дискретних моделей складних об'єктів на основі обчислювальних процедур адаптивного налаштування вибору структурних елементів. Показано спосіб встановлення для кожного елемента множини ймовірності вибору і зміни цього розподілу на різних фазах поведінкової моделі бджолиної колонії.

На прикладах структурної ідентифікації ряду інтервальних дискретних моделей показано, що при реалізації цього методу досягається зниження обчислювальної складності у порівнянні із відомим методом на 4% - для задач з невеликою розмірністю, а саме для 2 параметрів моделі, а із зростанням розмірності задачі до 6 параметрів в моделі досягається зниження обчислювальної складності у порівнянні із відомим методом на 21.48%.

У результаті проведених експериментів встановлено, що із збільшенням розмірності та складності задачі ідентифікації, ефективність застосування процедури адаптивного налаштування вибору структурних елементів зростає.

5. Створено комп'ютерне середовище для математичного моделювання складних об'єктів на основі інтервальних дискретних моделей, яке, на відміну від існуючих, ґрунтується на знання-орієнтованому підході опису області побудови даного класу математичних моделей із застосуванням онтології, що забезпечує його адаптацію та інтерпретацію в програмний код під задану предметну область та під конкретні вимоги користувача.

Запропоновано відкриту архітектуру такого середовища та показано особливості його реалізації на основі об'єктно-орієнтованого підходу за допомогою технології Spring Framework на мові програмування Java із використанням інтерпретатора Python. Розроблено репозиторій інтервальних моделей складних об'єктів, який вміщує онтологічний опис як предметної області їх застосування, так і умови розробки цих моделей, що забезпечило підвищення ефективності розробки зазначеного класу математичних моделей для користувачів.

6. Апробовано нові й удосконалені методи та розроблений програмний комплекс для розв'язування прикладних задач, зокрема для моніторингу забруднень атмосфери автотранспортом у м. Тернопіль; ідентифікації зворотного гортанного нерва при проведенні операцій на щитовидній залозі в КНП Тернопільська комунальна міська лікарня №2; при впровадженні сервісно-орієнтованих корпоративних систем департаменту цифрової трансформації Тернопільської обласної державної адміністрації; моделювання динаміки дописів користувачів соціальної спільноти у компанії «Eleks»; побудови оптимального розкладу публікацій на офіційних сторінках в соціальних мережах Центру надання адміністративних послуг у м. Тернопіль.

Ефективність запропонованих алгоритмів підтверджено результатами обчислювальних експериментів та впровадженням на ряді підприємств та організацій.

## **СПИСОК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ, ЗАРАХОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДОКТОРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**

*Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації.*

1. Androshchuk O., Berezenskyi R., Lemeshko O., Melnyk A., Huhul O. Model of explicit knowledge management in organizational and technical systems. *International Journal of Computing*. 2021. Vol. 20, Iss. 2. P. 228–236.
2. Dyvak M., Kovbasistyi A., Melnyk A., Turchyn L., Martsenyuk Y. System for web resources content structuring and recognizing with the machine learning elements. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. Vol.3. P. 128–134.
3. 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.
4. Dyvak M., Melnyk A., Mazepa S., Stetsko M. An ontological approach to detecting irrelevant and unreliable information on web-resources and social networks. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. Vol. 831. P. 481–492.
5. Dyvak M., Melnyk A., Pukas A., Dostalek L. Control of mathematical modeling process of dynamics of harmful substances concentrations on the basis of ontological approach. *Computational Problems of Electrical Engineering*. 2022. Vol. 12, Issue 1, P. 7–16.
6. 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.
7. Dyvak M., Papa O., Melnyk A., Pukas A., Porplytsya N., Rot A. Interval model of the efficiency of the functioning of information web resources for services on ecological expertise. *Mathematics*. 2020. Vol.8, Issue 2116. P. 1–12.
8. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Pukas A., Melnyk A. Method of identification of models of objects with distributed parameters with a spatially distributed

control based on interval data analysis. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2017. Issue 2. P. 150–159.

9. Dyvak M., Pukas A., Melnyk A., Klos-Witkowska A., Karpinski M. Mathematical model in task of recurrent laryngeal nerve identification by electrophysiological method. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*. 2017. Issue 12. P. 266–270.

10. Susla M., Pasichnyk R., Pasichnyk N., Melnyk A. Adjustment of the model of the agent-determinant type in the forecasting of pollution on the section of the city road. *CEUR-WS*. 2018. Vol. 2300. P. 38–41.

11. Tymchyshyn V., Porplytsya N., Melnyk A., Tymchyshyn B. Software for modelling the air pollution by vehicles. *CEUR-WS*. 2018. Vol. 2300. P. 207–210.

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.

13. 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*. 2021. Том 42. №2. С. 73–84.

14. Дивак М.П., Мельник А.М., Кедрін Є.С., Франк О. Інтервальна модель портрету користувачів тематичної групи з проблем екології у соціальній мережі. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2021. Том 41. №1. С. 78–88.

15. Дивак М.П., Мельник А.М., Ковбасистий А.В., Папа О.А. Підхід до математичного моделювання ефективності web-ресурсів. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2020. Том. 38. №2. С. 29–37.

16. Дивак М.П., Мельник А.М., Папа О.А. Математичне та програмне забезпечення інтелектуального модуля прикладних програмних систем для надання адміністративних послуг щодо проведення екологічної експертизи. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2020. Том. 49. №3. С. 66–76.

17. 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.

18. Мельник А.М. Методи та засоби виявлення неактуальної та недостовірної інформації на web-ресурсах. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2020. Том 10. №3-4. С. 167–176.

19. 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.

20. Мельник А.М., Дивак М.П. Метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів із адаптивним налаштуванням вибору структурних елементів. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2022. №3. С.61–72.

21. 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.

22. 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.*

23. Мельник А.М. Роль моделі управління процесом автоматизованого навчання в підвищенні відвідуваності веб-сайтів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2016. №3. С.15–19.*

24. Мельник А.М., Дивак М.П., Пасічник Р.М. Метод виявлення неактуальної інформації в сервісно-орієнтованих корпоративних системах на прикладі систем оцінювання якості ґрунтів. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2021. Том. 50. №1. С. 45–54.*

25. Шевчук Р.П., Мельник А. М. Мобільна кіберфізична система для динамічного відображення інформації про об'єкти на цифровій карті місцевості. *Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Том. 27. №4. С. 170–176.*

*Наукові праці, які відображають апробацію матеріалів дисертації*

26. Dyvak M., Kovbasistyi A., Melnyk A., Shcherbiak I., Huhul O. Recognition of relevance of web resource content based on analysis of semantic components. *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2019)*, Ceske Budejovice, Czech Republic. 2019. P. 297–302.

27. Dyvak M., Melnyk A., Dostalek L., Ostroverkhov V., Honchar L., Romanets I. Repository of interval models of dynamics of concentrations of harmful emissions of motor transport. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Spisska Kapitula, Slovakia. 2022. P. 89–94.

28. Dyvak M., Melnyk A., Dyvak N., Papa O., Ostroverkhov V., Lobodina Z. Intelligent module of information processing for the applied software system to provide administrative services. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 604–607.

29. Dyvak M., Melnyk A., Kedrin Y. Interval model of the user reactions to messages in thematic groups of social networks. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. Proceedings of the XIVth International Conference TCSET'2022*. Lviv–Slavske: Lviv Polytechnic National University, 2022. P. 837–840.

30. Dyvak M., Melnyk A., Kovbasistyi A., Shevchuk R., Huhul O., Tymchyshyn V. Mathematical modeling of the estimation process of functioning efficiency level of information web-resources. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Deggendorf, Germany. 2020. P. 492–496.

31. 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.

32. 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.

33. Dyvak M., Pukas A., Oliynyk I., Melnyk A. Selection the “saturated” block from interval system of linear algebraic equations for recurrent laryngeal nerve identification. *2018 IEEE Second International Conference on Data Stream Mining &*



*Processing (DSMP): Proceedings of the Conference. Lviv–Novoiavorivsk, Ukraine. August 21–25, 2018. P. 444–448.*

34. Kasianchuk M., Yakymenko I., Pazdriy I., Melnyk A., Ivasiev S. Rabin's modified method of encryption using various forms of system of residual classes. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceedings of the XIV International Conference CADSM'2017*. Polyana–Svalyava, Ukraine: National University „Lviv Polytechnic”. 2017. P. 222–224.

35. Kovbasistyi A., Melnyk A., Dyvak M., Brych V., Spivak I. Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Proceedings of the XIII-th International Conference ‘MEMSTECH’2017’*. Lviv–Polyana: Lviv Polytechnic National University. 2017. P. 154–156.

36. 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.

37. Mazepa S., Banakh S., Melnyk A., Pugach S., Yavorska O., Golota N. An ontological approach to detecting fake news in online media. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 531–535.

38. Melnyk A., Huhul O., Shevchuk R., Shcherbiak I., Martsenyuk Y., Kovbasistyi A. Intelligent system of analyzing the structure of web-resources. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 560–563.

39. 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.

40. Melnyk A., Shpintal M., Spilchuk V., Susla M. Method for evaluating the efficiency of systems for distance education. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. Lviv–Slavske: Lviv Polytechnic National University, 2016. P. 855–857.

41. Pasichnyk N., Melnyk A., Dobrovolska N. Management the website attendance based on the projected traffic. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceedings of the XII International Conference CADSM'2013*. Polyana–Svalyava, Ukraine: National University „Lviv Polytechnic”. 2013. P. 277.

42. Pasichnyk R., Melnyk A., Bilous I., Duma L., Pushkar B., Monko R. Historical training game model with mathematical and information aspects. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Spisska Kapitula, Slovakia. 2022. P. 84–88.

43. Pasichnyk R., Susla M., Pasichnyk N., Melnyk A. Model of pollution on the local section of an urban highway 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. 864–867.

44. Pukas A., Melnyk A., Voytyuk I., Smal V., Fenovka V., Pylypiuk T. Implementation of service-oriented architecture for static and dynamic objects interval modeling software. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 568–571.

45. Pukas A., Melnyk A., Voytyuk I., Yushko A., Romanyuk M., Honchar L. Transactional business application based on microservice architecture. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 564–567.

46. Pasichnyk P., Pasichnyk N., Melnyk A., Strubycka I. Concept model of resources accumulation and operational management in biotechnology, biomedical and Web information systems. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: Proceedings of the XIII International Conference CADSM'2015*. Polyana–Svalyava, Ukraine: National University „Lviv Polytechnic”, 2015. P. 152–155.

47. Shevchuk R., Kohut I., Chopyk P., Madiudia I., Melnyk A. Cyber-physical integrated transport and warehouse logistics system for courier delivery service. *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2021)*. Deggendorf, Germany. 2021. P. 652–656.

48. Shevchuk R., Melnyk A., Opalko O., Shevchuk H. Software for automatic estimating security settings of social media accounts. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Deggendorf, Germany. 2020. P. 769–773.

49. Shevchuk R., Tykhiy R., Melnyk A., Karpinski M., Owedyk Y., Yurchyshyn T. Cyber-physical system for dynamic annotating real-world objects using augmented reality. *2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Spisska Kapitula, Slovakia. 2022. P. 392–395.

50. Susla M., Pasichnyk R., Melnyk A., Pasichnyk N., Vasylykiv O., Androshchuk O. Formalization of scientific researches results in corporate knowledge bases as a tool of their accumulation. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Deggendorf, Germany. 2020. P. 488–491.

51. Susla M., Pasichnyk R., Pasichnyk N., Melnyk A., Shcherbiak I., Akimjak A. Principles of building a mathematical model for the influence of mineral fertilizers on grain yield. *2019 9th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2019)*. Ceske Budejovice, Czech Republic. 2019. P. 145–148.

52. Yakymenko I., Kasianchuk M., Ivasiev S., Melnyk A., Nykolaichuk Y. Realization of RSA cryptographic algorithm based on vector-module method of modular exponentiation. *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. 550–554.

53. Жидик М., Мельник А., Шпак В., Ковбасистий А. Комп'ютерна мережа для моделі "розумного будинку". *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю ACIT'2017*. Тернопіль: ТНЕУ. 2017. С. 34.

54. Мельник А., Гарах О. Метод синхронізації баз даних за допомогою хеш-функцій на основі нелінійного розбиття таблиць. *Сучасні комп'ютерні інформаційні*

*технології*: Матеріали II Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2012. Тернопіль: ТНЕУ. 2012. С. 183.

55. Мельник А., Кравець М. Автоматизована система для оцінки вартості та обліку приєднання споживачів до електричних мереж. *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи–семінару молодих вчених і студентів СІТ'2019. 29 листопада 2019. Тернопіль: ТНЕУ. 2019. С. 23.

56. Мельник А., Лабик Д. Метод "прозорої журналізації" для організації процесу тестування web-орієнтованих інформаційних систем. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали V Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2015. Тернопіль: ТНЕУ. 2015. С. 139–141.

57. Мельник А., Лавор М., Романюк М., Тимчишин В. Математичне та програмне забезпечення пошуку клонів коду на основі семантичних методів. *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи–семінару молодих вчених і студентів СІТ'2020. 30 листопада 2020. Тернопіль: ТНЕУ. 2020. С. 44–45.

58. Мельник А., Миць О. Підвищення ефективності пошуку документів в інтернет із врахуванням подібності веб-сторінок. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали III Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2013. Тернопіль: ТНЕУ. 2013. С. 212.

59. Мельник А., Панченко О. Модель онтології предметної області. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали III Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2013. Тернопіль: ТНЕУ. 2013. С. 213.

60. Мельник А., Пик І. Застосування генетичного алгоритму для оцінки ризиків проекту. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали VI Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2016. Тернопіль: ТНЕУ. 2016. С. 135–137.

61. Мельник А., Посуляк Р., Буца В. Інформаційна технологія ризик-орієнтованого оцінювання функціональності web-орієнтованих систем. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали V Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2015. Тернопіль: ТНЕУ. 2015. С. 142–144.

62. Мельник А., Проць С. Моделюючий алгоритм для оцінки надійності складних багатофункціональних технічних систем. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали VI Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2016. Тернопіль: ТНЕУ. 2016. С. 28–30.

63. Мельник А., Сіткар Т. Формування фахових знань за допомогою інтелектуальної навчальної системи. *Інформаційне суспільство: стан і перспективи розвитку у світлі регіональних особливостей*: матеріали між нар. наук.-практ. конференції. 11-14 жовтня 2012. Краків-Жешів-Львів-Тернопіль. Тернопіль: ТІСІТ. 2012. С. 30-31.

64. Мельник А., Співак І., Сирник О., Дробот І. Побудова адаптивної моделі користувача в інтерфейсах Web-орієнтованих систем. *Сучасні комп'ютерні інформаційні технології*: Матеріали VI Всеукраїнської школи – семінару молодих вчених та студентів АСІТ'2016. Тернопіль: ТНЕУ. 2016. С. 137–139.

65. Мельник А., Тимчишин В., Ковбасистий А., Романюк М. Математичне та програмне забезпечення управління реплікаціями в базах даних типу NoSQL. *Комп'ютерні інформаційні технології*: матеріали школи–семінару молодих вчених і студентів СІТ'2019. 29 листопада 2019. Тернопіль: ТНЕУ. 2019. С. 24.