

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



Дивак М.П., Мельник А.М.,
Манжула В.І., Свібак І.Я.,
Порплиця Н.П.



ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Монографія



Тернопіль ЗНУ 2024

УДК 519.87:519.2:004.89

З 73

*Рекомендовано до друку вченою радою
Західноукраїнського національного університету
(протокол № 7 від 28 лютого 2024 р.)*

Рецензенти:

Гоголюк Оксана Петрівна, д.т.н., професор, завідувач кафедри теоретичної та загальної електротехніки Національного університету «Львівська політехніка».

Романюк Олександр Никифорович, д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення Вінницького національного університету.

Гребеннік Ігор Валерійович, д.т.н., професор, завідувач кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки.

Дивак М.П., Мельник А.М., Манжула В.І., Співак І.Я., Порплиця Н.П.
З 73 Знання-орієнтовані системи для ідентифікації інтервальних математичних моделей складних динамічних та статичних об'єктів: монографія. Тернопіль: ВПЦ «Університетська думка», 2024. 287 с.

У монографії розглянуто знання-орієнтовані системи для ідентифікації інтервальних математичних моделей складних динамічних та статичних об'єктів. Здійснено аналіз підходів до математичного моделювання складних об'єктів, при якому встановлено, що для досліджуваних складних об'єктів експериментальні дані переважно формуються з вимірювальних пристроїв, що мають похибки і для врахування цієї невизначеності необхідно використовувати методи, які ґрунтуються на аналізі інтервальних даних. Наведено постановки задач структурної та параметричної ідентифікації моделей складних динамічних та статичних об'єктів. Запропоновано при розв'язуванні задач структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів використовувати методи, які ґрунтуються на самоорганізації мультиагентних систем, де одним і найбільш ефективних методів є метод на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії. Запропоновано 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, що у сукупності створює можливість розробки нових, більш ефективних з обчислювальної точки зору, методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей об'єктів.

У монографії сконцентровано увагу, як на математичному описі методів ідентифікації математичних моделей складних об'єктів у вигляді алгебричних та рівницевих рівнянь, так і на реалізації відповідного програмного середовища, яке може мати зацікавленість для практиків в галузі математичного моделювання.

ISBN 978-966-654-727-2

**Дивак М.П., Мельник А.М., Манжула В.І.,
Співак І.Я. Порплиця Н.П. 2024
ЗУНУ, 2024**

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ІНТЕРВАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ’ЄКТІВ.....	10
1.1. Особливості побудови систем, орієнтованих на знання та моделі.....	12
1.2. Аналіз методів та засобів побудови моделей характеристик складних об’єктів в умовах невизначеності.....	24
1.3. Методи математичного моделювання на основі інтервального аналізу та їх використання в задачах структурної та параметричної ідентифікації моделей складних об’єктів.....	30
1.3.1. Постановка задачі математичного моделювання на основі інтервальних даних.....	30
1.3.2. Методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об’єктів.....	47
1.3.3. Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об’єктів.....	65
Висновки до розділу 1.....	69
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕЛІНІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ ОБ’ЄКТІВ.....	72
2.1. Постановка задачі ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об’єктів.....	72
2.2. Властивості функції мети в задачі ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об’єктів.....	75
2.3. Ідентифікація параметрів інтервальних нелінійних моделей статичних об’єктів із застосуванням багатовимірної оптимізації.....	81
2.4. Метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей із вибором структурних елементів на основі градієнта цільової функції.....	92
Висновки до розділу 2.....	111

РОЗДІЛ 3. ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ПОБУДОВІ ІНТЕРВАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....	114
3.1. Огляд теоретичного підґрунтя побудови онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних.....	114
3.2. Формалізоване представлення онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних.....	131
3.3. Гібридний метод ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів.....	136
3.4. Дослідження особливостей вибору математичної моделі з репозиторію інтервальних моделей.....	140
3.5. Дослідження особливостей виділення нелінійного елемента математичної моделі з репозиторію інтервальних моделей.....	152
Висновки до розділу 3.....	163
РОЗДІЛ 4. ОНТОЛОГІЧНО-КЕРОВАНА ПРОГРАМНА СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	165
4.1. Архітектура онтологічно-керованої системи інтервального моделювання складних об'єктів.....	166
4.2. Проектування та реалізація підсистеми зберігання інформації.....	180
4.3. Програмна реалізація системи для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу.....	201
4.4. Онтологія як програмна надбудова до системи для математичного моделювання на основі інтервальних даних.....	211
Висновки до розділу 4.....	228

РОЗДІЛ 5. ПРИКЛАДИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	228
5.1. Інтервальна модель для візуалізації зворотного гортанного нерва при проведенні операції на щитовидній залозі.....	230
5.2. Інтервальна модель динаміки концентрації шкідливих речовин на основі онтологічного підходу.....	238
5.3. Інтервальна модель портрету користувачів тематичної групи з проблем екології у соціальній мережі.....	248
Висновки до розділу 5.....	261
 СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	 263

ВСТУП

Розвиток інформаційних технологій передбачає використання інтелектуалізованих систем підтримки рішень, керованих моделями, даними та знаннями. 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 макромоделей складних об'єктів, які використовуються в процесах підготовки та прийняття рішень.

До побудови таких моделей існує два підходи – дедуктивний та індуктивний. При дедуктивному підході необхідно встановити загальний вигляд моделі, а потім перевірити її адекватність на експериментальних даних.

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 математичних моделей із застосуванням індуктивного підходу необхідно розв'язувати складні оптимізаційні задачі структурної ідентифікації цих моделей. Особливо ці задачі ідентифікації ускладнюються, коли експериментальні дані отримані в інтервальному вигляді і в процесі отримання математичних моделей необхідно забезпечити їх гарантовані прогностичні властивості.

При розв'язуванні цих задач отримано ряд ефективних методів ідентифікації. Зокрема, найбільш значущі результати при розробці методів ідентифікації моделей 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., Ципкін Я.З., Vicino E., Schwepper F.S., Івахненко О.Г., Степашко В.С., Akaike H., Rissanen J., Pollard D. та ін.

Важливим при розв'язуванні зазначених задач є використання систематизованих знань у вигляді онтологічного опису, що може суттєво спростити процедури структурної та параметричної ідентифікації. 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., 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, доцільно для побудови таких моделей використовувати методи аналізу інтервальних даних. В цьому випадку математичні моделі матимуть вигляд інтервальних рівнянь і забезпечуватимуть гарантовані прогностичні властивості. Разом з тим, представлення цих моделей у вигляді інтервальних 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.

Окремим розділом у монографії розглянуто методи ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів. В цьому випадку, авторами запропоновано ряд методів, які ґрунтуються на комбінації відомих в теорії оптимізації градієнтних методів.

В цілому, ж проблема складності розв'язування задач структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів спонукає до створення гібридних методів налаштування структури моделі та її параметрів, ґрунтуючись як на аналізі інтервальних даних так і на онтологічному описі знань про предметну область моделювання.

Авторським колективом монографії узагальнено багаторічний досвід розробки інтервальних моделей статичних, динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами. Разом з тим, у монографії наведено та розширено деякі нові наукові результати, які стосуються моделювання методів ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів, зокрема метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей із вибором структурних елементів на основі градієнта цільової функції та результати чисельних експериментів для його апробації.

У монографії, матеріал першого розділу виконаний в основному Диваком М.П. та Мельником А.М. Другий розділ підготовлено Диваком М.П. та Манжулою В.І. Усі експериментальні дослідження, чисельні експерименти та висновки на їх основі у другому розділі виконано та підготовлено Манжулою В.І. Викладення ідеї для концепції створення гібридних методів налаштування структури моделі та її параметрів на підставі поєднання аналізу інтервальних даних та онтологічного підходу належить Диваку М.П. та Мельнику А.М., а

реалізація цієї концепції виконана та викладена у монографії Мельником А.М. (третій розділ та четвертий розділи). Чисельні експерименти та результати ідентифікації низки математичних моделей у вигляді різницевих рівнянь належать Мельнику А.М., Порплиці Н.П. та Співак І.Я. (перший, третій та п'ятий розділи). П'ятий розділ монографії підготовлено Мельником А.М. Загальне редагування матеріалу виконано Диваком М.П., а компонування та підготовку здійснено Співак І.Я.

Наведені у монографії методи та засоби побудови моделей складних об'єктів у вигляді інтервальних 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 основою для подальшого розвитку теорії ідентифікації та математичного моделювання, а також слугують поштовхом для розвитку прикладних досліджень у сферах охорони довкілля, медицини та інших областях, де математичні моделі є основою для прийняття рішень.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ДЛЯ ІНТЕРВАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Останнім часом зростає рівень реалізації систем підтримки прийняття рішень (СППР) (англ. Decision Support System, DSS), що є переконливим доказом того, що DSS є життєздатним інструментом управління.

СППР, які найбільше підходять для підтримки прийняття рішень в різних предметних областях, зокрема медицині та екології, а особливо враховуючи умови невизначеності процесів в даних предметних областях – СППР, що керуються даними (Data-Driven DSS), моделями (Model-Driven DSS) та знаннями (Knowledge-Driven DSS).

Невід'ємною компонентою зазначених типів СППР є математичні моделі, а виходячи із специфіки предметних областей, саме застосування математичного моделювання дозволяє отримувати необхідні управлінські рішення, виходячи із складності об'єкта.

Складність об'єкта формує наявність різноманітних взаємопов'язаних елементів, які важко досліджувати повністю і це також властивість об'єкта, яка може проявлятися у випадковості, нез'ясовності, непередбаченості його поведінки. Саме моделювання поведінки зазначеного типу об'єктів розглядається у монографії.

При розв'язанні зазначеного класу задач найчастіше використовуються методи, які ґрунтуються на дедуктивному та індуктивному підходах. В межах дедуктивного підходу, загальний вигляд математичної моделі у вигляді деякого рівняння визначають виходячи з певних фізичних міркувань, з подальшими процедурами його розв'язання.

Індуктивний підхід базується на самоорганізованому процесі еволюційного переходу від експериментальних даних до побудови математичних моделей, які відображають закономірності функціонування імітованих об'єктів і систем, які закладені в існуючих експериментальних даних. Важливою особливістю реалізації індуктивного підходу є характер невизначеності в інформаційних масивах даних (імовірнісна, інтервальна, нечітка), оскільки цей підхід базується на методах аналізу даних.

Для досліджуваних складних об'єктів, переважно експериментальні дані формуються з вимірювальних пристроїв, що мають визначені похибки вимірювань. Для врахування невизначеності в експериментальних даних необхідно використовувати методи, які ґрунтуються на інтервальному аналізі даних.

Перевагою застосування інтервального підходу є відсутність вимоги дослідження статистичних характеристик об'єкта моделювання. Як відомо, це зменшує кількість експериментів (відбір та накопичення даних). Тому інтервальний підхід більш корисний для дослідження властивостей складного об'єкта в умовах обмеженої вибірки даних.

Основною проблемою використання цих методів є відсутність знання-орієнтованого підходу із реалізованим формалізованим описом як предметної області, так і самого процесу моделювання, що не дозволяє розробляти програмні середовища як інструментальні засоби.

Цю проблему можна вирішити за допомогою знання-орієнтованого підходу із використанням онтологічного опису предметної області моделювання, тобто операційної онтології.

З множини моделей подання знань детальніше розглядаються онтології, оскільки їх використання при розробці систем підтримки прийняття рішень в рамках знання-орієнтованого підходу активно розвивається на даний час.

Таким чином, рішення цих проблем дозволить знизити складність процедури моделювання та отримати адекватні моделі з гарантованими прогностичними властивостями. Розглянемо детальніше особливості організації систем підтримки прийняття рішень, що керуються знаннями, даними та моделями.

1.1. Особливості побудови систем, орієнтованих на знання та моделі

Сучасні системи стають все більш динамічними та неоднорідними. Ці фактори ускладнюють процес моделювання і, як

наслідок, роблять непрактичними методи традиційного стійкого та оптимального керування, які передбачають наявність точних моделей [88].

В сучасному світі прийняття рішень є більш складним, ніж це було в минулому. Це обумовлено двома причинами: по-перше, зростає технологічний рівень усіх галузей, а комунікаційні системи сформували більшу множину можливих альтернатив рішень, з яких особа, яка приймає рішення, може здійснювати вибір; по-друге, підвищений рівень структурної складності сучасних проблем може призвести до ланцюгової реакції збільшення витрат у разі виникнення помилок [144].

Загалом управлінські рішення приймаються на основі людського судження, яке включає дедуктивні міркування, підкріплені досвідом, інформацією та знаннями [55]. Для компенсації ефекту людської помилки, процес прийняття рішень може бути частково доповнений комп'ютерною системою.

DSS використовується для моделювання людських міркувань і процесу прийняття рішень, здатні приймати факти від користувачів, опрацьовувати ці факти і формувати пропозиції, які є близькими до рішень, які представлені експертами [149]. DSS може значно підтримати в оцінці різних рішень щодо технічного обслуговування, щоб вибрати найбільш надійне та економічно обґрунтоване [150].

Останнім часом зростає рівень реалізації систем підтримки прийняття рішень в організаціях, що є переконливим доказом того, що DSS є життєздатним і добре прийнятим інструментом

управління. На рисунку 1.1 представлено загальну схему класифікації систем підтримки рішень. Розглянемо кожен із зазначених груп більш детально.

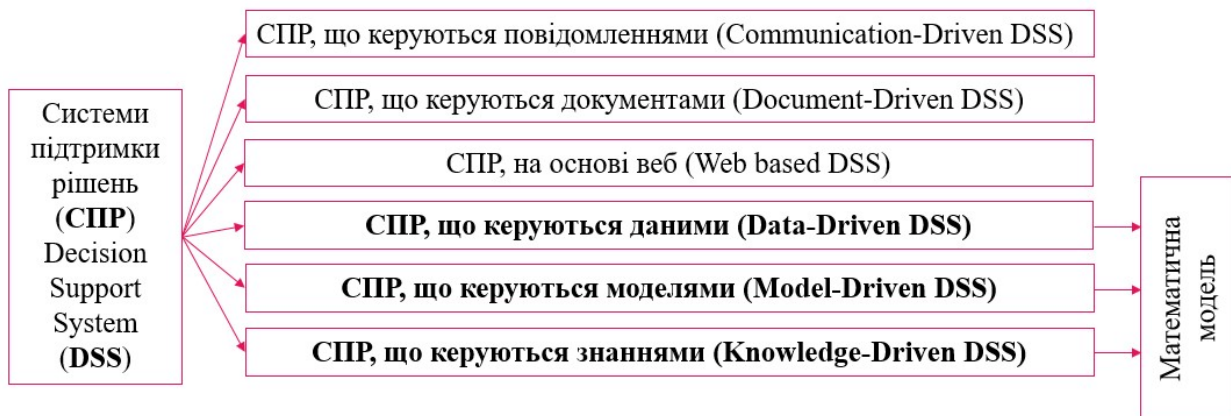


Рисунок 1.1 – Класифікація систем підтримки рішень

СППР, що керуються повідомленнями – це тип СПР, який базується на комунікаціях та спільній підтримці прийняття рішень. Проста дошка оголошень або ланцюгова електронна пошта – найпростіший рівень функціональності. СПР на основі повідомлень дозволяє двом або більше людям спілкуватися один з одним, обмінюватися інформацією та координувати свою діяльність [61]. Системи підтримки групового прийняття рішень, або GDSS, є гібридним типом DSS, який дозволяє кільком користувачам працювати разом у групах за допомогою різних програмних засобів. Прикладами засобів підтримки груп є: аудіо та відео конференції, дошки оголошень і веб-конференції, обмін документами,

електронна пошта, програмне забезпечення для відео повідомлень [61].

Програмне забезпечення DSS на основі повідомлень містить принаймні одну з наступних характеристик:

- дозволяє спілкуватися між групами людей;
- сприяє обміну інформацією;
- підтримує співпрацю та координацію між людьми;
- підтримує групові рішення.

Ключові дослідницькі питання для DSS, керованих повідомленнями, включають вплив на групові процеси та групову обізнаність, багатокористувацькі інтерфейси, контроль паралельності, комунікацію та координацію всередині групи, спільний інформаційний простір і підтримку відкритого середовища, яке інтегрує існуюче користувацьке середовище.

Основна мета СПР, керованих документами, полягає в тому, щоб допомогти особам, які приймають рішення, і менеджерам отримувати інформацію та знання з даних і документів. Ці системи спрямовані підтримувати управлінську діяльність, таку як управлінський контроль і стратегічне планування. Він також має на меті забезпечити процес прийняття рішень [96].

СПР, керовані документами, в основному зосереджені на зборі, аналізі та організації неструктурованих документів. Отже, документи класифікуються на три основні категорії, як наведено в таблиці 1.1 із прикладами кожної категорії [101, 102]:

Таблиця 1.1 – Опис типів документів у СПР,
що керуються документами

<i>Типи документів</i>	<i>Приклади</i>
Усні (неписані) документи	Усні лекції, офіційні промови
Відео документи	Відеофільми, телевізійна реклама та новини
Письмові документи	Електронні листи, звіти, каталоги

Однак лише 10–15% цих документів використовуються для прийняття рішень. Крім того, документи є неструктурованими. Головне завдання керівників вищої ланки та ІТ-працівників виникає в тому, щоб зв'язувати документи за допомогою DSS і зберігати їх у базах даних, щоб вони були доступні для доступу, опрацьовані та проаналізовані для підтримки процесу прийняття рішення [120].

СПП, що керовані документами, мають кілька особливостей, які відрізняють його від інших типів. З точки зору користувача, то користувач може отримати необхідні дані за допомогою збережених запитів, власного пошуку, а інколи система надає інтерфейс для логічних операторів. Крім того, деякі системи забезпечують пошук метаданих, тобто даних, які містять таку інформацію, як дата зміни, збережений файл, номери версій, автор документа та інша історія, деякі індексні дані, які можуть бути згенеровані людиною або машиною. До індексних даних можна віднести ключові слова, тему та/або назви, які вважаються змістом колекції документів. Крім того, деякі системи включають тригери та сповіщення, щоб допомогти користувачі встановлювати правила для сповіщень і попередньо визначених дій, коли відбуваються зміни в документах

або виконання завдань обробки рішень. Навігація по документах і перегляд дозволяє користувачам досліджувати та швидко сканувати документи [120].

На сьогодні СПР, які керовані документами є однією з найважливіших систем управління в сучасному середовищі бізнесу, які використовуються багатьма організаціями через їх вирішальну роль в успішному менеджменті в різних галузях.

СПР, на основі веб – це комп'ютеризована система, яка надає інформацію для підтримки прийняття рішень або інструменти підтримки прийняття рішень менеджеру або бізнес-аналітику за допомогою веб-браузера «тонкого клієнта», а комп'ютерний сервер, на якому розміщено програму DSS, з'єднаний з комп'ютером користувача мережею за допомогою відповідного протоколу. Веб-сервер DSS може керуватися зв'язком, даними, документами, знаннями, моделями, або містить гібридне управління.

Основна структура СПР, на основі веб, включає користувачів, відповідні входи та виходи. Архітектура таких СПР включає різноманітні технології, що підтримуються різними DSS. Методи включають дані, інтелектуальний аналіз, містять інформацію про методи видобування даних, таких як шлях до встановлення зв'язку між веб-інформацією [23, 118, 141].

СПР, що керуються даними, є спеціалізованими програмними рішеннями для отримання, управління та представлення інформації. Ці системи зазвичай розробляються з використанням тих самих програмних засобів, технологій і процесів, які використовуються

для створення будь-якого іншого типу програмного забезпечення [93]. Системи, що керуються даними, – це програмні рішення для управління інформацією та даними. Системи даного типу виконують дві основні функції – це отримання та представлення інформації.

Збір інформації зазвичай виконується за допомогою форм введення даних або через взаємодію із зовнішніми джерелами даних. Представлення інформації стосується пошуку та відображення збереженої інформації для користувача з відповідними засобами навігації та запитів. Системи, керовані даними, також характеризуються потребою інтенсивної взаємодії з користувачем як для отримання, так і для пошуку інформації. Вони поза сумнівом серед найпоширеніших типів адаптованих програмних систем, які використовуються сьогодні. Системи реєстрації в університетах, програми електронної комерції, системи управління контентом, фінансові та бухгалтерські додатки – це декілька прикладів програм, керованих даними [17, 26, 93].

Системи сховищ даних, які дозволяють маніпулювати даними за допомогою комп'ютеризованих інструментів, адаптованих до конкретного завдання та налаштувань, або більш загальних інструментів і операторів, які надають додаткові функції. СПР, що керуються даними із онлайн-аналітичною обробкою (OLAP) забезпечують найвищий рівень функціональності та підтримки прийняття рішень, пов'язаних з аналізом великих обсягів

історичних даних. EIS (виконавчі інформаційні системи) та GIS (геоінформаційні систем) є СППР спеціального призначення, які керовані даними [85, 108].

Сховище даних – це база даних, яка використовується для формування рішень в організаціях. Вона пакетно оновлюється та структурується для швидких онлайн-запитів і управлінських висновків. У сховищах даних розміщаються великі обсяги даних різної структури та походження. Сховище даних – це інтегрований, предметно-орієнтований, змінний у часі, енергонезалежний набір даних для підтримки процесу прийняття рішень керівництвом [85, 108].

Програмне забезпечення онлайнної аналітичної обробки (OLAP) використовується для маніпулювання даними з різних джерел, які зберігаються в статичному сховищі даних. ПЗ може створювати різноманітні перегляди та представлення даних. Для визначення програмного продукту додатком OLAP, він має містити три наступні ключові характеристики: 1. багатовимірне представлення даних; 2. складні розрахунки; 3. можливості обробки, орієнтовані на час [14, 140].

Інформаційні системи (EIS) – це комп'ютеризовані системи, призначені для надання актуальної та відповідної інформації для підтримки прийняття виконавчих рішень для менеджерів за допомогою мережевої робочої станції [20]. Основна увага приділяється графічним дисплеям і зручному інтерфейсу, які

представляють інформацію з корпоративної бази даних. Вони є інструментами для надання готових звітів або брифінгів керівникам найвищого рівня. EIS пропонує потужні звіти та можливості деталізації.

Геоінформаційна система (GIS) або Spatial DSS – це система підтримки, яка представляє дані за допомогою карт. Це допомагає людям отримувати доступ, відображати та аналізувати дані, які мають географічний зміст і значення [18, 115].

Незважаючи на існування постійного попиту на розробку нових керованих даними систем, вони здебільшого розробляються як одноразові проекти з незначним повторним використанням поза тим, що пропонують технології розробки та мови програмування, які використовуються.

СПР, що керуються моделями – дозволяють користувачеві аналізувати та маніпулювати конкретними моделями даних. Ці системи підтримки прийняття рішень є специфічними для типу моделі, з якою користувач хоче взаємодіяти, і зазвичай вимагають та пропонують менше даних, ніж інші типи DSS. Вони аналізують сценарії та дані, щоб дозволити користувачеві маніпулювати моделлю, наприклад створювати робочий графік, генерувати відповідну діаграму. Вони можуть використовувати прості інструменти аналізу або складну статистику, залежно від мети моделі та потреб користувача. Менеджери, персонал і треті сторони,

які взаємодіють з компанією, можуть використовувати СПР, що керуються моделями [10, 119].

Системна архітектура СПР, що керуються моделями, має апаратну інфраструктуру та пакет програмного забезпечення. Він поділяється на керування інтерфейсом користувача, управління збором даних і управління знаннями. Інтегрована модель аналізу рішень може бути включена в архітектуру системи для реалізації, як показано на рисунку 1.2 [81].

Прикладами програмного забезпечення СПР, що керуються моделями є наступні групи: програмне забезпечення для планування, економіко-математичне моделювання, моделювання аналізу рішень, програмне забезпечення для оптимізації.

СПР, що керується знаннями – це інтелектуальні системи зі спеціалізованим досвідом вирішення проблем. Експертне рішення, яке формується із використанням даного класу СПР складається зі знань про певну область, розуміння проблем у цій галузі та «навички» вирішення деяких із цих проблем. Схожою концепцією є інтелектуальний аналіз даних. Це відноситься до класу аналітичних програм, які шукають приховані шаблони в базі даних. Інтелектуальний аналіз даних – це процес просіювання великих обсягів даних для створення зв'язків вмісту даних. Інструменти, які використовуються для побудови СПР на основі знань, іноді називають методами інтелектуальної підтримки прийняття рішень [144].

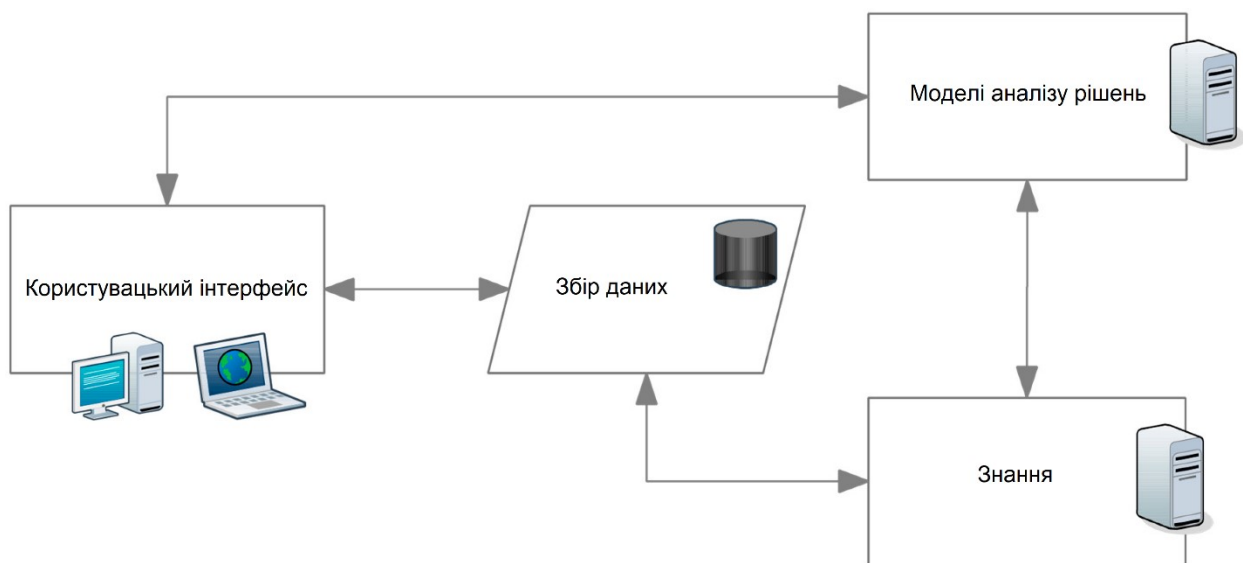


Рисунок 1.2 – Узагальнена архітектура СПР, що керуються моделями [81]

Завдяки СПР, що керується знаннями, система управління знаннями відстежує постійно оновлюванні дані про організацію для підтримки рішень. СПР використовує діагностику, передбачення, інтерпретацію та класифікацію, щоб рекомендувати дії, які відповідають бізнес-проектам. Керована знаннями СПР може бути корисною для менеджерів, оскільки виконує завдання швидше, ніж може людина. Вони також можуть допомогти споживачам вирішити, які продукти та послуги купувати. Цей тип DSS часто покладається на компонент інтелектуального аналізу даних. Менеджери, персонал і зовнішні користувачі, наприклад клієнти, можуть використовувати DSS, що керується знаннями.

Приклади програмного забезпечення СПР, що керується знаннями, включають: програмне забезпечення, яке визначає нових

або поточних клієнтів, які можуть бути зацікавлені в продуктах, програмне забезпечення підбору товару тощо [90].

У таблиці 1.2. представлено порівняльний аналіз відомих систем підтримки прийняття рішень.

Таблиця 1.2 – Типи систем підтримки прийняття рішень

Атрибути	СПР, що керуються повідомленнями	СПР, що керуються документами	СПР, на основі веб	СПР, що керуються даними	СПР, що керуються моделями	СПР, що керуються знаннями
Призначення	Організація зустрічей Обмін повідомленнями	Пошук веб-сторінок Пошук документів	Підтримка прийняття рішень на основі веб	Допомагає розв'язати переважно неструктуровані проблеми Відображення розробки та знаходження відношень або шаблонів. Користувач переважно взаємодіє з даними.	Використовуються для розв'язку чіткої та структурованої проблеми Користувач переважно взаємодіє з математичною моделлю та результатами	Поради для прийняття рішень Вибір продуктів
Група користувачів	Внутрішні та зовнішні користувачі	Спеціалісти Менеджери	Спеціалісти	Менеджери Інший персонал	Керівники та персонал Клієнти	Внутрішні користувачі Клієнти
Включення технології	Локальна або глобальна мережа Веб-інтерфейс	Веб-інтерфейс	Веб-інтерфейс	Mainframe Локальна мережа Веб-інтерфейс	Автономний, веб-інтерфейс, ПК	Локальна або глобальна мережа Веб-інтерфейс
Тип моделі	Комунікації Моделі рішень	Когнітивне моделювання Нечітка теорія	Комунікації	Містить, загалом, прості моделі.	Містить, загалом, різноманітні і складні моделі.	Використовується спеціальна модель для обробки правил або ідентифікації зв'язків у даних.
Кількість даних	Велика кількість даних	Усні Письмові Відеодані потребують великого обсягу даних.	Велика кількість даних	Великі обсяги даних мають вирішальне значення.	Велика кількість даних не потрібна	Використовуються схожі знання, а тому потрібна велика кількість даних
Основний інструмент або компонент	Кімнати для прийняття рішень, двосторонні інтерактивні відеоконференції, чати	Технології зберігання та обробки документів	Технології дистанційного опрацювання даних	Історичні дані Онлайн аналітична обробка Інструменти звітності	Алгебраїчні Рішення є Аналітичним Моделювання	Бізнес-правила та бази знань

В результаті проведеного аналізу встановлено, що СПР, які найбільше підходять для підтримки прийняття рішень в різних предметних областях, зокрема медицині та екології, а особливо враховуючи умови невизначеності процесів в даних предметних областях – СПР, що керуються даними, моделями та знаннями.

Невід'ємною компонентою зазначених типів СПР є математичні моделі, а виходячи із специфіки досліджуваних в роботі предметних областей, саме застосування математичного моделювання дозволить отримувати необхідні управлінські рішення, виходячи із складності об'єкта.

1.2. Аналіз методів та засобів побудови моделей характеристик складних об'єктів в умовах невизначеності

Модель об'єкта представляється у вигляді певного типу рівнянь, це можуть бути диференціальні рівняння або, наприклад, алгебраїчні для статичних об'єктів, які описуються наступним відношенням [11, 17, 18, 58, 60, 63, 71, 77, 94, 116, 123, 130, 145, 156, 157, 167]:

$$y = \Phi(\vec{x}, \vec{p}), \quad (1.1)$$

де y - вихідна характеристика; \vec{x} – вектор вхідних змінних; \vec{p} – вектор невизначених факторів або похибок; Φ – диференціальний чи алгебраїчний оператор (для статичних об'єктів), що здійснює

перетворення вхідних змінних та невизначених факторів у представлений результат спостереження вихідної характеристики.

Зазначений підхід використовується в теорії систем та в теорії ідентифікації моделей складних об'єктів.

Розглянемо випадок, коли Φ – деякий параметр моделі, і, відповідно, отримаємо вираз для математичної моделі наступного вигляду:

$$\hat{y} = \phi_1 \varphi_1(\vec{x}) + \dots + \phi_m \varphi_m(\vec{x}), \quad (1.2)$$

де \hat{y} – результат моделювання, що характеризує значення вихідної характеристики складного об'єкта; ϕ_1, \dots, ϕ_m – параметри (коефіцієнти) моделі; $\varphi_1(\vec{x}), \dots, \varphi_m(\vec{x})$ – вектор базисних функцій для представлення вхідних змінних.

В теорії ідентифікації моделей систем [100, 122, 151, 156] розглядають параметричну та структурну ідентифікацію. Для параметричної ідентифікації вектор базисних функцій $\varphi(\vec{x})$ є відомим, а невідомими залишаються тільки параметри ϕ . Для структурної ідентифікації невідомими є базисні функції і відповідно параметри математичної моделі [48, 109, 110, 163].

Для обох типів ідентифікації налаштування здійснюють на основі отриманих результатів проведеного експерименту, який можна описати у наступному матричному представленні:

$$F = \begin{pmatrix} \varphi_1(\vec{x}_1) \cdots \varphi_m(\vec{x}_1) \\ \varphi_1(\vec{x}_2) \cdots \varphi_m(\vec{x}_2) \\ \vdots \\ \varphi_1(\vec{x}_i) \cdots \varphi_m(\vec{x}_i) \\ \vdots \\ \varphi_1(\vec{x}_{N-1}) \cdots \varphi_m(\vec{x}_{N-1}) \\ \varphi_1(\vec{x}_N) \cdots \varphi_m(\vec{x}_N) \end{pmatrix}; \vec{Y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ y_{N-1} \\ y_N \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

У наведеному вище представлені неврахований вектор набору невизначених факторів або похибок. По своїй природі ці фактори видозмінюють вихідну характеристику складного об'єкта, що є обґрунтованим в теорії систем. Для представлення невизначеності використовують різні моделі [151, 156, 157]: стохастичну, нечітку чи інтервальну.

Для стохастичної моделі невизначеність представляється за вихідною змінною наступним відношенням

$$y = y_0 + e, \quad (1.4)$$

де y – спостережуване значення вихідної характеристики складного об'єкта, y_0 – істинне невідоме значення; e – похибка, яка описує невизначеність через дію вектора випадкових чинників \vec{p} .

Для представлення інтервальної невизначеності використовують наступні умови

$$y_{0i} \in [y_i^-, y_i^+] \quad \forall i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (1.5)$$

де $[y_i^-, y_i^+]$ $i=1, \dots, N$ – межі значень вихідних характеристик спостережуваного об'єкта.

Для нечіткого представлення вихідних характеристик, до спостережуваного значення додають такий тип характеристики як «впевненість», а значення цієї характеристики обчислюють в інтервалі від 0 до 1. Зазначену характеристику представляються деякою функцією належності $\mu(y)$:

$$y_{0i}^{\mu(y)} \in [y_i^-, y_i^+] \forall i = 1, \dots, N. \quad (1.6)$$

Розглянуті випадки вимагають більше інформації про досліджуваний об'єкт, який використовується для побудови математичних моделей в системах прийняття рішень, які орієнтовані на дані, моделі чи знання [10].

Саме для знання-орієнтованих систем, які у своїй основі використовують дані, моделі чи знання, цей спосіб є найбільш прийнятним у випадку обмеженості інформації, оскільки він дає можливість створити математичні моделі складних об'єктів з гарантованими прогностичними властивостями [151-154].

При розв'язанні зазначеного вище класу задач найчастіше використовуються методи, які ґрунтуються на дедуктивному та індуктивному підходах, класифікацію яких представлено на рисунку 1.3.

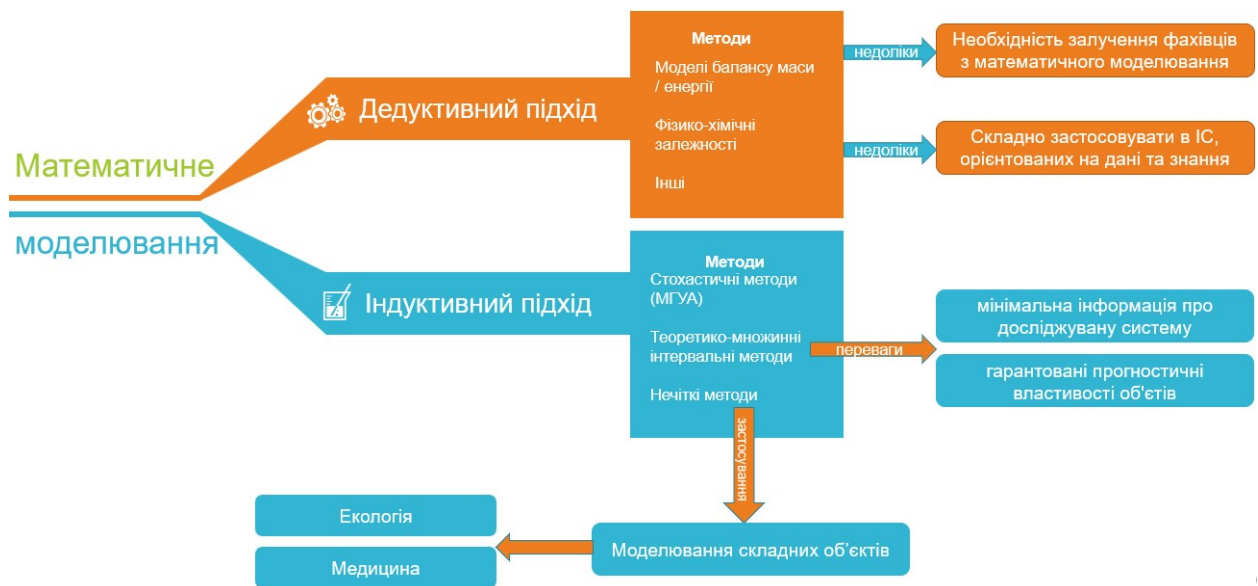


Рисунок 1.3 – Класифікація методів математичного моделювання в рамках дедуктивного та індуктивного підходів

Для побудови математичних моделей зазначеного класу складних об'єктів спільною характеристикою є необхідність синтезу моделі при невідомій структурі та відповідно параметрах. Для побудови моделей такого типу часто використовують дедуктивний підхід, коли загальний вигляд диференціального рівняння визначають виходячи з певних фізичних міркувань, з подальшими процедурами дискретизації та розв'язання.

Проте, для реалізації дедуктивних методів необхідно детально вивчити фізичні характеристики процесу, наприклад визначити коефіцієнти дифузії чи масоперенесення, а це призводить до суттєвого ускладнення задач математичного моделювання. У деяких випадках застосування зазначеного підходу взагалі не є прийнятним через те, що деякі структурні елементи моделі, виходячи із математичної точки зору, можна адекватно трактувати.

Водночас, це досить суттєво ускладнює саму математичну модель і підвищує обчислювальну складність її використання.

Іншим напрямком математичного моделювання є індуктивний підхід, який базується на самоорганізованому процесі еволюційного переходу від експериментальних даних до побудови конкретних математичних моделей, які відображають закономірності функціонування імітованих об'єктів і систем, які закладені в існуючих експериментальних дослідженнях та статистичних даних [7, 57, 66-70, 92, 135, 165, 166].

Важливою особливістю реалізації індуктивного підходу є характер невизначеності в інформаційних масивах даних (імовірнісна, інтервальна, нечітка).

До відомих індуктивних методів належать: метод групового урахування аргументів (МГУА), редукції, методи з використанням генетичних алгоритмів та ін [7, 57, 68, 165, 166]. Суттєві результати при дослідженні на основі індуктивного підходу отримали наукові школи відомих учених: Акаїке Н., Haber R., Ljung L., Дивака М. П., Івахненка О. Г., Степашка В. С. та інших.

Деякі з зазначених методів характеризується високою обчислювальною складністю в процесі пошуку моделі, яка часто може бути і не оптимальною, тобто «заскладною», а такі методи як МГУА, не дозволяють утримувати задану точність моделювання в межах похибок даних експериментів [42].

Для досліджуваних складних об'єктів, переважно експериментальні дані формуються з вимірювальних пристроїв, що

мають визначені похибки вимірювань. Для врахування невизначеності в експериментальних даних необхідно використовувати методи, які ґрунтуються на інтервальному аналізі даних.

Розглянемо детальніше особливості процесу математичного моделювання в умовах інтервальної невизначеності.

1.3. Методи математичного моделювання на основі інтервального аналізу та їх використання в задачах структурної та параметричної ідентифікації моделей складних об'єктів

1.3.1. Постановка задачі математичного моделювання на основі інтервальних даних

Автори інтервального підходу [5, 27, 30, 34-36, 43, 151, 156, 157] заявляють, що він має ряд переваг перед стохастичним (імовірнісним) підходом. Серед них – відсутність вимоги дослідження статистичних характеристик об'єкта моделювання. Як відомо, це зменшує кількість експериментів (відбір та накопичення даних). Тому інтервальний підхід більш корисний для дослідження властивостей складного об'єкта в умовах обмеженої вибірки даних. Для розробки систем підтримки прийняття рішень, які орієнтовані на дані, моделі та знання, слід детального розглянути основні поняття цього підходу .

При дослідженні об'єктів, процесів та явищ в різних галузях знань виникає необхідність встановлення причинно-наслідкових зв'язків між спостережуваними властивостями складних об'єктів та факторами, що відображають вплив зовнішнього середовища на них. При цьому такі об'єкти розглядають як статичні системи, в яких проігноровані перехідні процеси, та будують моделі типу «чорної скриньки» [1, 2].

Статичні об'єкти, як правило, описують функціональними залежностями між вхідними значеннями факторів впливу на систему та вихідними значеннями характеристик у вигляді аналітичного виразу:

$$y(\lambda_k, X) = f_{m_k+1}^k(\vec{\beta}_1^k(X)) \cdot f_1^k(X) + \\ + f_{m_k+2}^k(\vec{\beta}_2^k(X)) \cdot f_2^k(X) + \dots + f_{2m_k}^k(\vec{\beta}_{m_k}^k(X)) \cdot f_{m_k}^k(X), \quad (1.7)$$

де

$y(\lambda_k, X)$ – модельоване значення характеристики об'єкта;

$\vec{\beta}(X)$ – вектор нелінійних параметрів моделі, значення яких потрібно оцінити на основі інтервальних даних;

$\lambda_k = \{ \lambda_k^X, \lambda_k^\beta \}$ – структура моделі, яка складається з множини базисних функцій, що визначають структурні елементи на основі даних X , $\lambda_k^X = \{ f_1^k(X), f_2^k(X), \dots, f_{m_k}^k(X) \}$ та множини базисних функцій, що визначають характер нелінійності параметрів $\vec{\beta}(X)$,

$\lambda_k^\beta = \left\{ f_{m_k+1}^k \left(\vec{\beta}_1(X) \right), f_{m_k+2}^k \left(\vec{\beta}_2(X) \right), \dots, f_{2m_k}^k \left(\vec{\beta}_{m_k}(X) \right) \right\}$; X – інтервальні

дані у вигляді:

$$\vec{X}_i \rightarrow [y_i^-; y_i^+], i = 1, \dots, N, \quad (1.8)$$

де

$[y_i^-; y_i^+]$ – нижня та верхня межі експериментально отриманих

значень характеристики об'єкта в i -му спостереженні, $i = 1, \dots, N$;

\vec{X}_i – значення факторів впливу на систему або характеристику об'єкта в i -му спостереженні;

m_k – задана кількість параметрів моделі.

Якщо для заданої структури моделі на основі множини базисних функцій λ_k отримані інтервальні оцінки вектора параметрів $[\vec{\beta}^k]$, то k -та модель-претендент для опису залежності характеристики об'єкта від вхідних даних матиме вигляд інтервального нелінійного алгебраїчного виразу:

$$\begin{aligned} [\hat{y}(\lambda_k, X)] = & f_{m_k+1}^k \left(\left[\vec{\beta}_1^k(X) \right] \right) \cdot f_1^k(X) + \\ & + f_{m_k+2}^k \left(\left[\vec{\beta}_2^k(X) \right] \right) \cdot f_2^k(X) + \dots + f_{2m_k}^k \left(\left[\vec{\beta}_{m_k}^k(X) \right] \right) \cdot f_{m_k}^k(X) \end{aligned}, \quad (1.9)$$

де

$[\hat{y}(\lambda_k, X)] = [\hat{y}^-(\lambda_k, X); \hat{y}^+(\lambda_k, X)]$ – обчислена інтервальна

оцінка модельованої характеристики відповідно до структури λ_k та вхідних даних X ;

$$\left[\vec{\beta}^k \right] = \left(\left[\vec{\beta}_1^k (X) \right], \left[\vec{\beta}_2^k (X) \right], \dots, \left[\vec{\beta}_{m_k}^k (X) \right] \right) - \text{вектор інтервальних}$$

оцінок параметрів моделі-претендента.

На основі умови, що обчислені інтервальні оцінки повинні належати числовим інтервалам

$$\left[\hat{y}^-(\lambda_k, X); \hat{y}^+(\lambda_k, X) \right] \in \left[y^-; y^+ \right] \quad (1.10)$$

цієї характеристики об'єкта, які отримані експериментально, отримуємо математичну задачу для обчислення інтервальних оцінок вектора параметрів $\left[\vec{\beta}^k \right]$ моделі-претендента на основі структури λ_k

$$\begin{aligned} y_i^- &\leq f_{m_k+1}^k \left(\left[\vec{\beta}_1^k (\vec{X}_i) \right] \right) \cdot f_1^k (\vec{X}_i) + \\ &+ f_{m_k+2}^k \left(\left[\vec{\beta}_2^k (\vec{X}_i) \right] \right) \cdot f_2^k (\vec{X}_i) + \dots \\ &+ f_{2m_k}^k \left(\left[\vec{\beta}_{m_k}^k (\vec{X}_i) \right] \right) \cdot f_{m_k}^k (\vec{X}_i) \leq y_i^+ \\ &i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (1.11)$$

Отримана система (1.11) є інтервальною системою нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР) для невідомих інтервальних оцінок вектора параметрів $\left[\vec{\beta}^k \right]$ моделі-претендента на основі λ_k . Функціональна залежність у формі виразу (1.9) називається інтервальною моделлю об'єкта, що розглядається як статична система. Модель будується на основі експериментальних спостережень за модельованою характеристикою об'єкта.

Множина розв'язків ІСНАР Ω визначає вектор інтервальних оцінок параметрів $[\vec{\beta}^k]$ моделі. Через високу (комбінаторну) обчислювальну складність розв'язку цієї ІСНАР, на практиці обчислюються лише точкові оцінки параметрів $\vec{\beta}^k$. У цьому випадку, для оцінки параметрів розв'язують оптимізаційну задачу такого вигляду:

$$\delta(\vec{\beta}^k(X))^{\vec{\beta}^k(X)} \rightarrow \min \quad (1.12)$$

$$\lambda_k \in \lambda_s, \quad (1.13)$$

$$i = 1, \dots, N.$$

де

$\lambda_s = \{\lambda_s^X, \lambda_s^\beta\}$ – множина всіх можливих елементів структури

інтервальної моделі:

$$\lambda_s^X = \{f_1(X), f_2(X), \dots, f_{m_s}(X)\}$$

$$\lambda_s^\beta = \{f_{m_s+1}(\vec{\beta}_1(X)), f_{m_s+2}(\vec{\beta}_2(X)), \dots, f_{2m_s}(\vec{\beta}_{m_s}(X))\};$$

m_s – кількість структурних елементів (максимально можлива кількість параметрів);

У виразі (1.12), цільова функція $\delta(\vec{\beta}^k(\vec{X}))$ формується на основі врахування обмежень, які задає інтервальна система нелінійних алгебраїчних рівнянь (1.11).

Стосовно динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами, то цю постановку задачі ідентифікації математичної моделі розглянемо у більш розширеному вигляді, оскільки вона є більш загальною у порівнянні із випадком ідентифікації моделі статичного об'єкта. Як і у попередньому випадку, суть полягає також у представленні даних у вигляді інтервалів можливих значень модельованої характеристики [5, 27, 30, 34-36, 43-46, 50, 80, 103-105, 124, 131, 132, 158]:

$$[z_{(i,j,h,k)}^-; z_{(i,j,h,k)}^+],$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, I, j = 0, 1, 2, \dots, J, h = 0, 1, 2, \dots, H, k = 0, 1, 2, \dots, K, \quad (1.14)$$

де $[z_{(i,j,h,k)}^-; z_{(i,j,h,k)}^+]$ – відповідно нижня та верхня межі інтервалів можливих значень вихідної характеристики в точці з дискретно заданими просторовими координатами $i = 0, \dots, I, j = 0, \dots, J, h = 0, \dots, H$ (для об'єктів із розподіленими параметрами) та часовими $k = 0, \dots, K$ (для динамічних об'єктів, наприклад динаміка забруднення повітря від транспортних засобів в дискретний час).

Зауважимо, що у вимірювальному експерименті нижня і верхня межі можуть бути встановлені відносною похибкою вимірювального приладу:

$$z_{(i,j,h,k)}^- = z_{(i,j,h,k)} - z_{(i,j,h,k)} \cdot \varepsilon \quad \text{і}$$

$$z_{(i,j,h,k)}^+ = z_{(i,j,h,k)} + z_{(i,j,h,k)} \cdot \varepsilon, \quad \text{де } z_{(i,j,h,k)} - \text{вимірне значення}$$

характеристики; ε є відносною похибкою вимірювання.

Далі необхідно визначити математичний об'єкт для представлення моделі об'єкта. У даному випадку він обмежується дискретною лінійною моделлю в наступному представленні

$$\begin{aligned} v_{(i,j,h,k)} &= \vec{f}^T (v_{(i-d,j-d,h-d,k-d)}, v_{(i-d+1,j-d,h-d,k-d)}, \dots, v_{(i-1,j-1,h-1,k-1)}, \\ &\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}) \cdot \vec{g}, \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K$$

де $\vec{f}^T(\bullet)$ – вектор базисних функцій, в загальному випадку нелінійних, за допомогою яких перетворюються значення модельованої характеристики об'єкта, а також вхідні змінні в дискретних точках простору та за певний дискретний час.

У результаті виконання процедури структурної ідентифікації визначається дискретна модель, зокрема: вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$; множини та розмірність векторів вхідних змінних $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$; d є порядком дискретної моделі, який, як відомо, еквівалентний порядку диференціального рівняння, аналогічного дискретній моделі. Для побудови дискретної моделі в інтервальному вигляді необхідно також сформулювати початкові умови, тобто значення кожного елемента в множині $v_{0,0,0,0}, \dots, v_{d-1,d-1,d-1,d-1}, \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ для певного дискретного значення, як правило початкового, і задати значення компонентів у векторі параметрів \vec{g} .

Якщо загальний вигляд дискретної моделі відомий, наприклад з фізичних міркувань, залишається ідентифікувати параметри \vec{g} таким чином, щоб забезпечити максимальну узгодженість модельованої характеристики складного об'єкта із значеннями цієї характеристики, які отримані на основі проведених експериментів. Ця задача називається задачею параметричної ідентифікації [49, 52, 151, 157].

Припустимо, що вектор оцінок $\hat{\vec{g}}$ параметрів \vec{g} у різницевому операторі (1.15) отримано на основі інтервального аналізу даних. Підставляючи вектор оцінок параметрів $\hat{\vec{g}}$ з різницевого оператора замість вектора їх істинних значень \vec{g} у вираз (1.15) разом із заданими початковими інтервальними значеннями кожного елемента множини $\hat{v}_{0,0,0,0,\dots}, \hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}$ заданих векторів вхідних змінних $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ можна отримати інтервальну оцінку модельованої характеристики $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$ в точках з дискретними просторовими координатами $i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H$ і дискретними за часом $k = d, \dots, K$:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_{i,j,h,k}] &= [\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+] = \vec{f}^T \left([(\hat{v}_{(i-d,j-d,h-d,k-d)}), \dots, \right. \\ & \left. [(\hat{v}_{(i-1,j-1,h-1,k-1)}), \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}], \vec{g}, \right. \\ & \left. i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K \right) \end{aligned} \quad (1.16)$$

Тепер можна математично сформулювати задачу параметричної ідентифікації інтервальної дискретної моделі (ІДМ) на основі інтервального аналізу даних. Умови узгодження експериментальних даних, поданих в інтервальній формі (1.14), з даними, отриманими на основі макромоделі у формі ІДМ (1.16), формують так як і у випадку статичного об'єкта [224, 230, 231]:

$$\left[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+ \right] \subseteq \left[z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+ \right],$$

$$\forall i = 0, \dots, I, \forall j = 0, \dots, J, \forall h = 0, \dots, H, \forall k = 0, \dots, K \quad (1.17)$$

Вказані у відношенні (1.17) умови забезпечують формування оцінок модельованої характеристики складного об'єкта в межах можливих значень характеристики, які отримано експериментально.

Підставимо в рівняння (1.17) замість інтервальних оцінок $\left[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+ \right]$ змодельованої характеристики її інтервальні значення, розраховані на основі ІДМ (1.16) разом з урахуванням заданих значень кожного елемента:

$$\left[\hat{v}_{0,0,0,0} \right] \subseteq \left[z_{0,0,0,0} \right], \dots, \left[\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1} \right] \subseteq \left[z_{i-1,j-1,h-1,k-1} \right], \quad (1.18)$$

і задані вектори вхідних змінних $\vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}$ отримаємо

$$\left\{ \begin{array}{l} \left[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+ \right] \subset \left[z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+ \right]; \\ \left[\hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+ \right] \subseteq \\ \subseteq \left[z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+ \right]; \\ z_{i,j,h,k}^- \leq \vec{f}^T \left(\left[\hat{v}_{(i-d,j-d,h-d,k-d)} \right], \dots, \right. \\ \left. \dots, \left[\hat{v}_{(i-1,j-1,h-1,k-1)} \right], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k \right) \vec{g} \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K. \end{array} \right. \quad (1.19)$$

Таким чином, рівняння (1.19) отримано шляхом підстановки інтервальних оцінок початкової характеристики $\left[\hat{v}_{i,j,h,k}^-; \hat{v}_{i,j,h,k}^+ \right]$ (заданих як початкові умови та прогнозованих на основі виразу (1.16)) в умови (1.17).

Як відомо, отримана система є інтервальною системою нелінійних алгебраїчних рівнянь (ІСНАР). Отже, задача ідентифікації параметрів ІДМ (1.16) за умов (1.17) є задачею розв'язування ІСНАР у формі (1.19).

Слід зазначити, що ІСНАР (1.19) формується рекурентно. Загальна кількість інтервальних рівнянь є добутком $I \times J \times H \times K$. Очевидно, що чим більше рівнянь в інтервальній системі, тим складніше знайти розв'язок ІСНАР.

Враховуючи те, що ця задача не може бути розв'язана за задану кількість ітерацій, цей тип задачі належить до NP-повних [13, 14, 74, 151]. Єдиний спосіб вирішити цю проблему – виконати повний або випадковий пошук. Враховуючи складність задачі параметричної ідентифікації ІДМ, для знаходження хоча б одного

рішення ІСНАР можна використовувати методи випадкового пошуку [151].

Ці обчислювальні схеми для реалізації методу параметричної ідентифікації ІДМ базуються на чотирьох-крокових процедурах [47, 52, 151, 156, 157].

Крок 1. Задати початкові умови у формі (1.18).

Крок 2. Задати початкову \hat{g}_0 або випадково сформувану поточну \hat{g}_l оцінку вектора параметрів ІДМ.

Крок 3. Розрахунок інтервальних оцінок модельованої характеристики $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$ в точках з координатами $i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H$ та дискретними за часом $k = d, \dots, K$ за допомогою рекурентної схеми (1.17).

Крок 4. Перевірити «якість» $\delta(\hat{g}_l)$ поточної апроксимації оцінки \hat{g} вектора параметрів ІДМ [47, 52, 151].

На цьому кроці припустимо, що «якість» апроксимації буде вищою, якщо прогнозований коридор, який побудований на основі цієї апроксимації вектора параметрів, буде ближче до експериментального.

Якщо розраховане значення «якості» $\delta(\hat{g}_l)$ поточної апроксимації оцінки \hat{g} вектора параметрів ІДМ на поточній ітерації дорівнює нулю $\delta(\hat{g}_l) = 0$, то процедуру закінчено, інакше переходимо до кроку 2.

Якість апроксимації буде кількісно визначена як різниця між центрами найбільш віддалених інтервалів, прогнозованого та експериментального відповідно, у випадку, якщо вони не перетинаються і ширина перетину прогнозованого та експериментального інтервалів є найменшою – для випадку їх перетину [151, 156]. Формально ці умови можна записати наступним чином:

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}([\hat{v}_{i,j,h,k}]) - \text{mid}([z_{i,j,h,k}]) \right| \right\},$$

якщо $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] = \emptyset$

$\exists i = d, \dots, I, \exists j = d, \dots, J, \exists h = d, \dots, H, \exists k = d, \dots, K$

(1.20)

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \begin{array}{l} \text{wid}([\hat{v}_{i,j,h,k}]) - \\ - \text{wid}([\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}]) \end{array} \right\},$$

якщо $[\hat{v}_{i,j,h,k}] \cap [z_{i,j,h,k}] \neq \emptyset$

$\forall i = d, \dots, I, \forall j = d, \dots, J, \forall h = d, \dots, H, \forall k = d, \dots, K$

(1.21)

де $\text{mid}(\bullet)$ і $\text{wid}(\bullet)$ – операції визначення центру та ширини інтервалу відповідно до інтервальної арифметики.

Подібні умови також формулюються для ідентифікації моделі статичного об'єкта і потім перетворюють до оптимізаційної задачі (1.13).

Задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей складного об'єкта у вигляді різницевого рівняння (1.15) формалізуємо у вигляді наступної оптимізаційної задачі [151, 157]:

$$\delta(\hat{\mathbf{g}}_l) = \min_{\hat{\mathbf{g}}_l} \rightarrow \min, \hat{\mathbf{g}}_l \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}], j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, s \quad (1.22)$$

де значення цільової функції $\delta(\hat{\mathbf{g}}_l)$ обчислюється за формулами (1.20) або (1.21).

Окремо розглянемо задачу структурної ідентифікації для цього випадку. Складність задачі налаштування ІДМ (1.16) полягає в тому, що невідомі не тільки параметри, але й структура. У цьому випадку для знаходження параметрів ІДМ необхідно вирішити задачу параметричної ідентифікації, а ідентифікації структури – структурної ідентифікації. Зауважимо, що обидві ці задачі дуже тісно пов'язані, оскільки параметрична ідентифікація є структурним етапом, і для пошуку одного розв'язку необхідно зробити багато спроб знайти вектор параметрів ІДМ. Успішність задачі пошуку вектора параметрів ІДМ безпосередньо залежить від успішності вибору його структури. Адже якщо визначена структура ІДМ є «невдалою», то розв'язок задачі параметричної ідентифікації знайти неможливо [151, 157].

Отже, параметрична ідентифікація є етапом структурної ідентифікації. Коли дані представлені в інтервальній формі, цей крок полягає в знаходженні оцінок параметрів ІДМ шляхом розв'язку ІСНАР (1.19) для відомого вектора базисних функцій, тобто множини структурних елементів ІДМ.

Для вирішення ІСНАР (1.19) використовується метод параметричної ідентифікації на основі процедур випадкового

пошуку. Застосування цього методу передбачає замість розв'язування ІСНАР (1.19) пошук деякого наближення до його розв'язку, що визначає якість поточної структури ІДМ [151, 156].

Математичну модель характеристики об'єкта у загальному вигляді розглядаємо, як дискретну модель у вигляді (1.16).

Для кожної базисної функції у виразі (1.15) введемо такий вектор

$$\hat{V} = (\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}, \hat{v}_{i-d+1,j-d,h-d,k-d}, \dots, \hat{v}_{j-d+1,d,d}, \dots, \hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \dots, \hat{v}_{i,j,h-1,k})^T \quad (1.23)$$

Критерієм достатньої точності математичної моделі (1.15) за таких умов є умови (1.17).

Як відомо, структура моделі є набір взаємопов'язаних компонент

$$\lambda_s = \{f_1^s(\hat{V}) \cdot g_1^s; f_2^s(\hat{V}) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\hat{V}) \cdot g_{m_s}^s\} \quad (1.24),$$

а їх адитивна згортка:

$$Q(\lambda_s) = f_1^s(\hat{V}) \cdot g_1^s + f_2^s(\hat{V}) \cdot g_2^s + \dots + f_{m_s}^s(\hat{V}) \cdot g_{m_s}^s \quad (1.25)$$

є дискретною моделлю об'єкта. У виразі (1.24), s – означає певний набір структурних елементів.

Оскільки для обчислень за різницевою схемою необхідно задати початкові умови

$$\begin{aligned} [\hat{v}_{0,0,0,0}^-; \hat{v}_{0,0,0,0}^+] &\subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\hat{v}_{1,d-1,1,0}^-; \hat{v}_{1,d-1,1,0}^+] &\subseteq [z_{1,d-1,1,0}^-; z_{1,d-1,1,0}^+], \dots, \\ [\hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] &\subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]. \end{aligned} \quad (1.26)$$

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

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}(\lambda_s, \vec{V})] = [f_1^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_1^s + [f_2^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_{m_s}^s, \quad (1.27)$$

а для їх ідентифікації отримуємо ІСНАР

$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_{0,0,0,0}^-; \hat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, \\ [\hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; \hat{v}_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1,d-1}^+]; \\ z_{i,j,h,k}^- \leq [f_1^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_1^s + [f_2^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_2^s + \dots + [f_{m_s}^s(\vec{V})] \cdot \hat{g}_{m_s}^s \leq z_{i,j,h,k}^+; \\ i = d, \dots, I, j = d, \dots, J, h = d, \dots, H, k = d, \dots, K. \end{array} \right. \quad (1.28)$$

У виразі (1.27)

$$f_i^s(\vec{V}) = f_i^s([\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \dots, [\hat{v}_{i,j-d,h,k}], \dots, [\hat{v}_{i,j,h-1,k}], \vec{u}_{i,j,h,0}, \dots, \vec{u}_{i,j,h,k}), \quad \text{а}$$

$$\vec{V} = [\hat{v}_{i-d,j-d,h-d,k-d}], \dots, [\hat{v}_{i,j-d,h,k}], \dots, [\hat{v}_{i,j,h-1,k}] - \text{інтервальний вектор з}$$

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 (1.27). Математичний вираз у вигляді (1.27) називаємо інтервальною дискретною моделлю об'єкта, яку налаштовуємо на основі спостережень за модельованою характеристикою об'єкта.

Якщо у ІСНАР (1.28) 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 [42, 161, 162]:

$$\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \xrightarrow{\lambda_s = \{f_1^s(\vec{V}) \cdot g_{l1}^s, f_2^s(\vec{V}) \cdot g_{l2}^s, \dots, f_{m_s}^s(\vec{V}) \cdot g_{lm_s}^s\}} \rightarrow \min, \quad (1.29)$$

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

$$\hat{g}_{jl}^s \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}], j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, S \quad (1.30)$$

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

У виразі (1.29), показник якості $\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s)$ – критеріальна функція, формується із ІСНАР (1.28) у спосіб, описаний у першому розділі і має такий вигляд

$$\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \begin{aligned} &mid(f_1^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{l1}^s + \\ &+ f_2^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{l2}^s + \dots + f_m^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{lm}^s) - mid([z_{i,j,h,k}]) \end{aligned} \right\} \quad (1.31)$$

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:

$$\delta(\lambda_s, \hat{\vec{g}}_l^s) = \max_{i=d, \dots, I, j=d, \dots, J, h=d, \dots, H, k=d, \dots, K} \left\{ \begin{aligned} &wid(f_1^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{l1}^s + \\ &f_2^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{l2}^s + \dots + f_m^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{lm}^s) - wid(f_1^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{l1}^s + \\ &+ f_2^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{l2}^s + \dots + f_m^s([\vec{V}]) \cdot \hat{\vec{g}}_{lm}^s) \cap [z_{i,j,h,k}] \end{aligned} \right\} \quad (1.32)$$

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.

Як бачимо, структурна ідентифікація ІДМ зводиться до багаторазового повторення розв'язування задачі параметричної ідентифікації. Тому актуальною проблемою є розробка методів структурної ідентифікації, які б зменшили кількість ітерацій методу знаходження адекватної структури математичної моделі, і, відповідно, зменшили б необхідну кількість повторень розв'язування задачі параметричної ідентифікації.

1.3.2. Методи структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів

У цьому параграфі будемо розглядати більш загальний вигляд розв'язування задачі структурної та параметричної ідентифікації моделей динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами.

Отже, як бачимо, критеріальна функція $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$ оптимізаційної задачі (1.29), (1.30) 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 $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$.

Також кількість обчислень значень цієї функції в оптимізаційній процедурі (1.29), (1.30) визначає її часову обчислювальну складність. Зважаючи на ці факти, у багаточисленних працях запропоновано використати методи випадкового пошуку розв'язку цієї оптимізаційної задачі на основі ПМБК [34, 36, 37, 39, 41, 43, 48-52, 111, 153, 155, 157, 161, 162]. Спочатку розглянемо детально цю обчислювальну схему, а потім проаналізуємо її проблемні місця. Отже, процес розв'язування оптимізаційної задачі (1.29), (1.30) 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 ; $[I_{\min}; I_{\max}]$; $mcn = 0$ – поточний ітераційний номер; MCN – визначена кількість ітерацій та відповідна визначена множина структурних елементів F , а також на основі рівномірного закону розподілу ймовірностей формуємо початкову множину Λ_0 (з потужністю S) структур λ_s із множини елементів F .

Фаза робочих бджіл.

Множину структурних елементів $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ пронумеруємо за допомогою десяткових чисел для забезпечення зручності оперування і подамо у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Кодування структурних елементів

№	Структурний елемент
1	$f_1([\vec{V}])$
...	...
m	$f_m([\vec{V}])$

В такому разі, кожен структурний елемент із множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ кодується десятковим кодом, який наведено в таблиці 1.3. Тоді, кожен структуру λ_s при організації обчислень та формуванні структур замінюємо набором десяткових чисел $\{N_1, N_2, \dots, N_{ms}\}$.

В основі алгоритмів маніпуляції структурами ІДМ на підставі ПМБК є ряд операторів. Ці оператори реалізують чітко окреслені процедури ПМБК, але над структурами ІДМ, на відміну від класичних АБК.

Фаза робочих бджіл в ПМБК, в методі структурної ідентифікації ІДМ, означає перетворення поточних структур в нові. При цьому оператор $O_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$, здійснює перетворення структури ІДМ у вигляді (1.27), 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 $O_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$ на основі кожної з структур λ_s ІДМ будує одну «нову» структуру λ'_s , що близька до

поточної в сенсі співпадіння більшості їх структурних елементів.

Отже, оператор $O_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$ здійснює перетворення кожного елемента множини Λ_{mcs} поточних структур λ_s , на mcs ітерації у сформовану множини Λ'_{mcs} обраних структур λ'_s . Нові структури λ'_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, також обраних випадково у поточній структурі λ_s . При цьому, у кожному випадку використовуємо рівномірний закон розподілу ймовірності вибору елементів. З метою визначення кількості елементів у поточній структурі в ряді праць [48-52, 161, 162] запропоновано увести змінну n_s , значення якої задає кількість елементів поточної структури λ_s ІДМ, 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».

Отже, чим більше значення критеріальної функції $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$ при фіксованій структурі ІДМ, тим більше елементів цієї структури необхідно замінити. Іншу умову, яку необхідно урахувати при обчисленні значення змінної n_s , це можлива загальна кількість елементів у поточній структурі, яка переважно є різною, але знаходиться в межах інтервалу $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$. Спираючись на ці припущення та обмеження, отримаємо один із можливих виразів

для обчислення значення n_s :

$$n_s = \begin{cases} \text{int} \left(\left(1 - \frac{\min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s=1..S \}}{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)} \right) \cdot m_s \right), \\ \text{if } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \neq \min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s=1..S \} \text{ and } n_s \neq 0; \\ 1, \text{ if } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) = \min \{ \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) | s=1..S \} \text{ or } n_s = 0. \end{cases} \quad (1.33)$$

де m_s – загальна кількість елементів у поточній структурі.

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

$$D_1(\lambda_s, \lambda'_s) : \lambda_s^1 = \begin{cases} \lambda_s, \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \leq \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \\ \lambda'_s, \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \end{cases} \quad (1.34)$$

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.

В 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 λ_s^1 означає внесення незначних змін в набір структурних елементів кожної із поточних структур. Для виконання цієї процедури спочатку необхідно для кожної структури λ_s^1 з Λ_{mcp}^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 λ_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 визначені 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

(1.29), (1.30) $P_s(\lambda_s)$:

$$P_s(\lambda_s) = \frac{1}{1 + \delta(\lambda_s)} \quad P_s(\lambda_s^1) = \frac{1}{\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s) \cdot \sum_{s=1}^S \frac{1}{\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s)}}, s=1 \dots S-1. \quad (1.35)$$

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

$$R_s = \text{ToInt}(P_{s-1}(\lambda_{s-1}^1) \cdot S), \quad s=2 \dots S, \quad R_1 = 0. \quad (1.36)$$

Далі на цій фазі використовуємо оператор $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$, 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 (1.36) на основі ймовірності, обчисленої за виразом (1.35).

Отже, можемо стверджувати, що оператор $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ подібний до оператора $O(\Lambda_{mcn}, F)$ і означає перетворення кожної

структури λ_s^1 з $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1$ першого ряду формування, які згенеровані на m -ї ітерації методу, у множини структур Λ'_s (де $s=1, \dots, S$). Його подібність полягає в тому, що як і у випадку застосування оператора $O(\Lambda_{mcn}, F)$ на фазі робочих бджіл ПМБК, на цій фазі нові R_s структур λ'_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 λ_s^1 також обраних випадково. При цьому, у кожному випадку використовуємо рівномірний закон розподілу ймовірності вибору елементів, а кількість n_s елементів у поточній структурі які необхідно замінити визначаємо за формулою (1.33), враховуючи якість $\delta(\lambda_s^1, \hat{g}_l^s)$ кожної із поточних структур.

На завершальному етапі цієї фази проводимо групову (на відміну від випадку фази робочих бджіл, де проводили попарну селекцію) селекцію «кращої» структури із поточної λ_s^1 та сформованої в її околі множини $\Lambda'_s = \{\lambda_1, \dots, \lambda_r, \dots, \lambda_{R_s}\}$. При цьому спираємося на обчислені значення критеріальної функції задачі (1.29), (1.30). З цією метою використовуємо оператор групової селекції $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$, який здійснює процес синтезу множини «кращих» структур інтервальної моделі Λ_{mcn}^2 із визначених множин Λ_{mcn}^1 та Λ''_{mcn} за допомогою селекції структур λ_s^2 на основі показників якості, де $\Lambda''_{mcn} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$, $s = 1 \dots S$. Цей оператор, виконує процедури порівняння якості структур за

аналогією оператора $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ (1.34), 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 Λ_{mcs}^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 (1.29), (1.30) 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 усі елементи структури обираються випадково із множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$, точно так як і на фазі ініціалізації.

Саме для цього для кожної поточної структури λ_s на фазі ініціалізації і на наступних фазах формування нових структур вводимо лічильник $Limit_s$, зміна значення якого в ПМБК моделює процес зменшення кількості нектару згідно із процедурою знаходження вичерпаних джерел нектару.

Таким чином, для розв'язування виходу із локальних мінімумів критеріальної функції оптимізаційної задачі (1.29), (1.30), значення лічильника $Limit_s$ збільшуємо на «1» кожен раз, якщо для попарної чи погрупової селекції визначена структура не

«оновилася», та обнуляємо – для інших випадків. Як вже зазначалося, збільшення значення лічильника $Limit_s$ моделює процес вичерпування джерела нектару.

При цьому константа $LIMIT$, значення якої встановлюємо як один із ініціалізованих параметрів методу перед його використанням, слугує для побудови критерію вичерпаності джерела нектару в ПМБК, тобто в контексті розв'язування задачі (1.29), (1.30) це означає відмову від подальшої модифікації цієї структури. Отже, кожна структура λ_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 λ_s^2 випадковим чином з множини F всіх елементів структури, де їх кількість визначається також випадково, вибором відповідного числа з інтервалу $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$. Варто зазначити, що у всіх випадках використовуємо рівномірний закон розподілу при виборі нових елементів. У «класичній» реалізації цього методу кількість згенерованих структур на цій фазі є кілька відсотків від конкретного значення S усіх поточних структур (усіх робочих бджіл).

Перейдемо тепер до аналізу проблемних місць в реалізації вище розглянутого методу.

Як бачимо із вище наведеного опису, на фазі ініціалізації формуємо множину структурних елементів F , а на інших фазах здійснюємо вибір цих елементів для формування структур ІДМ.

При цьому, на кожній фазі структури ІДМ формуємо випадково, або заміну структурних елементів здійснюємо також випадково, виходячи з умов задачі. За основу випадкового вибору елементів структури з множини F покладено рівномірний закон розподілу. Це означає, що будь-який елемент структури рівноймовірно може бути обраний для формування структури як на початкових фазах так і на наступних фазах. Ці процедури є ключовими з точки зору часової складності реалізації методу, оскільки якість сформованих структур безпосередньо залежить від «успішності» обрання того чи іншого елемента із множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$. З іншого боку, набір структурних елементів різницевої схеми визначається властивостями модельованого об'єкта і множина $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ структурних елементів, з яких синтезується ця різницева схема, повинна вміщувати характерні елементи, які будуть включені до кінцевої моделі об'єкта.

Спираючись на ці факти, можемо висловити гіпотезу: «про необхідність встановлення пріоритетності обрання структурних елементів із множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ для формування оптимальної, в сенсі задачі (1.29), (1.30), структури ІДМ (1.27), що у підсумку забезпечить зниження обчислювальної складності методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів. Скоріше всього, що ця пріоритетність буде залежати від історії «успішності» вибору того

чи іншого елемента множини структурних елементів на попередніх ітераціях.

Таким чином, вище викладені міркування, на відміну від відомого методу, вимагають адаптивного налаштування процедур вибору структурних елементів із множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ при формуванні нових структур.

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 [161].

Варто зазначити, що «успішність» вибору елементів структури апіорі має ймовірнісну природу. Отже для опису цих процедур вибору у відомому методі використаємо ймовірнісний підхід.

Нехай, маємо повну множину структурних елементів $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ для реалізації вищеописаного методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів на основі ПМБК. Повнота сформованої множини означає, що їй належать елементи, які будуть складати оптимальну, в сенсі задачі (1.29), (1.30), структуру ІДМ.

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 $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$. Як було зазначено вище,

ймовірність вибору будь-якого елемента без наявної історії вибору є однаковою для усіх елементів, тобто:

$$P_1 = P_2 = \dots = P_i = \dots = P_m = \frac{1}{m} \quad (1.37)$$

Як можемо бачити з вищеописаного методу структурної ідентифікації, історія успішності вибору структурних елементів відслідковується на двох фазах ПМБК. Спочатку на фазі робочих бджіл, коли оператором $O(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснюємо перетворення структури ІДМ у вигляді (1.27), відповідно до процедур ПМБК. А саме процедури «дослідження та аналізу околу знайденого джерела нектару бджолами» у спосіб заміни випадковим чином певної кількості елементів поточної структури, такою ж кількістю елементів із множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$.

Також історія успішності вибору фіксується на фазі бджіл дослідників. У цьому випадку, оператором $O_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ перетворюємо структури відповідно до процедури ПМБК «дослідження та аналізу околу знайденого джерела нектару бджолами-дослідниками», аналогічно до процесів на фазі робочих бджіл у спосіб заміни певної кількості структурних елементів. Тільки на відміну від фази робочих бджіл ПМБК, на якій формувалася одна структура в околі поточної, у випадку цієї фази, кількість структур навколо поточної визначається виразами (1.35), (1.36). В обох випадках кількість елементів n_s для заміни у кожній

структурі ІДМ визначається формулою (1.33).

Якщо заміна відповідних елементів виявилася успішною, тобто, коли значення критеріальної функції $\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)$ оптимізаційної задачі (1.29), (1.30), зменшується, то кожному із цих обраних із $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$ n_s -елементів $f_i([\vec{V}])$ підвищуємо ймовірність вибору в майбутньому, на підставі частотного методу обчислення ймовірності, а саме:

$$P_i = \begin{cases} P_i + \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)}\right), \text{ якщо: } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \wedge (P_i < \frac{1}{m_s}) \\ P_i, \text{ якщо } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) \leq \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \vee (P_i \geq \frac{1}{m_s}) \end{cases}, \quad (1.38)$$

де λ_s, λ'_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

$$P_i = P_i + \frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi\left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)}\right), \text{ якщо: } \delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s) > \delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s) \wedge (P_i < \frac{1}{m_s}), \quad (1.39)$$

Тобто у випадку успішності вибору n_s елементів з множини $F = \{f_1([\vec{V}]), f_2([\vec{V}]), \dots, f_m([\vec{V}])\}$, проводимо перерахунок ймовірності вибору для усіх інших структурних елементів, які не використовувалися для новозгенерованої структури λ'_s . З цією метою використовуємо таку формулу:

$$P_j = P_j - \left(\frac{\sum_{i=1}^{n_s} \left(\frac{1}{m \cdot n_s} \cdot \Pi \left(\frac{\delta(\lambda_s, \hat{g}_l^s)}{\delta(\lambda'_s, \hat{g}_l^s)} \right) \right)}{m - n_s} \right), \quad j \neq i \quad (1.40)$$

У підрозділі 1.3.1. представлено чотирьох етапну процедуру вирішення задачі параметричної ідентифікації. Проте на сьогоднішній день найбільш ефективними методами вирішення цієї оптимізаційної задачі є методи, засновані також на поведінковій моделі бджолої колонії [4,27,39,47, 54,117,156,157].

Розглянемо основні фази в методі параметричної ідентифікації.

Фаза ініціалізації. Вектори, що визначають можливі точки мінімуму цільової функції (1.22), є векторами оцінок параметрів і позначаються \hat{g}_l . У контексті моделі поведінки бджолої колонії це означає, що кожному вектору координат джерела нектару відповідає одна l бджола, яка його досліджує. Встановимо, що чисельність усієї сукупності дорівнює значенню S , і визначимо межі оцінок параметра

$$\hat{g}_{jl} \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}], j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, S. \quad (1.41)$$

На цьому етапі використовується наступна формула:

$$\hat{g}_{jl} = g_{jl}^{low} + rand(0,1) \cdot (g_{jl}^{up} - g_{jl}^{low}), j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, S, \quad (1.42)$$

де g_{jl}^{low} , g_{jl}^{up} – нижня та верхня межі значень параметрів на етапі ініціалізації.

Варто звернути увагу на те, що на цьому етапі також налаштовуються всі параметри алгоритму.

Фаза робочих бджіл. У контексті задачі оптимізації фаза робочих бджіл означає пошук нових оцінок рішень з меншими значеннями цільової функції (1.41). Для обчислення можливих точок локального мінімуму цільової функції використовують такі формули:

$$\hat{g}_{jl}^{mcn} = \hat{g}_{jl} + \Phi_{jl} \cdot (\hat{g}_{jl} - \hat{g}_{jp}), j = 1, \dots, m, p \neq l = 1, \dots, S. \quad (1.43)$$

Після обчислення координат можливих точок мінімуму \vec{g}_l^{mcn} проводиться попарне порівняння існуючих і поточних значень оцінок параметрів за цільовою функцією (1.41):

$$\hat{g}_l = \left\{ \hat{g}_l, \text{ if } \delta(\hat{g}_l) \leq \delta(\vec{g}_l^{mcn}) \right\} \text{ або } \hat{g}_l = \left\{ \vec{g}_l^{mcn}, \text{ if } \delta(\hat{g}_l) > \delta(\vec{g}_l^{mcn}) \right\} \quad (1.44)$$

Фаза бджіл дослідників. У контексті оптимізаційної задачі на цьому етапі визначено найбільш ймовірні точки (вектори значень параметрів), навколо яких необхідно провести детальне дослідження цільової функції. Саме ці точки претендують на забезпечення локальних мінімумів цільової функції. Для цих цілей використовується ймовірнісний підхід, а саме розраховуються ймовірності доцільності дослідження, кожна конкретна точка задається вектором значень параметрів із раніше знайдених. Вираз для обчислення зазначеної ймовірності має такий вигляд [156, 157]:

$$P_l = \frac{1 - \delta(\hat{g}_l)}{\sum_{l=1}^s (1 - \delta(\hat{g}_l))}. \quad (1.45)$$

Слід зазначити, що у разі значного відхилення значень цільової функції $\delta(\hat{g}_l)$, розрахованих для різних точок (векторів значень параметрів), необхідно переписати формулу (1.45) з урахуванням нормування значень функції. У цьому випадку формула набуває такого вигляду:

$$P_l = \frac{1}{\delta(\hat{g}_l) \sum_{l=1}^s 1/\delta(\hat{g}_l)}. \quad (1.46)$$

На основі розрахованих ймовірностей визначаємо кількісний показник m_l , який своєю чергою визначає кількість точок в околі досліджуваної точки для знаходження мінімуму цільової функції:

$$m_l = \text{ToInt}(P_l \cdot S), \quad l = 1, \dots, S, \quad m_{l=1} = 0. \quad (1.47)$$

де $\text{ToInt}(\cdot)$ – оператор виділення цілої частини з числа.

На наступному кроці процедуру повторюють для визначення точок, де досягається найменше значення цільової функції. Щоб уникнути фокусування на локальних мінімумах цільової функції, використовується фаза бджіл-розвідників.

Фаза бджіл-розвідників. Це фаза, на якій випадковим чином знову обчислюють нові рішення задачі оптимізації. Для цього використовується формула (1.43). Як зазначалося вище, в контексті моделі поведінки бджолоїної колонії це показує закінчення поточних джерел нектару.

Для кожної ітерації обчислень необхідне отримання нової кількості балів на додаток до поточних. Наприкінці кожної ітерації на ньому є $2S$ бали – претенденти на дослідження. Тому в кінці ітерації виконується груповий відбір точок з найменшим значенням цільової функції $\delta(\hat{g}_l)$, щоб їх кількість дорівнювала S . Дана процедура характеризується груповим відбором. Процедура завершується за умови $\delta(\hat{g}_l) = 0$.

1.3.3. Алгоритм реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів

Описані в розділі кроки алгоритму реалізації відображають обчислювальні процеси задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів. Перейдемо до детального розгляду обчислювальних процесів.

Алгоритм бджолоїної колонії складається з чотирьох фаз, які імітують поведінку колонії медоносних бджіл. Перший етап – це фаза ініціалізації. Іншими словами це перший крок для початку роботи з конкретними структурами моделей. Для реалізації цього кроку необхідно сформувати початкову множину структурних елементів Λ_0 (з потужністю S) для всіх структур λ_s із набору елементів F . Тому для початку роботи алгоритму необхідно задати основні параметри методу: $LIMIT, [I_{\min}, I_{\max}], F, S$. Реалізуємо це наступним чином:

- 1) спочатку генеруємо випадкове число I на проміжку $[I_{\min}, I_{\max}]$, яке буде означати кількість елементів в поточній структурі S_i ;
- 2) встановлюємо ймовірність вибору елемента;
- 3) генеруємо випадкове число в діапазоні від 1 до m , де m – кількість доступних елементів в множині F з використанням ймовірностей вибору;

4) вибираємо випадкове число з врахуванням ймовірностей та додаємо відповідний елемент, який представлений числом m до структури.

Таким чином генеруємо поточну структуру S_i з кількістю елементів I . Здійснюючи дану процедуру необхідно врахувати момент коли число m вже було згенероване, то повертаємось на етап генерації повторно, оскільки цей структурний елемент вже вибраний. В такий спосіб генеруємо інші структури S , з яких складається множина Λ_0 .

Реалізація наступної частини алгоритму описує фазу робочих бджіл, а це:

1) обчислення якості набору структур та ранжування цього набору відповідно до показника якості.

2) формування подібних структур, тобто на основі кожної з структур λ_s множини Λ_0 формується по одній «новій» структурі λ'_s подібним чином, як це проводилось на фазі ініціалізації.

3) обрахунок n_s - кількості елементів, які будуть замінені в поточній структурі λ_s .

4) визначення ймовірності заміненого елемента в поточній структурі λ'_s .

5) проведення попарної селекції на основі формули 1.34, після чого перерахування ймовірності для вибраних n_s елементів за

формулою 1.39 та для $m - n_s$ елементів за формулою 1.40. Таким чином отримуємо набір структур Λ_{mcp}^1 .

Реалізація слідуючої частини алгоритму описує фазу бджіл дослідників, яка містить наступні кроки:

1) розрахунок ймовірності зміни структури навколо поточної;
2) визначення R_s кількості структур, яку потрібно згенерувати для поточної за формулою 1.36.

3) формування R_s структур навколо поточної із заміною елементів аналогічно до процедури, яка використовувалася на попередній фазі.

4) проведення попарної селекції на основі оператора $D_2(\lambda_s^1, \lambda_s')$.

5) здійснення перерахунку ймовірності для обраних n_s елементів за формулою 1.39 та для $m - n_s$ елементів за формулою 1.40. Таким чином отримуємо набір структур Λ_{mcp}^2 .

Реалізація завершальної частини алгоритму описує фазу бджіл дослідників.

На даній стадії реалізації методу структурної ідентифікації ІДМ здійснюється перевірка «вичерпаності» поточних структур. Усі структури $\lambda_s^2 \in \Lambda_{mcp}^2$, для яких виконується умова перезавантаження лічильника «вичерпаності структур» $Limit_s \geq LIMIT$, вважаються не перспективними.

Якщо зазначена вище умова виконується, то поточну структуру замінюємо «новою», яку формуємо чисельною реалізацією оператора $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$. Коли для поточних структур знайдено хоч одну, для якої $\delta(\lambda_s^2) = 0$, то завершуємо процедуру структурної ідентифікації інтервальної дискретної моделі, в протилежному випадку – повертаємося до фази робочих бджіл.

Необхідно відзначити, що у порівнянні із відомими методами на основі поведінкових моделей бджолиної колонії, налаштування вибору структурних елементів у спосіб встановлення для кожного елемента множини структурних елементів ймовірності вибору будь-якого елемента і на основі зміни цього розподілу на різних фазах ПМБК дозволяє зменшити кількість оцінюваних значень функції мети.

Таке налаштування вибору структурних елементів дозволить зменшити кількість процедур оцінки розв'язків інтервальної системи нелінійних алгебраїчних рівнянь. Реалізація даного методу дозволяє знизити обчислювальну складність при побудові зазначених моделей складних об'єктів.

Разом з тим, проблема використання цих методів ідентифікації є відсутність навіть спроб урахування знань та досвіду дослідників, які використовували ці методи для розв'язування задач математичного моделювання на основі аналізу інтервальних даних. Тому упровадження знання-орієнтованого підходу з відповідним декларативним онтологічним описом предметної області

моделювання дозволяє розробляти відповідні програмні середовища та інструментальні засоби для зниження складності методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів. У задачі структурної ідентифікації, основною процедурою для її розв'язання є формування множини потенційних структурних елементів інтервального рівняння, яка являє собою математичну модель об'єкта. Цю задачу можна вирішити за допомогою онтологічного опису предметної області моделювання, тобто операційної онтології. Таким чином, рішення цих проблем дозволить зменшити складність процедури моделювання та отримати адекватні моделі з гарантованими прогностичними властивостями.

Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз систем прийняття рішень, які використовують для підвищення ефективності функціонування складних об'єктів. Зокрема, виділено клас систем прийняття рішень, які орієнтовані на дані, моделі та знання.

В результаті проведеного аналізу встановлено, що СПР, які найбільше підходять для підтримки прийняття рішень в різних предметних областях, зокрема медицині та екології, а особливо враховуючи умови невизначеності процесів в даних предметних областях – СПР, що керуються даними, моделями та знаннями. Невід'ємною компонентою зазначених типів СПР є математичні моделі, а виходячи із специфіки досліджуваних в роботі предметних областей, саме застосування математичного моделювання

дозволить отримувати необхідні управлінські рішення, виходячи із складності об'єкта.

2. Здійснено аналіз підходів до математичного моделювання складних об'єктів, зокрема дедуктивного та індуктивного. Встановлено, що для досліджуваних складних об'єктів, переважно експериментальні дані формуються з вимірювальних пристроїв, що мають визначені похибки вимірювань. Для врахування невизначеності в експериментальних даних необхідно використовувати методи, які ґрунтуються на інтервальному аналізі даних.

3. Наведено постановки задач структурної та параметричної ідентифікації моделей статичних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами. Показано, що при розв'язуванні задач структурної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів використовують методи, які ґрунтуються на самоорганізації мультиагентних систем, де одним з найчастіше використовуваних методів є метод на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії. Наведено алгоритм реалізації цього методу.

Основною проблемою використання цих методів є відсутність знання-орієнтованого підходу з відповідним декларативним онтологічним описом, що не дозволяє розробляти програмні середовища як інструментальні засоби. Встановлено, що задачі структурної ідентифікації, основною задачею для її розв'язання є формування множини потенційних структурних елементів моделі різницевого (дискретного) рівняння, яка являє собою математичну

модель об'єкта. Цю задачу можна вирішити за допомогою онтологічного опису предметної області моделювання, тобто операційної онтології. Таким чином, рішення цих проблем дозволить зменшити складність процедури моделювання та отримати адекватні моделі з гарантованими прогностичними властивостями.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ НЕЛІНІЙНИХ МОДЕЛЕЙ СТАТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

2.1. Постановка задачі ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів.

Як вже зазначалось у попередньому розділі, статичні об'єкти, описують функціональними залежностями між вхідними значеннями факторів впливу на систему та вихідними значеннями характеристик у вигляді аналітичного виразу (1.7), суть задачі структурної ідентифікації полягає у розв'язуванні оптимізаційної задачі (1.12)-(1.13). Переформулюємо цю задачу у такому вигляді:

$$\delta(\vec{\beta}^k(X)) \xrightarrow{\vec{\beta}^k(X), \alpha_i} \min \quad (2.1)$$

$$\lambda_k \in \lambda_s, \quad (2.2)$$

$$\alpha_i \in [0, 1], \quad i = 1, \dots, N. \quad (2.3)$$

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

У виразі (2.1), цільова функція $\delta(\vec{\beta}^k(\vec{X}))$ формується на основі врахування обмежень, які задає інтервальна система нелінійних алгебраїчних рівнянь (1.11).

Цільова функція є критерієм мінімізації квадратичної похибки, точкової моделі вигляду:

$$\begin{aligned} \hat{y}_i(\lambda_k, \vec{X}_i) = & f_{m_k+1}^k \left(\vec{\beta}_1^k(\vec{X}_i) \right) \cdot f_1^k(\vec{X}_i) + f_{m_k+2}^k \left(\vec{\beta}_2^k(\vec{X}_i) \right) \cdot f_2^k(\vec{X}_i) + \\ & \dots + f_{2m_k}^k \left(\vec{\beta}_{m_k}^k(\vec{X}_i) \right) \cdot f_{m_k}^k(\vec{X}_i), \end{aligned} \quad (2.4)$$

$i = 1, \dots, N$

та має такий вигляд

$$\delta(\vec{\beta}^k(X)) = \sum_{i=1}^N \left(\hat{y}_i(\lambda_k, \vec{X}_i) - P\left([y_i^-; y_i^+], \alpha_i\right) \right)^2, \quad (2.5)$$

де

$$\begin{aligned} P\left([y_i^-; y_i^+], \alpha_i\right) = & \alpha_i \cdot y_i^- + (2.1 - \alpha_i) \cdot y_i^+, \\ & i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (2.6)$$

Варто відзначити, що функція (2.5) є гладкою, якій як додаткові параметри передаються дискретні значення, що визначають структуру моделі та коефіцієнти α_i . У цьому є принципова відмінність від випадків, розглянутих у першому розділі. Відповідно, для розв'язку оптимізаційної задачі (2.1), застосовують градієнтні методи. Однак, у випадках, коли нелінійність параметрів ускладнює цільову функцію або ж робить її дискретною, застосовують інші методи оптимізації: методи стохастичної оптимізації, еволюційні та метаевристичні алгоритми.

У цих випадках необхідно задавати обмеження на параметри

$$\vec{\beta}^k \in \left[\vec{\beta}^{lower}; \vec{\beta}^{upper} \right].$$

В той же час, задача структурної ідентифікації полягає у необхідності визначення як структури моделі $\lambda_k \in \lambda_s$, тобто множини структурних елементів, так і параметрів моделі $\vec{\beta}^k(\vec{X})$ на її основі. Для проведення структурної ідентифікації множини λ_k приводять до векторного вигляду $\vec{\lambda}_k$, шляхом бінарного або десяткового кодування та хешування структурних елементів, де

$$\vec{\lambda}_k = \left(I_1^{\lambda_s(2.l_1)}, I_2^{\lambda_s(2.l_2)}, \dots, I_{m_k}^{\lambda_s(2.l_{m_k})} \right)$$

Запишемо задачу структурної ідентифікації на основі задачі (2.1) у такому вигляді:

$$\delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X)) \xrightarrow{\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X), \alpha_i} \min \quad (2.7)$$

$$\hat{\lambda}_k \in \lambda_s, \quad (2.8)$$

$$\alpha_i \in [0, 1], \quad i = 1, \dots, N \quad (2.9)$$

В якості критерію зупинки оптимізації використаємо умову (1.10) для випадку точкової моделі:

$$\hat{y}_i(\lambda_k, \vec{X}) \in [y_i^-; y_i^+]. \quad (2.10)$$

Істинність такого твердження гарантує адекватність та задану точність побудованої моделі.

Складність даної задачі полягає в тому, що дана функція дискретною, оскільки оптимізації відбувається на основі дискретних значень вектора $\vec{\lambda}_k$ – дискретні значення елементів множини λ_k якого отримуються на основі певної системи кодування. Тому її розв'язок будують на основі багаторазового розв'язку задачі параметричної ідентифікації (2.1) з напрямленим перебором множин λ_k на основі елементів множини λ_s .

2.2. Властивості функції мети в задачі ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів

Для дослідження властивостей функції мети в задачі ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів проведемо чисельний експеримент ідентифікації моделей на основі відомих тестових функцій [31], які задаватимуть вхідні дані, структуру моделі та мають нелінійний характер.

Щоб розглянути різні випадки складності оптимізаційної задачі (2.1-2.3) та конвергенції до мінімуму функції мети (2.1) було використано тестові функції, зокрема:

унімодальні:

F_1 – Sphere function,

F_2 – Schwefel's function,

F_3 – Rosenbroc function,

мультимодальні:

F_4 – Rastrigin's function,

F_5 – Ackley's function,

F_6 та F_7 – мультимодальні з фіксованою розмірністю вхідних даних (див. табл. 2.1).

Умови проведення ідентифікації параметрів на основі оптимізаційної задачі (2.1-2.3) та тестових даних на основі функцій наведено у таблиці 2.2.

Для обчислювального експерименту було використано Global Optimization Toolbox ППП MATLAB [59]. Зокрема, програмний засіб GlobalSearch, що уможливорює знаходження глобального мінімуму гладких функцій за поліноміальний час. GlobalSearch використовує алгоритм внутрішньої точки для пошуку локального розв'язку на ділянках тяжіння до оптимуму (басейнах). Застосовується для оптимізації гладких функцій та має доведену квадратичну конвергенцію. Для цього використовуємо згенерований набір вихідних точок, що забезпечує дослідження всіх ділянок тяжіння до оптимуму заданої області пошуку та знаходження глобального оптимуму [32].

Застосування GlobalSearch наочно продемонструє модальність функції мети (2.1). Для ідентифікації параметрів моделей використовувалися інтервальні значення в заданому діапазоні (таблиця 2.2), які одержали на основі відносної похибки 5%.

Таблиця 2.1 – Тестові нелінійні функції

Функція	Діапазон значень \vec{x}
<i>Унімодальні функції</i>	
$F_1(x) = \sum_{i=1}^n x^2$	[-100, 100]
$F_2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	[-100, 100]
$F_3(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$	[-30, 30]
<i>Мультимодальні функції</i>	
$F_4(x) = -20e^{-0.2\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x^2}} - e^{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + 20 + e$	[-32,768, 32,768]
$F_5(x) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$	[-5, 5]
$F_6(x) = \left[a_i - \frac{x_1(b_i^2 + b_i x_2)}{b_i^2 + b_i x_3 + x_4} \right]^2$	[-5, 5]
$F_7(x) = 4x_1^2 - 2,1x_1^4 + \frac{1}{3}x_1^6 + x_1x_2 - 4x_2^2 + 4x_2^4$	[-5, 5]

Результати експериментів наведено в таблиці 2.3. Друга колонка таблиці відображає двовимірні графіки функцій, що задають дані для моделювання. Третя колонка демонструє значення функції мети $\delta(\vec{\beta}(\vec{X}), F, \alpha_i)$ в точках оптимумів, останнє значення відповідає глобальному мінімуму функції.

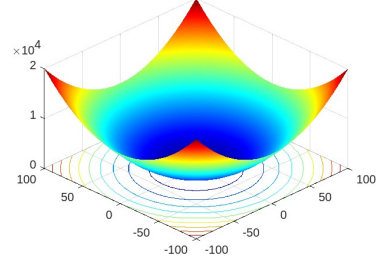
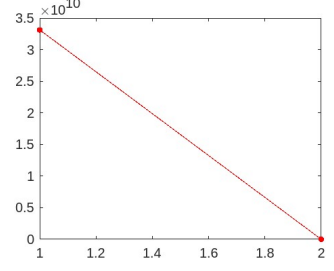
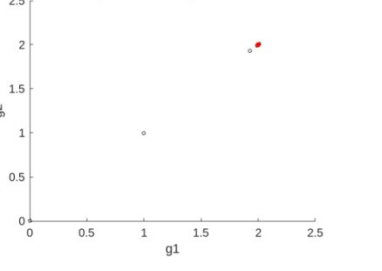
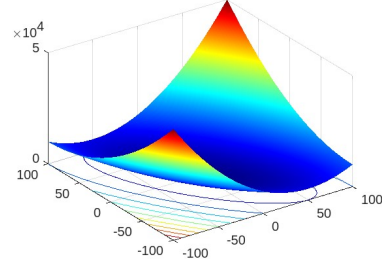
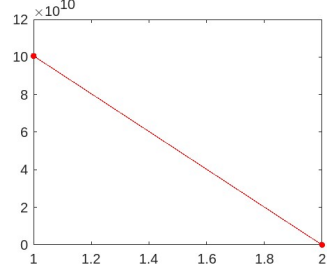
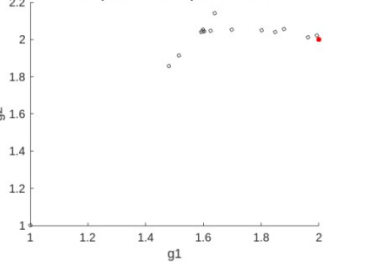
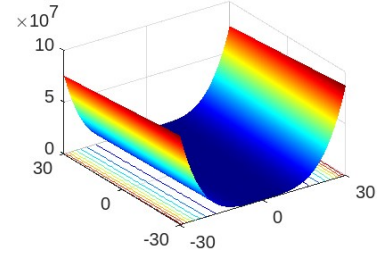
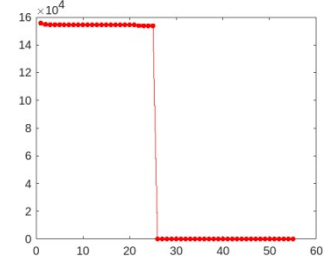
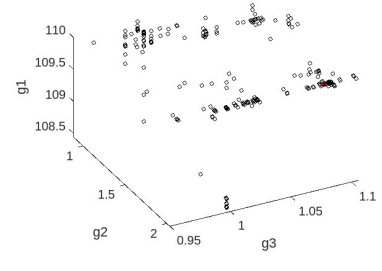
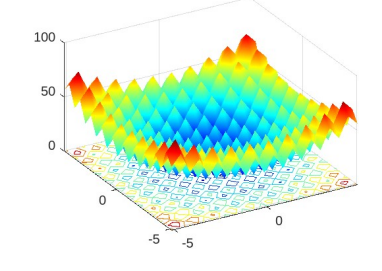
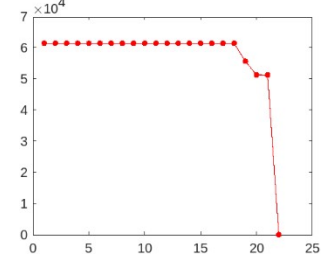
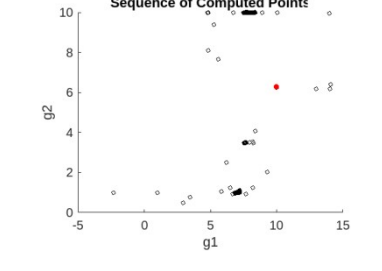
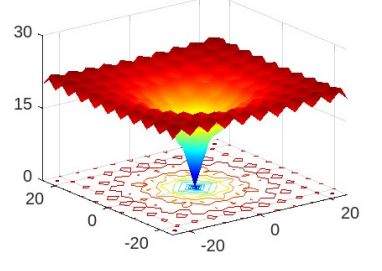
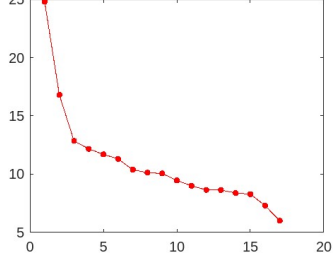
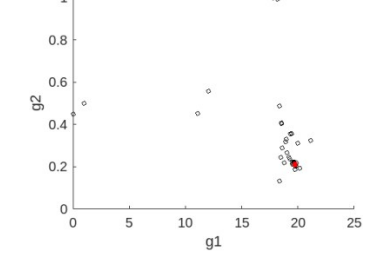
Таблиця 2.2 – Вихідні дані для дослідження

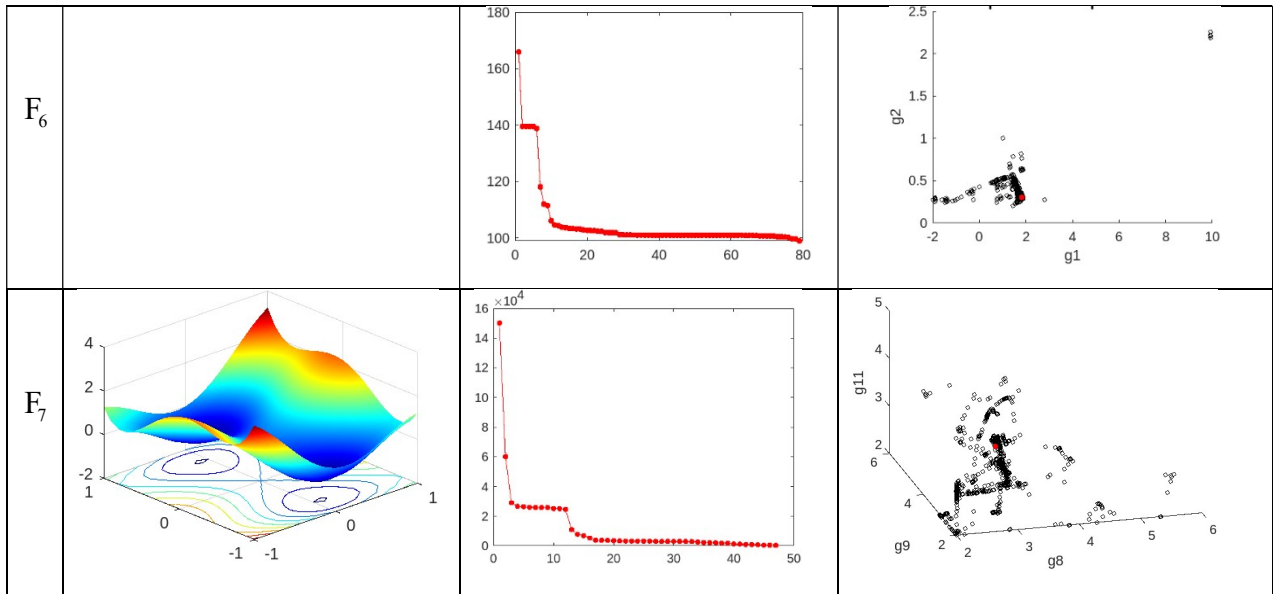
Розмірність \vec{x}, n	m	Структура моделі
2	2	$Y(\vec{X}) = x_1^{\beta_1} + x_2^{\beta_2}$
2	2	$Y(\vec{X}) = x_1^{\beta_1} + (x_1 + x_2)^{\beta_2}$
2	3	$Y(\vec{X}) = \beta_1 (x_{i+1} - x_i)^{\beta_2} + (x_i - 1)^{\beta_3}$
2	2	$Y(\vec{X}) = -\beta_1 e^{-\beta_2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}} - e^{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos(2\pi x_i)} + \beta_1 + e$
2	2	$Y(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n (x_i^2 - \beta_1 \cos(\beta_2 x_i) + \beta_1)$
4	2	$Y(\vec{X}) = \left[\beta_1 - \frac{x_1 (\beta_2^2 + \beta_2 x_2)}{\beta_2^2 + \beta_2 x_3 + x_4} \right]^2$
2	11	$Y(\vec{X}) = \beta_1 x_1^{\beta_2} + \beta_3 x_1^{\beta_4} + \beta_5 x_1^{\beta_6} + \beta_7 x_1 x_2 + \beta_8 x_2^{\beta_9} + \beta_{10} x_2^{\beta_{11}}$

Як бачимо, для унімодальних функцій кількість оптимумів невелика і метод демонструє високу конвергентність, за винятком для Rosenbroc function, яка утворює розлогу ділянку біля оптимуму, що ускладнює конвергенцію методу.

Остання колонка наводить історію пошуку оптимального розв'язку в 2D та 3D просторі параметрів.

Таблиця 2.3 – Результати числових експериментів
оптимізації параметрів

<i>Функція, що задає дані та нелінійну структуру</i>	<i>Значення функції мети в локальних та глобальному мінімумах</i>	<i>Послідовність обчислених точок, в просторі параметрів $\vec{\beta}$</i>
<p style="text-align: center;">F_1</p> 		
<p style="text-align: center;">F_2</p> 		
<p style="text-align: center;">F_3</p> 		
<p style="text-align: center;">F_4</p> 		<p style="text-align: center;">Sequence of Computed Points</p> 
<p style="text-align: center;">F_5</p> 		



На рисунках 2.1 та 2.2 наведено графіки функції мети (2.1) в 2D просторі параметрів для визначених коефіцієнтів $\vec{\alpha}$, $i = 1, \dots, N$, що забезпечують умову включення прогнозованих значень у експериментальний коридор. Рисунок 2.1 демонструє графік функції $\delta(\vec{\beta}(\vec{X}), F, \alpha_i)$ для моделі на основі двовимірної унімодальної функції F_1 (Sphere function): $Y(\vec{X}) = x_1^{\beta_1} + x_2^{\beta_2}$, для якої отримали значення цільової функції, що дорівнює нулю в точці $\vec{\beta}(2.0, 2.0)$.

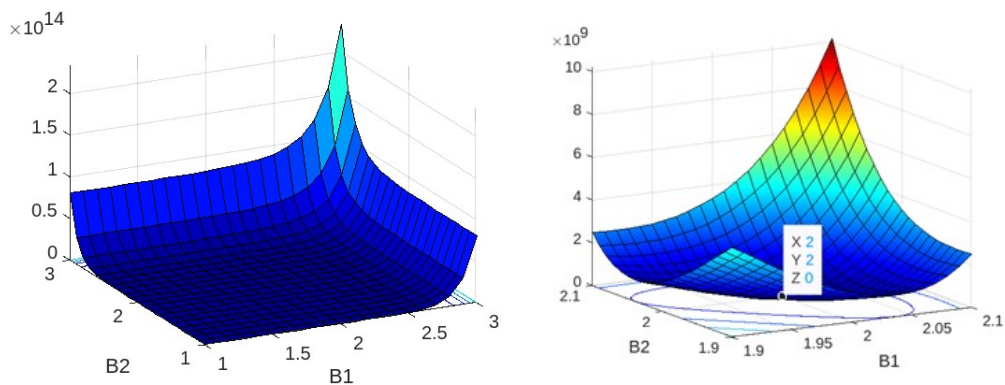


Рисунок 2.1 – Функція $\delta(\vec{\beta}(\vec{X}), F, \alpha_i)$ для моделі на основі Sphere function

На рисунку 2.2. наведено графік функції $\delta(\vec{\beta}(\vec{X}), F, \alpha_i)$ значення якої, одержали в ході оптимізації параметрів моделі на основі даних та структури мультимодальної функції Растрігіна (F_1). Графік демонструє наявність декількох ділянок з локальними мінімумами.

Отже, можна зробити висновок про мультимодальний характер функції мети (2.1) в загальному випадку.

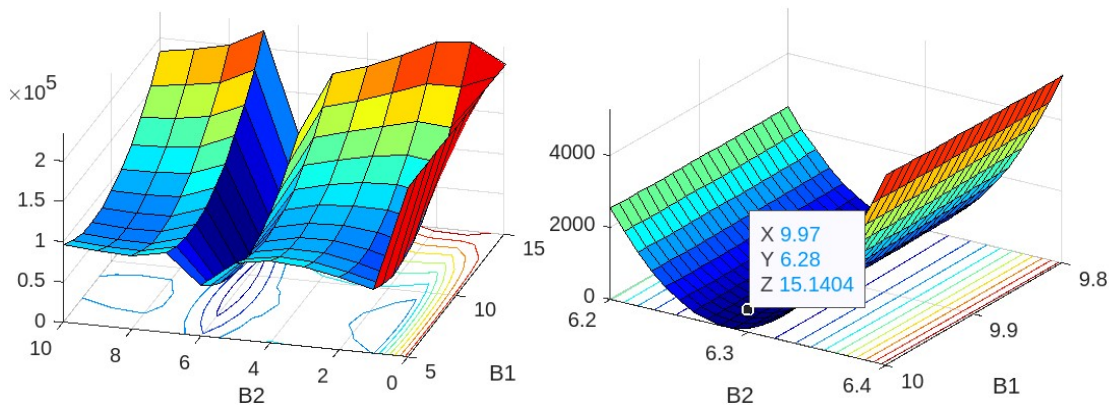


Рисунок 2.2 – Функція $\delta(\vec{\beta}(\vec{X}), F, \alpha_i)$ для моделі на основі Rastrigin's function

2.3. Ідентифікація параметрів інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів із застосуванням багатовимірної оптимізації

Тепер актуальним є питання вибору або розробки обчислювальних методів та засобів для ідентифікації інтервальних моделей статичних систем на основі багатовимірної оптимізації. При цьому критеріями якості таких методів є:

- здатність пошуку глобального мінімуму,
- низька обчислювальна складність,
- незалежність від вхідних даних моделювання.

На сьогоднішній день розроблено ряд методів параметричної ідентифікації інтервальних моделей як для динамічних об'єктів так і для статичних [27,45,47,153,157]. Треба відзначити, що обчислювальна задача параметричної ідентифікації інтервальних моделей є оптимізаційною NP-складною задачею.

Особливостями задачі параметричної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних систем є те що в процесі оптимізації доводиться здійснювати пошук глобального мінімуму функції мети і при цьому здійснювати обхід чи вихід з багаточисленних локальних мінімумів. Тому для їх розв'язування переважно застосовують метаевристичні методи стохастичного пошуку [21,75,84,113]. Зокрема, на сьогоднішній день найбільш ефективними з обчислювальної точки зору є методи, які побудовано на основі ройового інтелекту [1,68,134], які розглянуто в першому розділі. Для їх реалізації роблено ряд спеціалізованих програмних засобів, наведених, наприклад у працях [27,47,54]. Разом з тим, дослідниками таких оптимізаційних задач широко використовуються відомі програмні рішення, наведені в ряді стандартних пакетів прикладних програм, зокрема у Global Optimization Toolbox ППП MATLAB.

У цьому підрозділі наведемо результати проведених нами досліджень, щодо вибору обчислювальних методів для

параметричної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем на основі багатовимірної оптимізації.

Порівняльні характеристики засобів Global Optimization Toolbox ППП MATLAB на прикладі пошуку глобального мінімуму функції Растрігіна для двовимірного випадку наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати компаративного аналізу засобів
Global Optimization Toolbox

	<i>Розв'язок</i>		<i>Значення функції мети</i>	<i>Кількість обчислень функції мети</i>
	X_1	X_2		
patternsearch	19.899	-9.9496	4.9748	174
ga	-0.0042178	-0.0024347	4.7054e-05	9453
particleswarm	-5.2496e-06	2.6546e-05	1.4527e-09	1720
simulannealbnd	0.002453	0.0018028	1.8386e-05	1986
surrogateopt	0.0031	-0.0038	4.7922e-05	300
GlobalSearch	0.1096e-07	0.1096e-07	0	2182

Методи на основі Global Optimization Toolbox, крім засобів класичної оптимізації на основі похідних містять метаевристичні алгоритми, такі як генетичні, ройові, випадкового пошук та ін. Генетичні алгоритми (*ga*) використовують набір вихідних точок (популяцію) і ітеративно селекціонують кращі розв'язки. Популяція може мігрувати на ділянках тяжіння до оптимуму, відповідно, *ga* може згенерувати розв'язок на основі кращого з них.

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

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

Методом *patternsearch* досліджується ряд сусідніх точок, перш ніж прийняти одну з них. За умови належності сусідніх точок різним ділянкам, по суті, відбувається пошук в кількох «басейнах» одночасно.

Оптимізація *surrogateopt* базується на квазівипадковій вибірці розв'язків в заданих межах на основі радіально базисних функцій. Цей метод використовує функцію ефективності, яка оцінює узгодженість між даними та моделлю при заданих параметрах. Після того, як поточний розв'язок не може бути покращеним відбувається оновлення вибірки для ширшого охоплення в заданій межах. Це – ще один спосіб пошуку глобального рішення *surrogateopt*.

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

З обчислювальної точки зору, загальноприйнятим в оптимізації критерієм є кількість обчислень функції мети, також можна відмітити *particleswarm* – 1720 обчислень. Заслужовує уваги

та подальших досліджень оптимізація на основі методу `surrogateopt`, який конкурує з іншими методами, але при цьому вирізняється такими характеристиками: 300 обчислень функції мети забезпечили конкурентний результат $4.7922e-05$ проти $1.4527e-09$ – для методу `particleswarm`.

Стосовно третього критерії – незалежності від вхідних даних моделювання, то слід відмітити, що `GlobalSearch` правомірно застосовувати для гладких критеріальних функцій, для яких існують похідні в точках простору пошуку.

Багатовимірний простір пошуку параметрів моделей складних об'єктів зазвичай невідомий і з великою кількістю локальних оптимумів, тому метаевристики на основі ройового інтелекту є хорошим варіантом для ідентифікації параметрів інтервальних моделей.

Розглянемо підхід до ідентифікації параметрів інтервальних нелінійних моделей на прикладі побудови моделі розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу для виявлення зворотного гортанного нерва при проведенні операцій на щитовидній залозі, яка описана в праці [152].

Експериментальні вимірювання на стерильній сітці операційної рани здійснювалися на основі двох координат:

$$X_i = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}, \quad i = 1, \dots, 36. \quad (2.11)$$

На основі опрацювання інформаційного сигналу було отримано експериментальні дані в інтервальному вигляді, з врахуванням вимірювальних похибок та шумів [152].

Детальний аналіз даних показав, що структуру адекватної моделі розподілу максимальних амплітуд інформаційного сигналу на області хірургічного втручання слід шукати із використанням тригонометричних базисних функцій. Для зменшення кількості таких елементів було додано нелінійну базисну функцію для параметра у вигляді показникової функції $\varphi(\hat{g}) = \sin^g(2.D)$.

Відповідно, було сформовано множину потенційних структурних елементів у такому вигляді:

$$F = \left\{ 1, x, y, xy, x^2, y^2, \sin^g\left(\frac{\pi}{36}x\right), \sin^g\left(\frac{\pi}{36}y\right), \sin^g\left(\frac{\pi}{36}xy\right) \right\}. \quad (2.12)$$

В ході перебору та нарощування структури моделі елементами з множини F було отримано структуру на основі згортки такого вигляду:

$$\lambda_s = \left\{ 1, y, \sin^g\left(\frac{\pi}{36}xy\right) \right\}, \quad (2.13)$$

на основі якої отримали оптимальний розв'язок. Значення цільової функції (2.1) в ході обчислень наближається до нуля, що продемонстровано на рисунку 2.3.

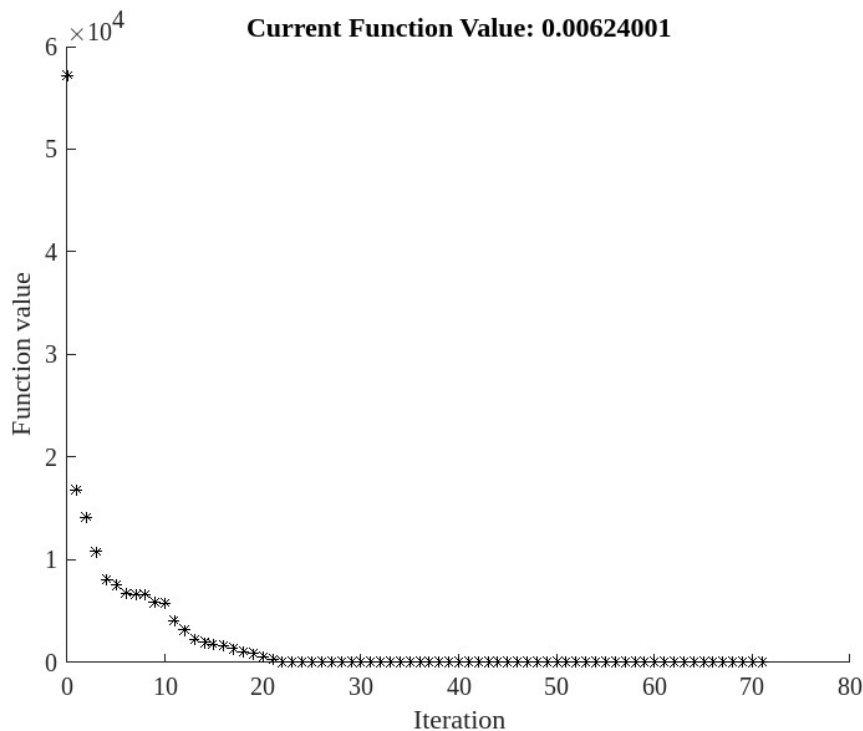


Рисунок 2.3 – Значення цільової функції $\delta(\lambda_s, g_j^s, \alpha_i)$ в ході обчислення параметрів моделі \hat{g} та $\hat{\alpha}_i$ для одержаної моделі

На основі обчислених параметрів $\hat{g}=(2.7, 7623 \quad 2, 0482 \quad 45, 2431 \quad 2, 1703)$ та коефіцієнтів $\hat{\alpha}_i$ побудовано модель розподілу амплітуди інформаційного сигналу на поверхні області хірургічного втручання у такому вигляді:

$$\hat{A}(\vec{X}_i) = 7, 7623 + 2, 0482y + 45, 2431 \sin^{2,1703} \left(\frac{\pi}{36} xy \right). \quad (2.14)$$

В таблиці 2.5 також наведено прогнозні значення амплітуди інформаційного сигналу, які отримані на основі моделі та відповідні коефіцієнти $\hat{\alpha}_i$, що були обчислені в ході оптимізації.

Таблиця 2.5 – Результати побудови інтервальної моделі розподілу
максимальної амплітуди сигналу

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

На рисунку 2.4 наведено графіки експериментального інтервального коридору амплітуди інформаційного сигналу та значення отримані на основі моделі. Наведені графіки демонструють належність прогнозованих значень характеристики

до інтервалів цієї характеристики, отриманих експериментально у кожній точці вимірювань, що задовольняє умову (1.9).

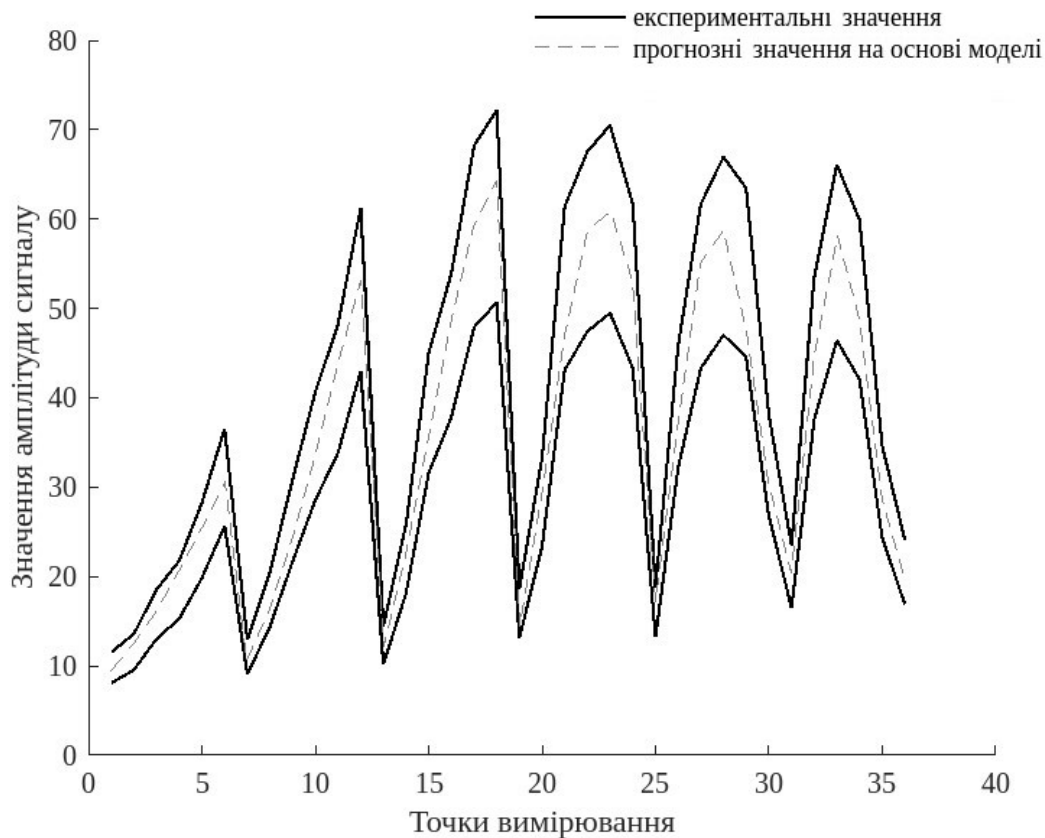


Рисунок 2.4 – Інтервальні значення вимірювань та прогнози на основі моделі значення амплітуди інформаційного сигналу

На рисунку 2.5 наведено 2- та 3-вимірну візуалізацію розподілу максимальної амплітуди на області хірургічного втручання, яка демонструє можливе розміщення гортанного нерва.

При цьому було застосовано методи нелінійної оптимізації з обмеженнями на параметри \hat{g} та коефіцієнти $\hat{\alpha}_i$ Optimization Toolbox ППП MatLab. Зазначені методи базуються на алгоритмах, що уможливають знаходження локальних екстремумів складної цільової функції оптимізаційної задачі (2.1). При цьому значне

розширення простору шуканих параметрів, за рахунок коефіцієнтів $\hat{\alpha}_i$, призводить до появи великої кількості таких локальних мінімумів.

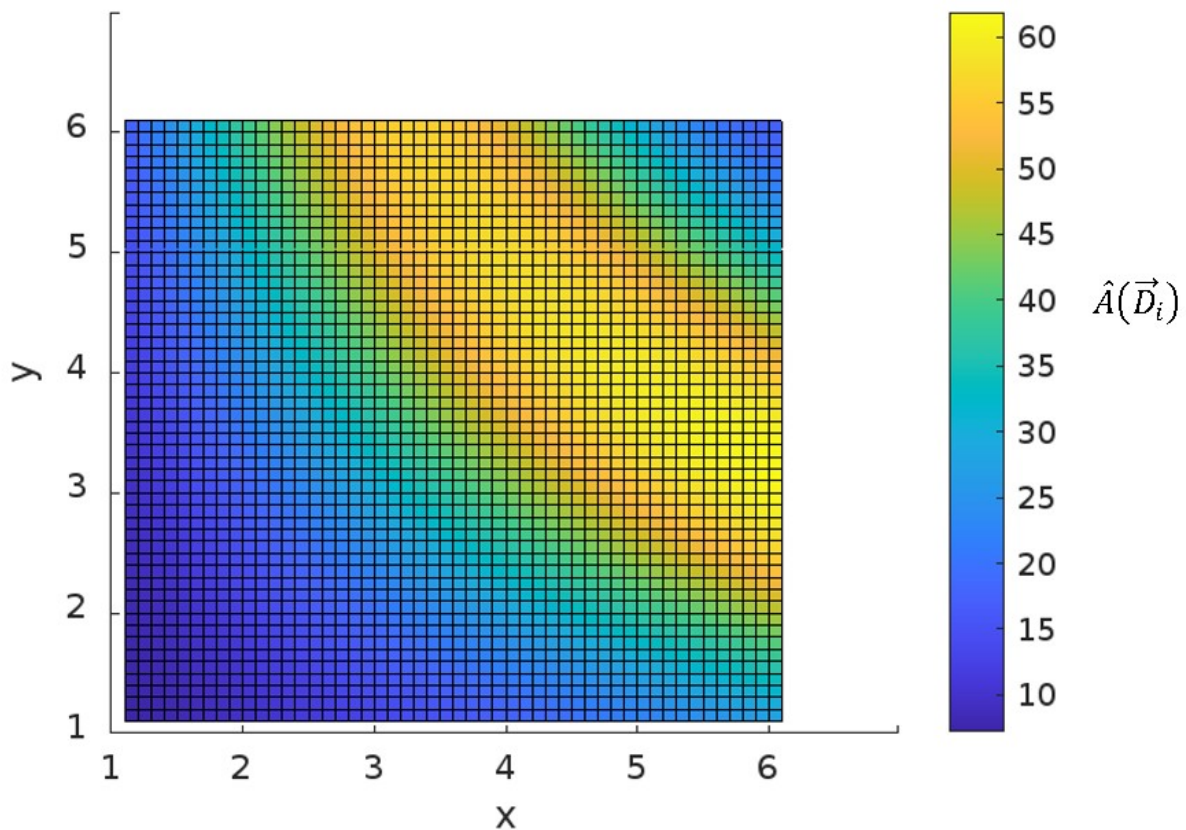


Рисунок 2.5, а – Двовимірне зображення візуалізації розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на основі розробленої моделі

Як показала практика, достатньо визначити локальний мінімум на основі оцінок параметрів моделі \hat{g} та коефіцієнтів $\hat{\alpha}_i$, в якому значення цільової функції $\delta(\lambda_s, g_j^s, \alpha_i)$ наближається до нуля та при цьому виконується умова (2.10), що гарантує отримання адекватної інтервальної моделі розподілу амплітуди інформаційного сигналу.

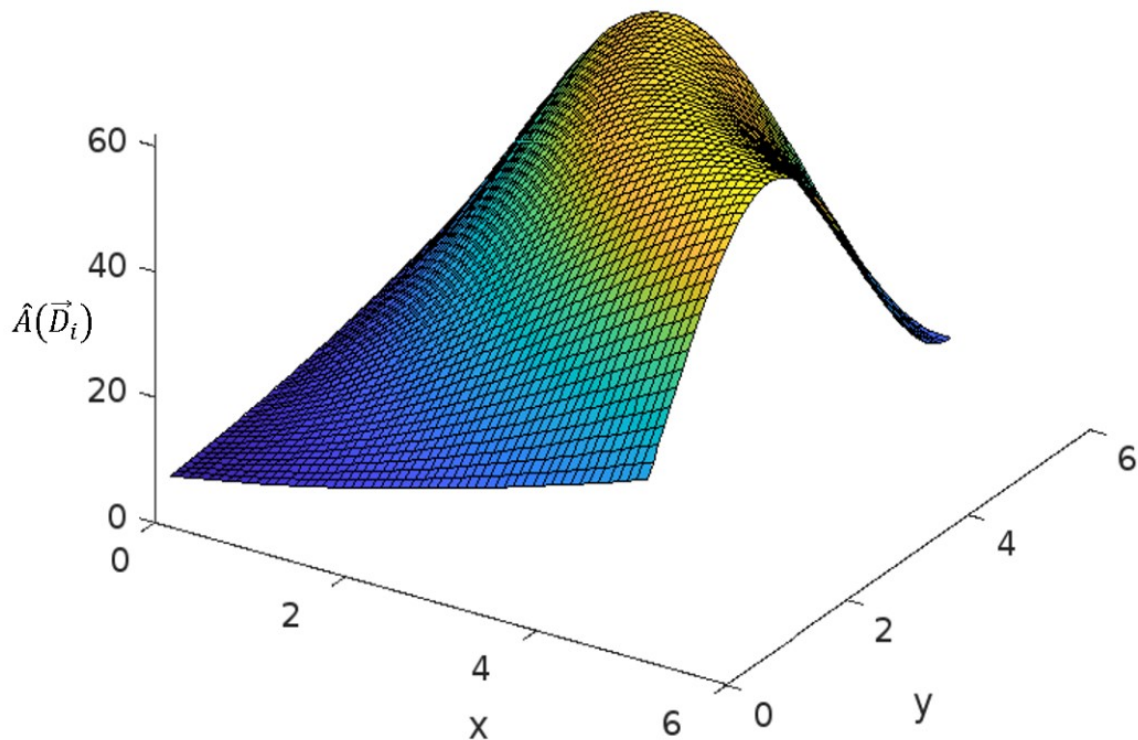


Рисунок 2.5, б – 3d зображення візуалізації розподілу максимальної амплітуди інформаційного сигналу на основі розробленої моделі

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

Проведений компаративний аналіз відомих засобів глобальної оптимізації з метою вибору оптимального методу розв'язування оптимізаційної задачі ідентифікації параметрів інтервальних нелінійних моделей статичних систем показав, що за умови гладкості функції мети оптимізації ефективним є GlobalSearch на основі методу внутрішньої точки. Разом з тим, для умов невизначеності характеру функції мети, оптимальними є методи ройового інтелекту.

2.4. Метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей із вибором структурних елементів на основі градієнта цільової функції

Аналіз методів структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей продемонстрував, що основною проблемою, яка породжує комбінаторну або стохастичну складову оптимізації, є вибір структурних елементів з множини λ_s для формування вектора $\vec{\lambda}_k$. Основний підхід базується на оцінюванні параметрів (оптимізації параметрів на основі задачі (2.1-2.3)) для кожного вектора $\vec{\lambda}_k$, який був сформований за результатами комбінування, селекції або мутації.

Виходячи з цього, основним завданням є зниження обчислювальної складності розв'язку задачі структурної

ідентифікації на основі розроблення методу вибору структурних елементів, який би уможливив зменшення кількості процедур параметричної ідентифікації на етапі формування структур моделей-претендентів.

Оскільки цільова функція (2.7) є гладкою для деякого фіксованого вектора $\vec{\lambda}_k$, то для її дослідження можна використати градієнтні методи та їх комбінацію.

Нехай задано деяку модель-претендент зі структурою на основі вектора $\vec{\lambda}_k$ та вектора параметрів $\vec{\beta}^k$. Для дослідження якості структури моделі-претендента запропоновано використовувати антиградієнт цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))$ в точці $\vec{\beta}^k$. Для моделі-претендента на основі вектора $\vec{\lambda}_k$, із розмірністю m_k величина вектора антиградієнту $-\nabla$ відносно вектора параметрів $\vec{\beta}^k$ вказує на напрям мінімізації цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))$. Відповідно, для структури $\hat{\lambda}_k$ заданого розміру m_k вектор антиградієнту позначимо так:

$$-\nabla \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X)) = \left(\begin{array}{c} \frac{d\delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))}{d\beta_1^k}, \frac{d\delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))}{d\beta_2^k}, \\ \dots, \frac{d\delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))}{d\beta_{m_k}^k} \end{array} \right). \quad (2.15)$$

Спираючись на властивість похідних багатовимірної функції по її змінних, можемо стверджувати, що необхідною та достатньою умовою оптимальності набору структурних елементів $\vec{\lambda}_k$ моделі-претендента в сенсі задачі (2.7-2.9) є мінімум норми вектора антиградієнта $\|-\nabla \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))\|$ цільової функції (2.7) в точці $\vec{\beta}^k(X)$.

Спираючись на цю умову запропоновано такі правила вибору структурних елементів в ході синтезу структури при реалізації методу структурної ідентифікації.

Правило 1. Необхідною та достатньою умовою вичерпаності чи оптимальності набору структурних елементів $\vec{\lambda}_k$ моделі-претендента в сенсі задачі (2.7-2.9) для фіксованої кількості параметрів m_k є мінімум норми вектора антиградієнта $\|-\nabla \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(X))\|$ цільової функції (2.7) в точці $\vec{\beta}^k(X)$.

У випадку виконання цієї умови здійснюємо одну з двох дій: якщо додатково умова (2.10) виконується, то зупинка алгоритму, оскільки знайдено розв'язок задачі (2.7-2.9), в протилежному випадку, структуру моделі вважаємо вичерпаною, тому збільшуємо кількість структурних елементів $m_k + 1$ для поточної моделі-претендента.

Правило 2. (випадок невиконання правила 1.) Найбільш придатним кандидатом серед усіх структурних елементів для

структури $\vec{\lambda}_k$ є той, який забезпечує найменше значення цільової функції (2.7). Для цього достатньо із доданим до структури структурним елементом обчислити норму антиградієнта.

На основі цих теоретичних міркувань алгоритм структурної ідентифікації нелінійних інтервальних моделей базується на мінімізації функції мети в просторі параметрів із напрямленим вибором елементів структури моделі.

Псевдокод алгоритму структурної ідентифікації наведено нижче.

Stop_Criterion = FALSE;

Сформувати множину можливих структурних елементів, λ_s ;

$s = \text{length}(\lambda_s^X)$;

$k = 1$;

Задати початкову структуру:

$\lambda_k = \left\{ f_1^k(\vec{X}), \dots, f_{m_k}^k(\vec{X}), f_{m_k+1}^k(\hat{\beta}_1^k(\vec{X}_{i,j,h})), \dots, f_{2m_k}^k(\hat{\beta}_{m_k}^k(\vec{X}_{i,j,h})) \right\}$;

Поки Stop_Criterion == FALSE:

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

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

Якщо модель адекватна:

Stop_Criterion = TRUE;

В іншому випадку:

Для v від 1 до m

Для w від 1 до s

Обчислити часткову похідну функції мети по v -му параметру для w -го

структурного елемента, $\frac{d}{d\beta_v} \delta(\hat{\beta}_v^k, f_w^s(\bar{X}_{i,j,h}))$;

Кінець для w

Кінець для v

Обчислити вектор антиградієнта на основі k -ї структури,

$-\nabla \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(\bar{X}_{i,j,h}))$;

Якщо $-\nabla \delta(\vec{\lambda}_k, \vec{\beta}^k(\bar{X}_{i,j,h})) < 0$

Для v від 1 до m

Якщо $\frac{d}{d\beta_v} \delta(\hat{\beta}_v^k, f_w^s(\bar{X}_{i,j,h})) < 0$:

Замінити у структурі λ_k згідно з правилом 2 елемент $f_v^k(\bar{X}_{i,j,h})$ на $f_w^s(\bar{X}_{i,j,h})$

;

Кінець якщо

Кінець для v

В іншому випадку:

Додати у структуру λ_k новий елемент $f_w^s(\bar{X}_{i,j,h})$;

Кінець якщо

$k = k+1$;

Кінець якщо

Кінець поки

Дослідимо запропонований метод та алгоритм його реалізації на конкретному прикладі. Для спрощення демонстрації процедури вибору структурних елементів розглянемо випадок лінійної відносно параметрів моделі на основі даних в такому вигляді:

$$\vec{X}_i \rightarrow [y_i^-; y_i^+], i = 1, \dots, N. \quad (2.16)$$

За тестові дані використаємо експериментальні дані з праці [33].

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

$i = 1, \dots, 21$

Сформуємо множину можливих елементів:

$$\lambda_s^X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 \cdot x_2, x_1 \cdot x_3, x_1 \cdot x_4, x_2 \cdot x_3, x_2 \cdot x_4, x_3 \cdot x_4\},$$

та приведемо множину λ_s^X до векторного вигляду на основі дискретних значень, що відповідають порядковим індексам елементів у множини λ_s^X , $l_i = \lambda_s^X(2.l_i)$.

В якості критерію зупинки оптимізації структури моделі використаємо вираз (2.12).

Для обчислення антиградієнта представимо аналітичний вираз часткових похідних в точці $\hat{\beta}^k$ на основі заданих структурних елементів:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\beta_v} \delta(\beta_v^k, f_w^s(X)) &= \frac{d}{d\beta_v} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{y}_i(\lambda_k, \bar{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) +}{f_{m_k+v}^k(\hat{\beta}_v^k(\bar{X}_i)) \cdot f_w^s(\bar{X}_i)} \right)^2 = \\ &2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{y}_i(\lambda_k, \bar{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) +}{f_{m_k+v}^k(\hat{\beta}_v^k(\bar{X}_i)) \cdot f_w^s(\bar{X}_i)} \right) \cdot \sum_{i=1}^N (f_w^s(\bar{X}_i)) \cdot \frac{d}{d\beta_v} (\beta_v^k(X)) = \\ &2 \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{y}_i(\lambda_k, \bar{X}_i) - P([y_i^-; y_i^+], \alpha_i) +}{f_{m_k+v}^k(\hat{\beta}_v^k(\bar{X}_i)) \cdot f_w^s(\bar{X}_i)} \right) \cdot \sum_{i=1}^N (f_w^s(\bar{X}_i)). \end{aligned} \tag{2.17}$$

де

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

$f_w^s(\vec{X})$ – структурний елемент, що не входить в модель-претендент,

$$f_w^s(\vec{X}) \in \lambda_s^X \wedge f_w^s(\vec{X}) \notin \lambda_k.$$

Задамо початкову розмірність моделей претендентів $m_1 = 2$ та сформуємо випадковим чином початкову структуру на основі вектора $\vec{\lambda}_1 = (4, 8)$, що відповідає множині елементів $\lambda_1 = \{x_4, x_2 \cdot x_3\}$.
Задамо $\alpha_i = 0,5, i = 1, \dots, 21$, для функції $P([y_i^-, y_i^+], \alpha_i)$, що відповідає центрам інтервалів для вихідної змінної. Для розв'язку оптимізаційних задач (2.1-2.3), на основі цільової функції (2.7), використали метод GlobalSearch, що входить в Global Optimization Toolbox ППП MATLAB. За оптимізатор обрали функцію fmincon та алгоритм внутрішньої точки.

Провівши параметричну ідентифікацію, із використанням вказаних засобів, отримали вектор оцінок параметрів $\vec{\beta}^1 = (99, 2842 - 13, 6265 - 81, 4928)$, для точкової моделі на основі структури $\vec{\lambda}_1$, який містить коефіцієнт β_0 . Значення цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_1, \vec{\beta}^1) = 3,7696e + 03$. Модель не адекватна, оскільки не задовольняє умовам (2.10), що продемонстровано на рисунку 2.6.

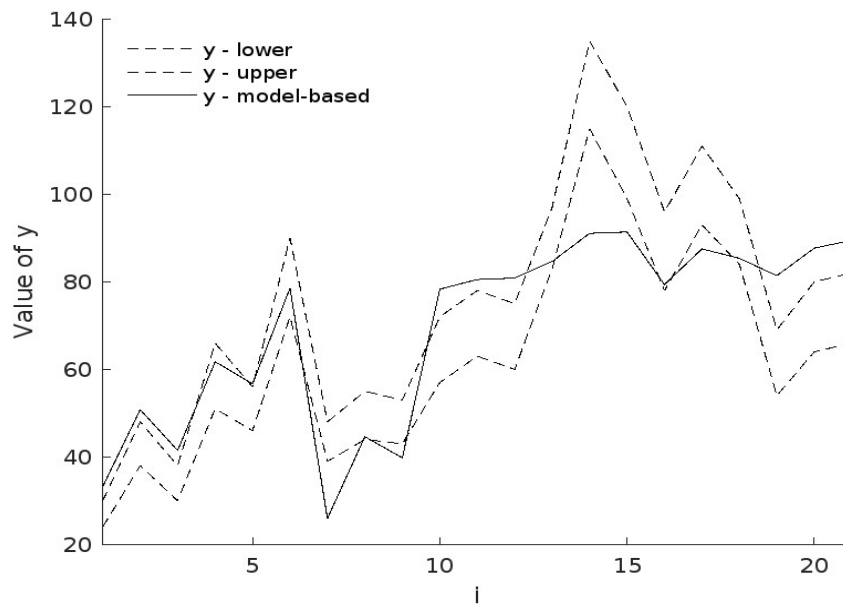


Рисунок 2.6 – Візуалізація співвідношення експериментального інтервального коридору та точкової моделі для $\vec{\lambda}_1$ та $\vec{\beta}^1$

Далі обчислимо антиградієнт в точці $\vec{\beta}^1$ на основі підбору структурних елементів. Результати обчислення часткових похідних в точці $\vec{\beta}^1$ для всіх структурних елементів наведено в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Результати обчислень векторів антиградієнта на основі $\vec{\lambda}_1 = (4,8)$

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

Згідно з правилом 2, структурний елемент зі значенням 1, якому відповідає $\lambda_s^X(1) = x_1$, має найменше значення часткової похідної для другого параметра $\frac{d\delta}{d\beta_2^1} = -13301$ та є претендентом для заміни структурного елемента зі значенням 8, $\lambda_s^X(8) = x_2 \cdot x_3$. Для першого параметра часткова похідна в точці має мінімальне від'ємне значення при структурному елементі зі значенням 2, $\lambda_s^X(2) = x_2$, $\frac{d\delta}{d\beta_1^1} = -559,04$. Відповідно, для цих елементів одержимо значення антиградієнта в точці $\vec{\beta}^1$ на всій множині дискретних значень λ_s^X : $-\nabla\delta = (-13301 \ -559,04)$ (див. рис.2.7).

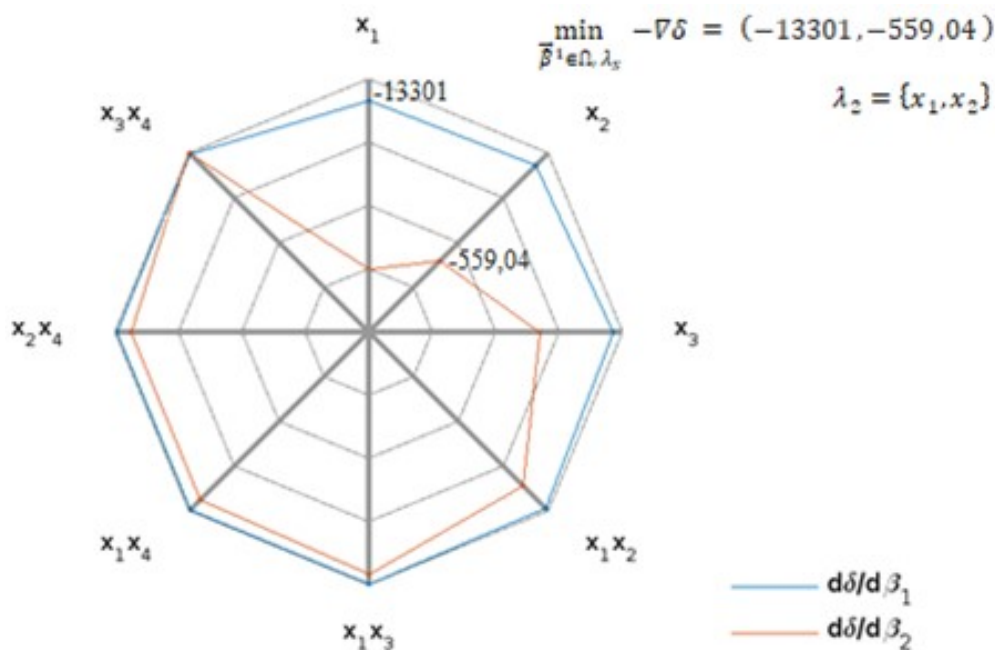


Рисунок 2.7 – Результати вибору структурних елементів на основі антиградієнту в точці $\vec{\beta}^1$

На основі проведених обчислень сформуємо нову множину $\lambda_2 = \{x_1, x_2\}$ для моделі-претендента та здійснюємо процедуру ідентифікації вектора оцінок параметрів $\vec{\beta}^2$.

В результаті отримали такі значення $\vec{\beta}^2 = (2.135, 6231 - 65, 7504 - 48, 6644)$, значення цільової функції на основі $\vec{\lambda}_2 = (1, 2)$ та точки $\vec{\beta}^2$: $\delta(\vec{\lambda}_2, \vec{\beta}^2) = 1,1741e + 03$.

Отримана математична модель не забезпечує адекватності з експериментальними даними, що продемонстровано на рисунку 2.8. Та при цьому спостерігаємо «вичерпність» поточної структури моделі-претендента, оскільки норма антиградієнта дорівнює 0.

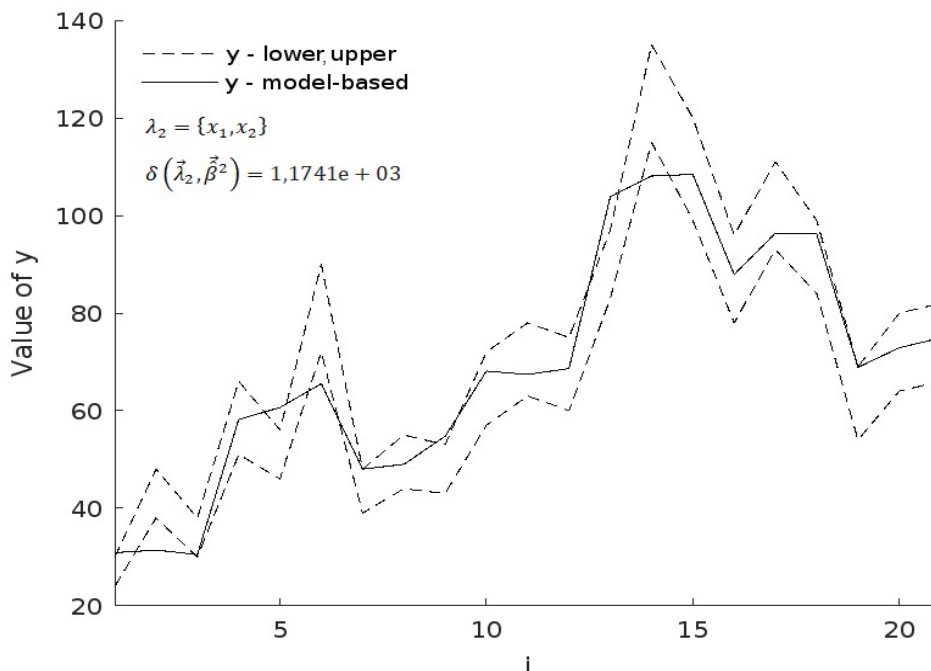


Рисунок 2.8 – Візуалізація співвідношення експериментального інтервального коридору та точкової моделі для $\vec{\lambda}_2$ та $\vec{\beta}^2$

Отже, збільшуємо розмірність моделі, для цього обираємо додатковий третій елемент $\{x_4\}$, який забезпечує мінімальний градієнт $\nabla\delta = (0 \ 0 \ 1697,1)$ та формуємо множину $\lambda_3 = \{x_1, x_2, x_4\}$ (див табл. 2.7 та рис. 2.9).

Результати обчислень для моделі-претендента на основі λ_3 наведено в таблиці 2.8. Мінімум цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_3, \vec{\beta}^3) = 695,8426$ досягається в точці $\vec{\beta}^3 = (137,6467 - 65,2712 - 22,9995 - 35,0753)$. Отримана математична модель не забезпечує адекватності з експериментальними даними (див.рис. 2.10). Тому повторюємо процедуру нарощування структури.

Таблиця 2.7 – Результати обчислень векторів антиградієнта на основі $\vec{\lambda}_2 = (1,2)$

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

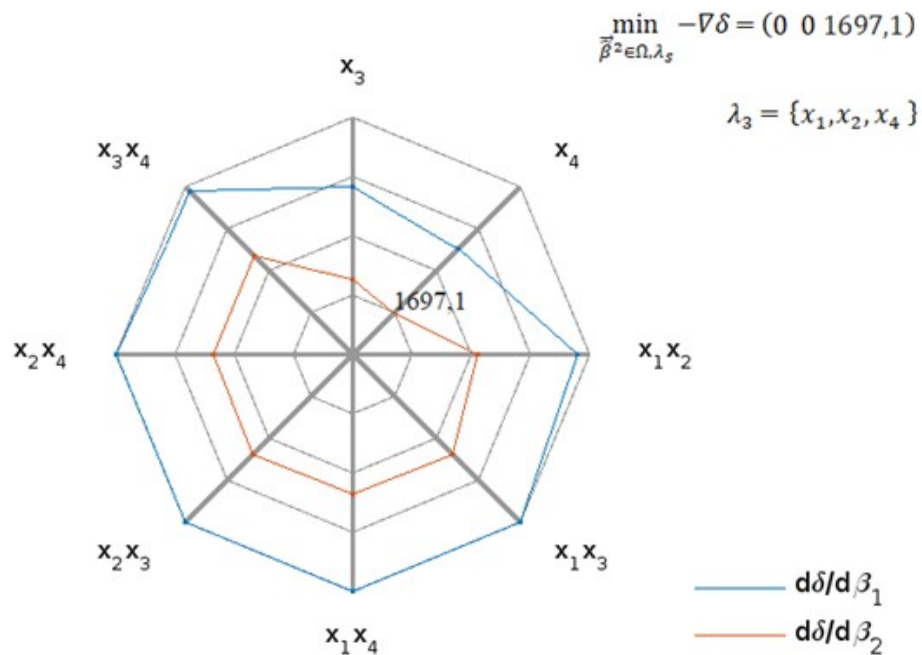


Рисунок 2.9 – Результати вибору структурних елементів на основі антиградієнту в точці $\vec{\beta}^2$

Таблиця 2.8 – Результати обчислень векторів антиградієнту на основі $\vec{\lambda}_3 = (1,2,4)$

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

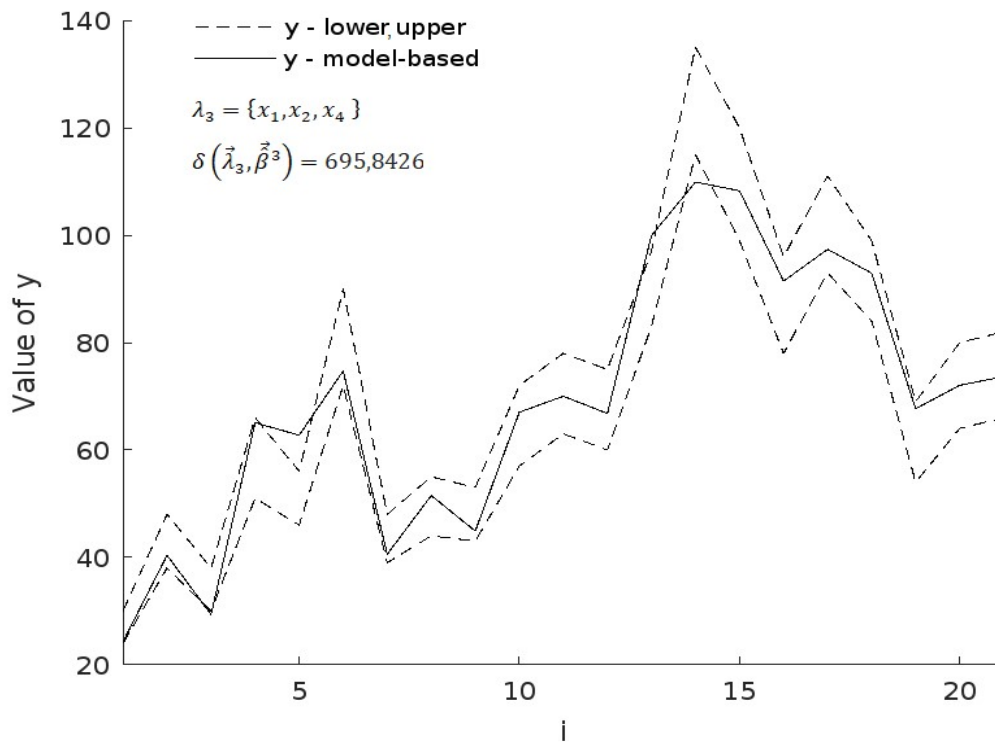


Рисунок 2.10 – Візуалізація співвідношення експериментального інтервального коридору та точкової моделі для $\vec{\lambda}_3$ та $\vec{\beta}^3$

Отримані результати продемонстровано в таблицях 2.9 – 2.10 та рисунках 2.11-2.14.

Таблиця 2.9 – Результати обчислень векторів антиградієнту на основі $\vec{\lambda}_4 = (1, 2, 3, 4)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{X}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^4}$	0				4673,2	4907,1	4905,3	4904,7	4901,9	4777,2
$\frac{d\delta}{d\beta_2^4}$		0			834,08	921,67	914,62	922,81	912,19	915,83
$\frac{d\delta}{d\beta_3^4}$			0		1038,5	1505,9	1444,5	1519,6	1427,2	1634,2
$\frac{d\delta}{d\beta_4^4}$				0	719,93	962,37	931,8	969,07	923,06	1020,5

β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}))$									
β_1^4	638,56	-	-	-	7261,8	9323,3	9794,3	11873	12531	14703
β_2^4	-	638,56	-	-	855,6	996,24	1008,2	967,65	1000	1145,3
β_3^4	-	-	638,56	-	1512,6	1540,5	1659	1612,6	1846,8	2127,1
β_4^4	-	-	-	638,56	1064,1	1114,4	1039	1082	1041,3	1204

Отримали для моделей претендентів $\lambda_4 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$:

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

$$\nabla \delta = (0 \ 0 \ 266,440), \quad \delta(\vec{\lambda}_4, \vec{\beta}^4) = 638,5644 \quad \text{та} \quad \text{ДЛЯ}$$

$$\lambda_5 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_1 \cdot x_2\}:$$

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

$$\nabla \delta = (0 \ 0 \ 0 \ 719,93), \quad \delta(\vec{\lambda}_5, \vec{\beta}^5) = 557,0550, \quad \text{ВІДПОВІДНО.}$$

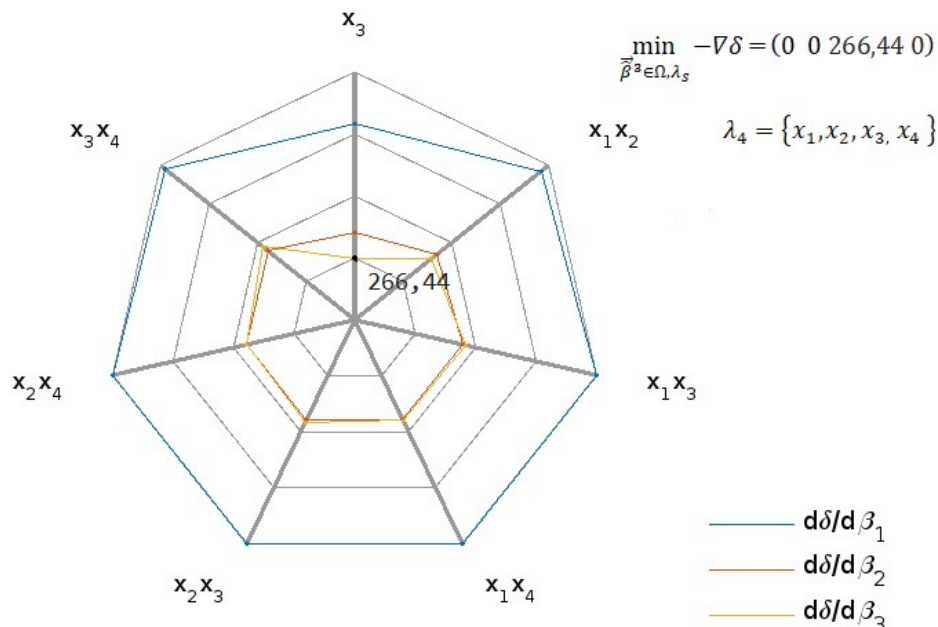


Рисунок 2.11 – Результати вибору структурних елементів на основі антиградієнту в точці $\vec{\beta}^3$

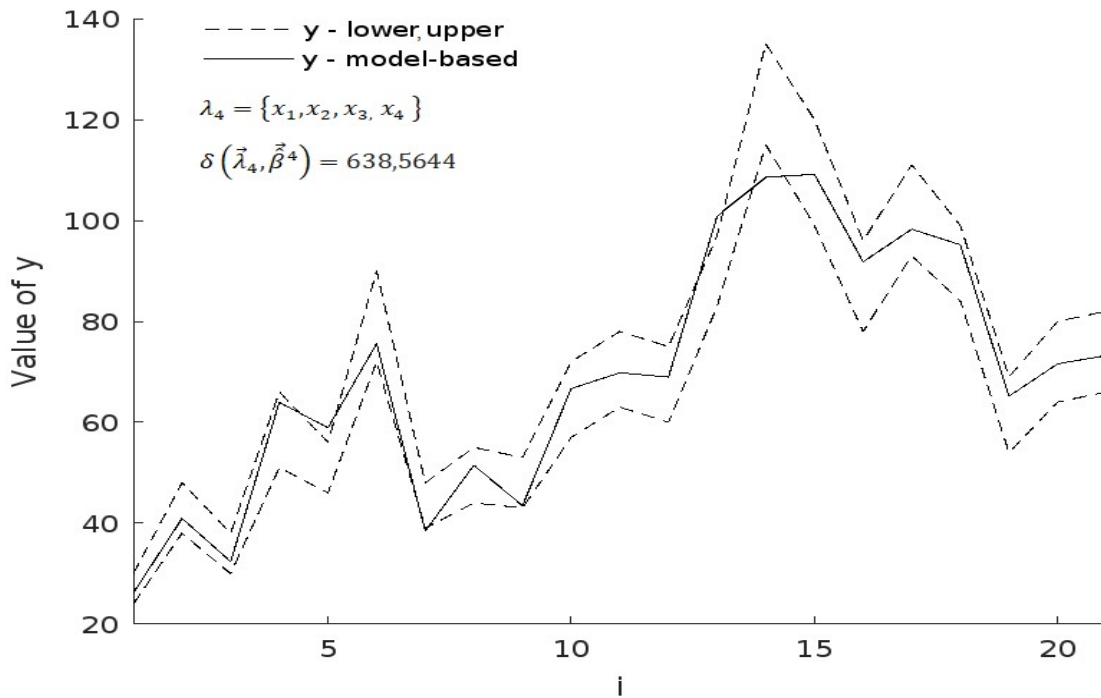


Рисунок 2.12 – Візуалізація співвідношення експериментального інтервального коридору та точкової моделі для $\vec{\lambda}_4$ та $\vec{\beta}^4$

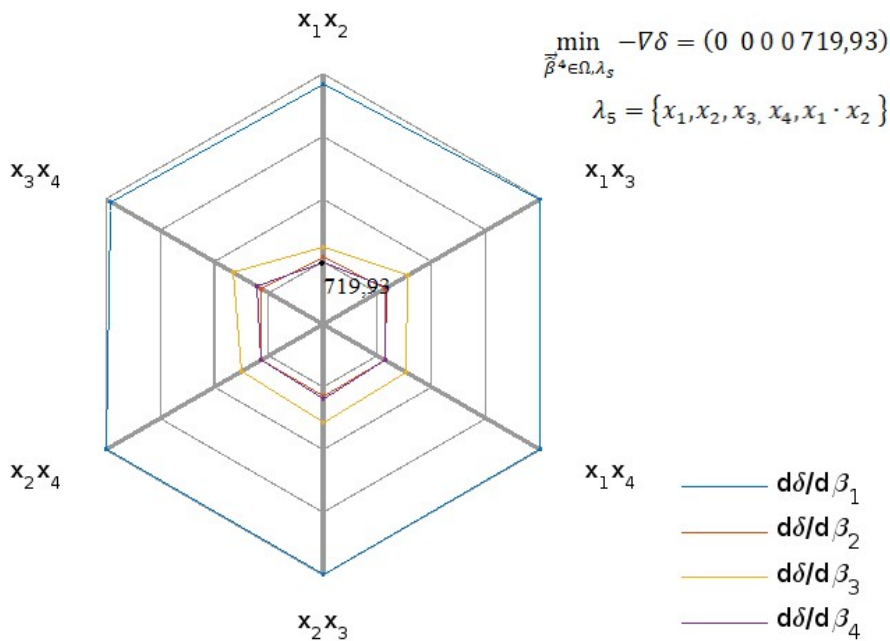


Рисунок 2.13 – Результати вибору структурних елементів на основі градієнту в точці $\vec{\beta}^4$

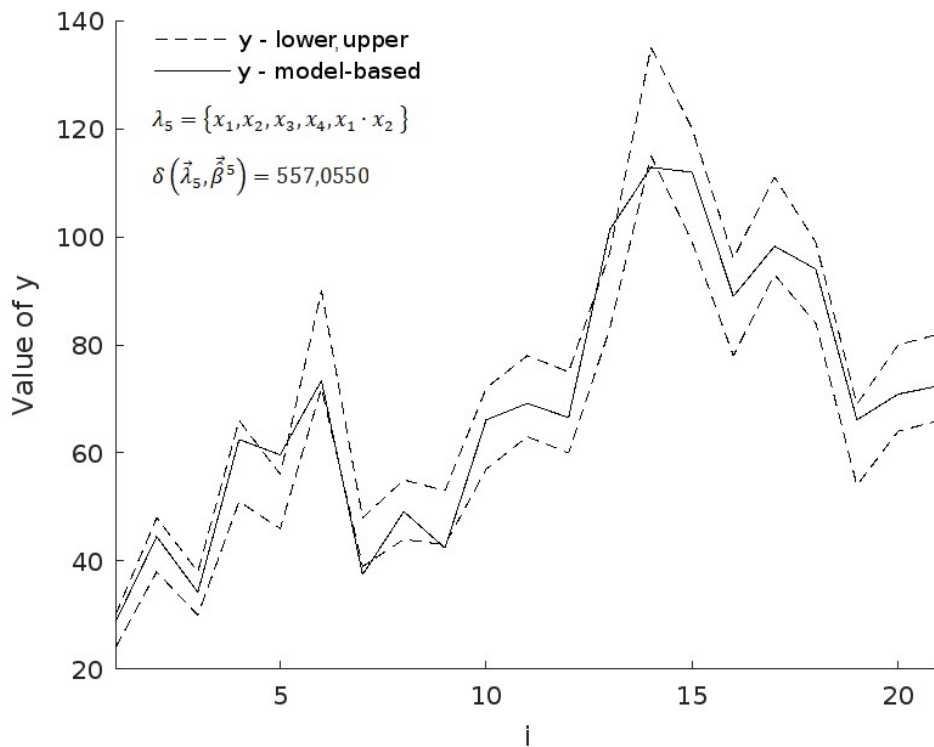


Рисунок 2.14 – Візуалізація співвідношення експериментального інтервального коридору та точкової моделі для $\vec{\lambda}_5$ та $\vec{\beta}^5$

На шостій ітерації алгоритму на основі антиградієнта $-\nabla \delta = (0 \ 0000 \ -1260,1)$ була сформована модель на основі множини $\lambda_6 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_3 \cdot x_4\}$, яка задовольнила умови (2.10) в точці $\vec{\beta}^6 = (177,2073 \ -54,4447 \ 1,9872 \ -123,1516 \ -129,6978 \ 163,8513)$ зі значенням цільової функції $\delta(\vec{\lambda}_6, \vec{\beta}^6) = 235,2256$.

Таблиця 2.10 – Результати обчислень градієнту на основі $\vec{\lambda}_5 = (1, 2, 3, 4, 5)$

$\frac{d\delta}{d\beta_v^k}$	$f_w^s(\vec{X}_i)$									
	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_4$	$x_2 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_4$	$x_3 \cdot x_4$
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{d\delta}{d\beta_1^5}$	0					6774,6	6772,1	6771,3	6767,4	6595,3
$\frac{d\delta}{d\beta_2^5}$		0				3797,4	3768,4	3802,1	3758,4	3773,4
$\frac{d\delta}{d\beta_3^5}$			0			394,07	378,01	397,65	373,48	427,65
$\frac{d\delta}{d\beta_4^5}$				0		1476,4	1429,5	1486,7	1416,1	1565,5
$\frac{d\delta}{d\beta_5^5}$					0	-914,17	-780,02	-945,48	-743,63	-1260,1
β_v^k	$\delta(\beta_v^k, f_w^s(\vec{X}))$									
β_1^5	557,06	-	-	-	-	16909	17692	21793	22920	27160
β_2^5	-	557,06	-	-	-	6245,6	6027,6	5586,2	5625,2	8271,6
β_3^5	-	-	557,06	-	-	614,06	633,51	634,92	666,34	688,74
β_4^5	-	-	-	557,06	-	1594,2	1362,7	1521	1363,5	1787,8
β_5^5	-	-	-	-	557,06	1361,5	1270,1	1341,6	1522,5	2387,6

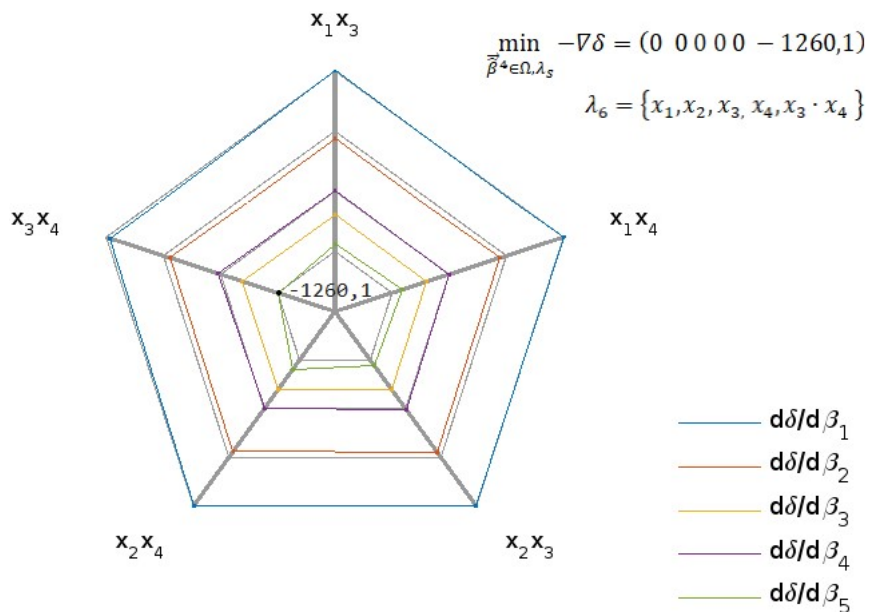


Рис. 2.15. Результати вибору структурних елементів на основі градієнту в точці $\vec{\beta}^5$

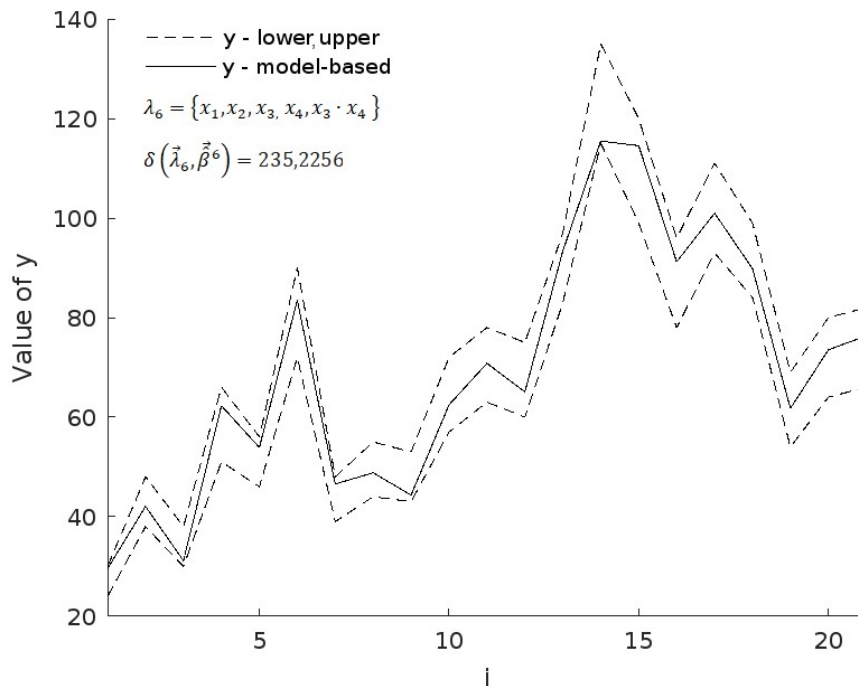


Рисунок 2.16 – Візуалізація співвідношення експериментального інтервального коридору та точкової моделі для $\vec{\lambda}_6$ та $\vec{\beta}^6$

На рисунку 2.17 наведено графік збіжності цільової функції в ході структурної ідентифікації, обчислення якої відбувалося при ідентифікації параметрів.

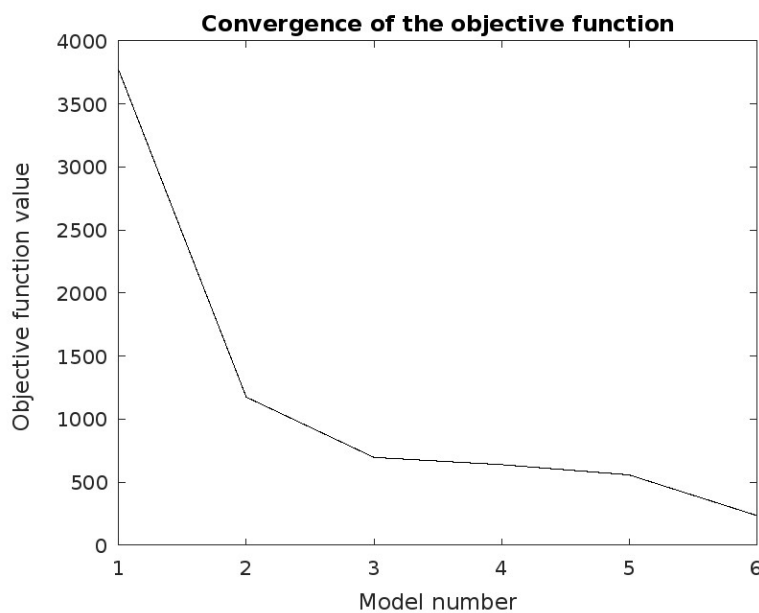


Рисунок 2.17 – Графік збіжності цільової функції

Отже, запропонований метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей ґрунтується на виборі структурних елементів для синтезу структури моделі із використанням аналізу градієнта цільової функції. При цьому визначено та обґрунтовано необхідні та достатні умови оптимальності набору структурних елементів на основі аналізу градієнта цільової функції та сформульовано основні правила вибору структурних елементів. Реалізація та апробація алгоритму структурної ідентифікації на конкретному прикладі показала його збіжність.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто випадок ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів. Показано, що ця задача є оптимізаційною задачею з нелінійною функцією мети, яка має значну кількість локальних екстремумів. Досліджено властивості функції мети. Для дослідження властивостей функції мети проведено чисельні експерименти ідентифікації моделей на основі відомих тестових функцій, які задавали вхідні дані, структуру моделі та мали нелінійний характер. Встановлено можливість для розв'язування задачі ідентифікації інтервальних нелінійних моделей статичних об'єктів використання відомих методів багатовимірної оптимізації.

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

3. Проведений компаративний аналіз відомих засобів глобальної оптимізації з метою вибору оптимального методу розв'язування оптимізаційної задачі ідентифікації параметрів інтервальних нелінійних моделей статичних систем показав, що за умови гладкості функції мети оптимізації ефективним є GlobalSearch на основі методу внутрішньої точки. Разом з тим, для умов невизначеності характеру функції мети, оптимальними є методи ройового інтелекту.

4. Запропоновано метод структурної ідентифікації інтервальних нелінійних моделей, який ґрунтується на виборі структурних елементів для синтезу структури моделі із використанням аналізу норми градієнта цільової функції. При цьому визначено та обґрунтовано необхідні та достатні умови

оптимальності набору структурних елементів на основі аналізу градієнта цільової функції та сформульовано основні правила вибору структурних елементів. Наведено приклади, які підтверджують високу ефективність методу та його збіжність.

РОЗДІЛ 3

ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ПРИ ПОБУДОВІ ІНТЕРВАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

3.1. Огляд теоретичного підґрунтя побудови онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних

В процесі реалізації знання-орієнтованого підходу в системах прийняття рішень, пошуку зручних, раціональних засобів інформаційного наповнення часто виникає проблема компактного, однозначного та достатньо повного подання знань. Під знаннями розуміємо систему понять і відношень які містять структуровану інформацію про властивості об'єктів, закономірності процесів і набір формалізованих правил використання цієї інформації в прийнятті рішень. Знання для певної предметної області можна умовно класифікувати на понятійні, процедурні, фактографічні, конструктивні та методологічні [44, 89, 98].

Понятійні знання – набір понять, які використовуються для розв'язання конкретної задачі, наприклад у фундаментальних науках і теоретичних областях наук. Конструктивні знання – набори структур, підсистем і взаємозв'язків між елементами. Процедурні знання – набори методів, процедур (алгоритмів) їх використання та ідентифікації. Фактографічні знання – кількісні та якісні характеристики об'єктів та явищ. Методологічні знання – це знання

про методи перетворення дійсності, наукові знання про організацію ефективної діяльності. В трактуванні В.С. Аванесова останній вид знань віднесено до знань найвищого рівня [98].

Представлення знань – це процес, метою якого є відображення семантичного змісту, значення у вигляді синтаксичних форм: фраз усної мови, письмових фраз, сторінок книг, понять довідника, об'єктів географічних карт тощо. На даний момент розроблено множину моделей подання знань, які зображено на рисунку 3.1.

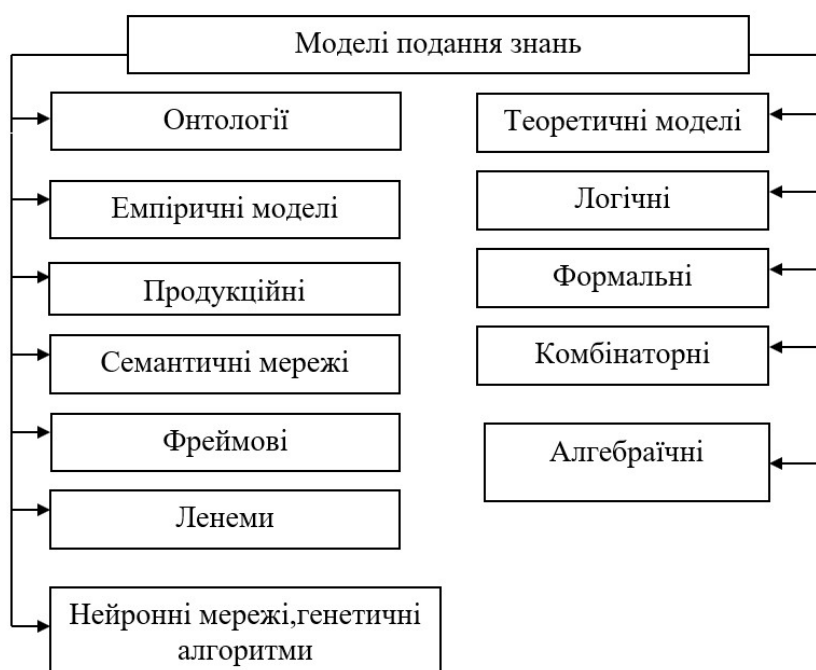


Рисунок 3.1 – Моделі подання знань [4]

Із множини наведених моделей проаналізуємо лише найвідоміші з них, тобто, продукційні, фреймові моделі, а також семантичні мережі [88-91, 138, 139]. Продукційна модель ґрунтується на правилах, які дозволяють представити знання у вигляді відношень

типу: «якщо умова, то дія». Вона є надто жорсткою конструкцією і тому при накопичені великої кількості продукцій вони можуть суперечити одна одній.

В інженерії знань під семантичною мережею розуміється граф, який відображає зміст цілісного образу. Вузли графу відповідають поняттям і об'єктам, а дуги – відношенням між об'єктами. Недоліком такого підходу є громіздкість представлення можливих зв'язків в мережі. Фреймова модель будується на основі фреймів, тобто структур, призначених для представлення деякого концептуального об'єкта. Інформація фрейму міститься у його слотах. Слоти можуть бути термінальними або бути також фреймами, утворюючи ієрархічну мережу [91, 138].

Одним із засобів представлення формалізованих знань є реляційна модель даних. Принципи РМД були сформульовані в 1969-1970 роках Е. Ф. Коддом (EF Codd) [112]. Переваги реляційної моделі: простота, користувацька доступність, оскільки використовується єдина інформаційна конструкція – таблиця; проектувальні правила, основа яких закладена на математичному апараті; незалежність даних. Для внесення змін в прикладному програмному додатку зміни реляційної БД будуть мінімальними; для організації запитів та написання прикладного програмного забезпечення немає необхідності знати організацію бази даних у зовнішній пам'яті.

Основними недоліками реляційної моделі є: досить складно описати предметну область у вигляді набору "таблиць"; здійснивши

логічне проектування сформується множина “таблиць”. Такий підхід супроводжується труднощами розуміння структури даних, а база даних займає багато зовнішньої пам'яті; часто такі процеси супроводжуються низькою швидкістю доступу до самих даних [112].

З множини моделей подання знань детальніше розглянемо онтології, оскільки їх використання при розробці систем підтримки прийняття рішень в рамках знання-орієнтованого підходу, які активно розвивається на даний час [88-90].

Онтологія являє собою спільну, узгоджену і детальну модель (або набір понять) певної предметної області [3, 6, 8, 64, 65, 72, 86, 87, 95, 106, 125]. Однією з основних переваг використання онтології є її здатність визначати семантичну модель об'єднаних даних в асоційоване знання. Онтології також можна використовувати для визначення зв'язку між різними типами семантичних знань. Таким чином, онтології можуть бути використані для формалізації як предметної області, так і самого процесу моделювання.

За останні кілька років багато реалізацій онтології і мови запитів було розроблено. Під час побудови системи на основі онтології спочатку потрібно прийняти рішення, який засіб побудови онтології слід використовувати в даному контексті. За останні кілька років було розроблено багато засобів для опису онтології. Більшість з них засновані на розширеній мові розмітки (XML) [107, 114, 121], що дозволяє їм бути машинно інтерпретованими [107, 114, 121]. Поширеними прикладами є Resource Description

Framework (RDF) і RDF Schema [133], DARPA Agent Markup Language та Ontology Inference Layer (DAML + OIL) [114] і мова опису онтологій (OWL) [136, 137, 142] і OWL2 [142]. Для того, щоб використовувати онтологію для формулювання запитів, важливо оцінити їх у термінах їхньої представлення, інструментів і підтримки аргументації для того, щоб визначити, яка мова онтології найкраще підходить для цього завдання. Більшість сучасних засобів опису онтології впливають на правила опису та структуру ранжування на основі XML RDF/RDFS.

OWL був розроблений на основі RDF і DAML + OIL [107]. Онтології OWL1 залишаються дійсними засобами опису онтологій в стандарті OWL2 [114].

Порівняння між RDF(s), OWL-1 і OWL-2 показує можливі використання концепцій представлення знань для формулювання бази даних на основі онтології запитів. Підсумовуючи, як OWL, так і RDF мають багато спільних рис, але OWL є кращим засобом для машинної інтерпретації, ніж RDF. Крім того, приходить OWL з більшим словниковим запасом і сильнішим синтаксисом, ніж RDF, який може використовуватися для визначення обмежень концепції складної онтології та згодом сформулювати реляційну базу даних на основі відповідних запитів.

Візуальні або інтерактивні системи формулювання запитів на основі онтології – це системи запитів до баз даних, які використовують візуальні представлення для експрес-запитів пов'язаних даних. Ці системи адаптують онтології для генерація

запитів до бази даних для підвищення ефективності спілкування людини з комп'ютером. В останні роки було розроблено багато таких систем (наприклад, TAMBIS, GRQL, SEWASIE, Ontogator, OntoViews, OntoQF, VISAGE, Smartch, Semantic-based і багато інших [42, 55, 56, 62, 64, 65, 72, 86, 87, 95]).

У більшості систем візуального формулювання запитів на основі онтології, пошукові запити виконуються за допомогою браузера, який візуалізує онтологію у вигляді дерева. Фактичний пошук виконується за допомогою вибору понять через візуальне дерево або за допомогою ключових слів, анотованих поняттями візуальної онтології. У таблиці 3.1. представлено порівняння між деякими з основних інструментів та підходів для формулювання запитів на основі онтології.

На даний момент існує кілька доступних інструментів та підходів, які можна використовувати для визначення відображень між схемою онтології та схемою бази даних (називається відображенням онтології в базу даних), наприклад D2R-MAP, розширений D2R, R2O, VisAVis, описані в [125, 128, 131, 136] та багато інших. Ці підходи базуються на припущенні що і база даних, і онтологія вже існують і створюють набір відповідних відображень між реляційною базою даних та схемою онтології. Підходи до візуалізації відрізняються від підходів трансформації, які спрямовані на генерацію моделі онтології з реляційної моделі (так звані перетворення бази даних в онтологію), як описано в [42, 55, 56, 62, 64, 65, 72, 86].

Більшість цих підходів забезпечують тривіальні перетворення, де кожна таблиця бази даних відображається на клас онтології, кожен стовпець на тип даних, кожен рядок до екземпляра та стовпці зовнішнього ключа використовуються, щоб зв'язати екземпляр класу з екземпляром іншого класу. На додачу до цих підходів, кілька перетворень бази даних в онтологію були розроблені в ряді інших інструментів.

Наприклад, DataGenie [107, 114, 121] – плагін для Protégé, який імпортує дані з реляційної бази даних в онтологію, D2RQ обробляє реляційні бази даних без RDF як віртуальні графи RDF, D2RMAP є базою даних для RDF мови, створюючи семантичні метадані з реляційної бази даних. RDB2ONT описує формальний алгоритм для використання метаданих реляційної бази даних плюс структурні обмеження для побудови онтології OWL, а в [107, 114, 121] представлено підхід до розробки онтології з реляційних баз даних з використанням зворотного проектування.

Таблиця 3.1 – Порівняння інструментів/підходів формулювання запитів на основі онтології.

Інструменти/ підходи	Підтримка семантичних запитів	Підтримка запитів за текстом	Підтримує мультимедійні бази даних	Підтримка різномірних джерел даних	Природно- мовні запити
CROEQS	+	+	+		
GRQL	+	+			
Ontogator	+	+	+		
OntoQF	+	+			
OntoViews	+	+	+		
Smartch	+	+			
SEWASIE	+	+		+	
TAMBIS	+	+			

TRANSFoRm	+	+		+	
VISAGE	+	+		+	
Ontology and Natural Language		+			+
OPTIQUE	+			+	
KIRA	+	+	+	+	
ATHENA	+	+			+
Using ontology SPARQL	+				
Protege	+	+	+		
Pay-As-You-Go Method	+			+	
Ontop	+			+	
Querying via OWL 2 QL	+				

Виходячи з проведеного аналізу, можна підсумувати, що онтології є достатньо дієвим інструментом для формалізації знань та їх програмної інтерпретації в прикладних програмних середовищах. Це дуже важлива характеристика, яка і стала ключовою в процесі вибору засобів реалізації онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних.

Математичні знання – це термін, який часто використовується для опису різних складових математичної науки, таких як теореми, леми, аксіоми, доведення тощо. Під терміном «знання з математичного моделювання» розуміємо означення величезної кількості знань, які формалізовані як в рамках конкретної математичної моделі, так і в процесі її побудови, а також пов'язані з ними процедури практичного використання. Порівняно з іншими формами знань, такими як правила, дерева розв'язків, математичні

знання є більш абстрактними та більш структурованими [42, 60, 123].

В загальному випадку онтологічний підхід до математичного моделювання стосується використанням онтології, оскільки він будується на термінах математичного моделювання та описах взаємозв'язків між основними процесами його перебігу [22].

Загальний онтологічний підхід до математичного моделювання з прикладної точки зору не дозволяє здійснювати управління процесами побудови математичних моделей, оскільки за його допомогою можна лише описати область математичного моделювання [62].

Виходячи з прикладної точки зору, більшість основних форм математичних знань або вбудовані у конкретних програмних засобах, таких як моделі роботи агрегату в імітаційному програмному забезпеченні, або мають бути формально інтерпретовані у більш загальний математичний інструмент, дотримуючись відповідних синтаксичних правил.

Більшість такого типу знань стосується конкретних завдань моделювання і чітко реалізовані за допомогою відповідних процедурних описів, а не декларативних представлень на відміну від філософського бачення математичного моделювання.

Разом з тим, застосування відомого інструментарію реалізованих програмних засобів недостатньо як для дослідників так і спеціалістів-практиків, оскільки сама онтологія процесу прихована в процедурах, модулях конкретного програмного

продукту. Така функціональна специфіка суттєво звужує можливості практичного використання такого інструментарію дослідниками та практиками.

Виходячи із наведених вище припущень, виникає актуальна науково-практична проблема побудови та реалізації онтологічних моделей для конкретного розділу математичного моделювання, його окремих підходів. Застосування такого типу онтологічних моделей дозволяє значно розширити можливості використання існуючого інструментарію.

Одним із напрямків математичного моделювання є індуктивний підхід, який ґрунтується на само організованому процесі еволюційного переходу від експериментальних даних до побудованих математичних моделей, які показують ті закономірності модельованих об'єктів і систем, які неявно відображаються в наявних експериментальних даних [66, 68, 92].

Важливою особливістю при реалізації індуктивного підходу є природа невизначеності інформаційних масивів даних, оскільки він ґрунтується на методах аналізу самих даних.

Онтологічний підхід для побудови математичних моделей в межах індуктивного підходу на основі методів групового урахування аргументів враховує ключові параметри для основних складових процесу моделювання, які обумовлюють можливість узагальнення та доцільність конструювання багатофункціональних програмних модулів при розробці комп'ютерних засобів індуктивного моделювання на основі МГУА [57, 67].

Оскільки запропонований підхід має складну структуру, яка інтерпретована з використанням Protege [24, 65, 107, 143, 146] та не містить прикладних програмно-інтерпретованих рішень, то його практичне використання в інших підходах до математичного моделювання є не достатньо доцільним. Використання такого підходу вимагає великих часових витрат на формалізацію самої предметної області та виходячи із складності її представлення в рамках системи Protege не сприятиме підтримці серед розробників відповідних прикладних програмних рішень [128, 143].

Іншим напрямком в математичному моделюванні на основі індуктивного підходу є методи математичного моделювання на основі інтервальних даних [38, 76]. Особливість цих методів є множинне представлення оцінок параметрів моделі «вхід-вихід», побудованої за результатами експерименту, в якому вихідні змінні одержані у інтервальному представленні.

В результаті використання інтервальних методів, замість однієї моделі «вхід-вихід», формується множина рівнозначних інтервальних моделей. Властивості таких моделей залежать від підходу до множинного оцінювання параметрів. Множину оцінок параметрів переважно шукають у вигляді многогранника, еліпсоїда або паралелепіпеда, який формує інтервальні значення параметрів.

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 з 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.

У запропонованому онтологічному підході для представлення понять, методів та засобів математичного моделювання на основі інтервальних даних, а саме декларативної та процедурної частин, математичні знання відокремлені [37, 42].

Декларативна частина складається з інформації, яка необхідна для побудови моделі, інформації, отриманої з моделі та відповідних математичних виразів, що представляють модель. Процедурна частина складається з деталізованих частин моделі, відповідних методів та алгоритмів їх реалізації, процедур ініціалізації змінних та їх інтерпретації.

Серед інструментів, які використовують для побудови та використання онтології, найчастіше використовуються Protege та OntoStudio [15, 24, 65]. Ці засоби завдяки надійності, високій частоті використання, масштабованості та розширюваності можуть також використовуватися в процесі побудови відповідних онтологічних моделей для представлення та управління знаннями, які накопичують в процесі математичного моделювання [25, 114, 146].

Проте, зазначені засоби складно інтегрувати в програмно-апаратні комплекси, які, зокрема часто використовують в медицині, і де швидкість та якість прийняття управлінських рішень є першочерговим завданням. Тому в якості інструментарію для побудови онтології в даній роботі використовуються:

- засоби сучасних реляційних баз даних – для зберігання інформації [112, 133];

- алгебра кортежів – для формалізованого представлення знань та подальшої їх програмної інтерпретації незалежно від вибраних програмних платформ для їх реалізації, а також з метою реалізації ефективних методів управління накопиченими знаннями [82-83, 98];

- Python та Java в якості мов програмування для відповідної інтерпретації запропонованих методів та засобів [73, 78, 126, 127].

На рисунку 3.1 представлено схему взаємозв'язків між декларативною та процедурною частиною знань, які накопичуються в процесі математичного моделювання на основі інтервальних даних в рамках пропонованого онтологічного підходу.

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.

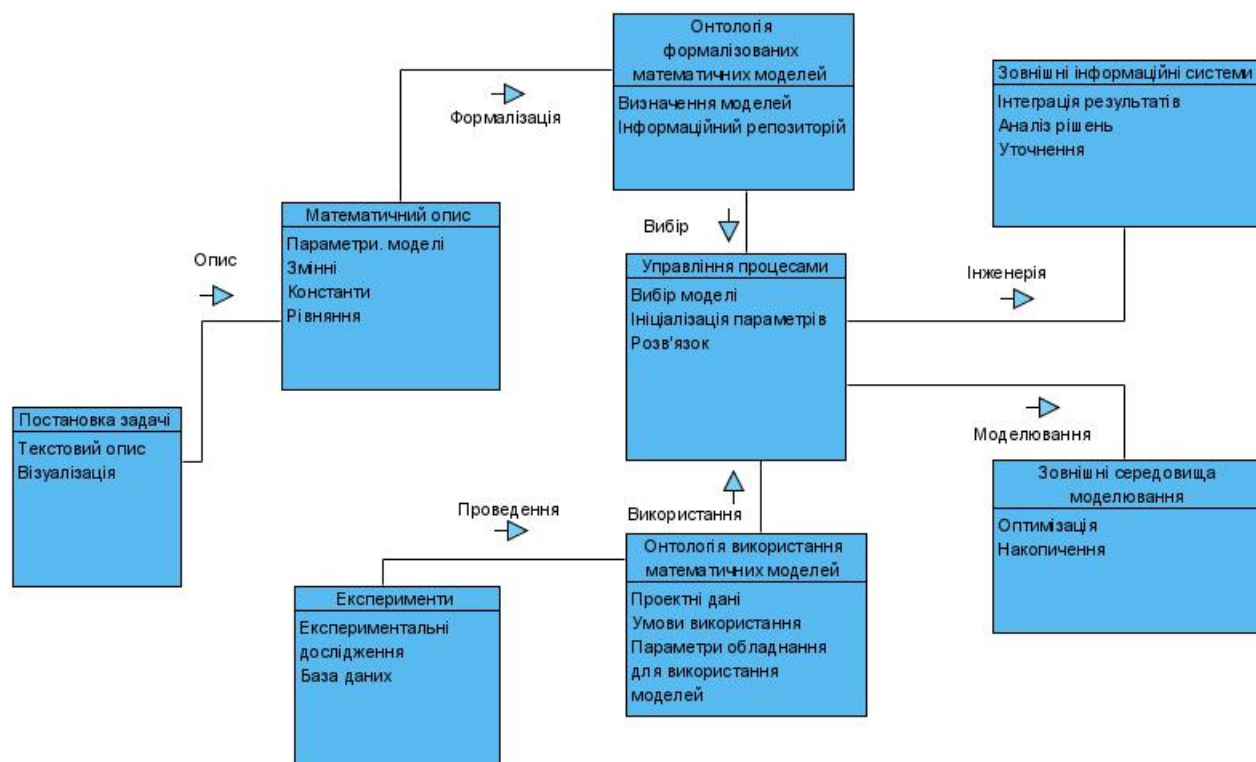


Рисунок 3.1 – Загальна схема реалізації онтологічного підходу для математичного моделювання на основі інтервальних даних

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.

Особливість 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 [42, 99].

Таким чином, процес створення математичних моделей та їх практичне використання стає більш інтуїтивно зрозумілим та орієнтованим на користувача, який не дуже орієнтується в самому процесі моделювання у порівнянні з існуючими підходами. Кожна модель у цьому підході є конкретним екземпляром модельного класу онтології.

Онтологія формалізованих математичних моделей також містить функціональне представлення моделі у вигляді графічної інтерпретації для діагностики неточностей на основі вдосконаленої моделі. На рисунку 3.2 представлено підмножину понять і відношень, які зафіксовані в загальній онтологічній моделі.

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.

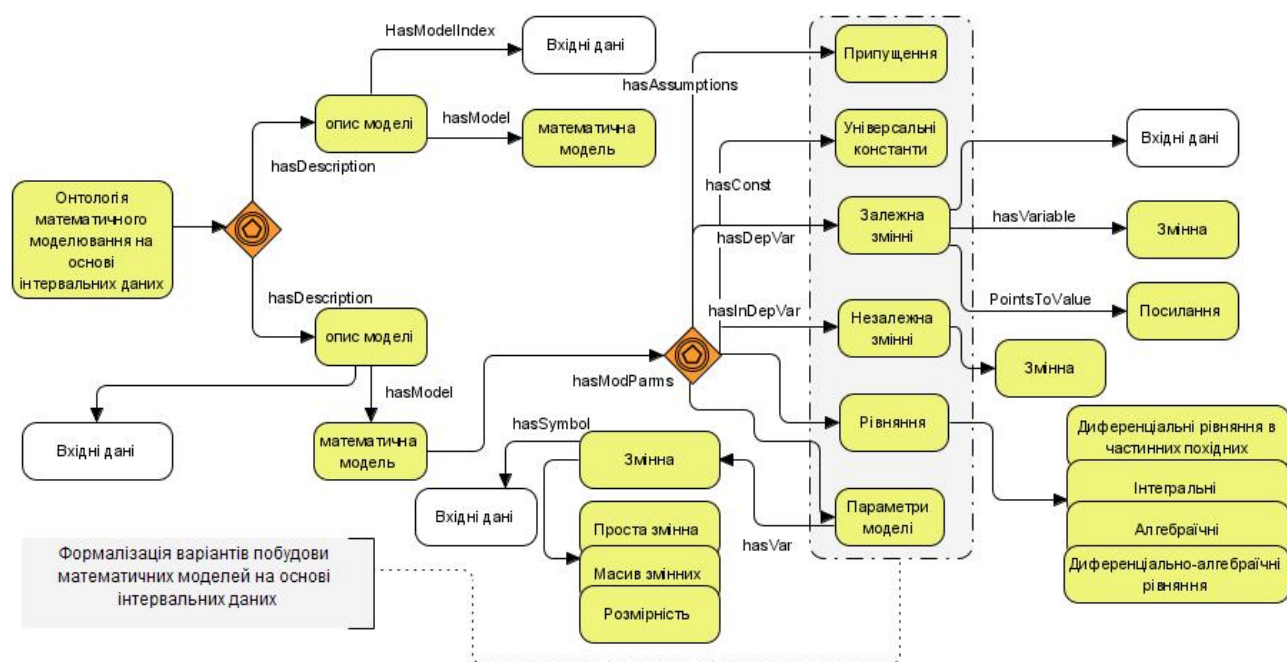


Рисунок 3.2 – Схема опису онтології математичних моделей на основі інтервальних даних

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. Загальна схема такого підходу представлена на рисунку 3.3.

Підсистема управління процесами вибору моделей створює оператори для ініціалізації параметрів моделі з відповідними значеннями, створює асоціації між змінними індексами та

величини, для яких він позначається, ініціалізує універсальні константи, збирає фактичні команди розв'язку моделі та знаходить відповідний розв'язок множини рівнянь.

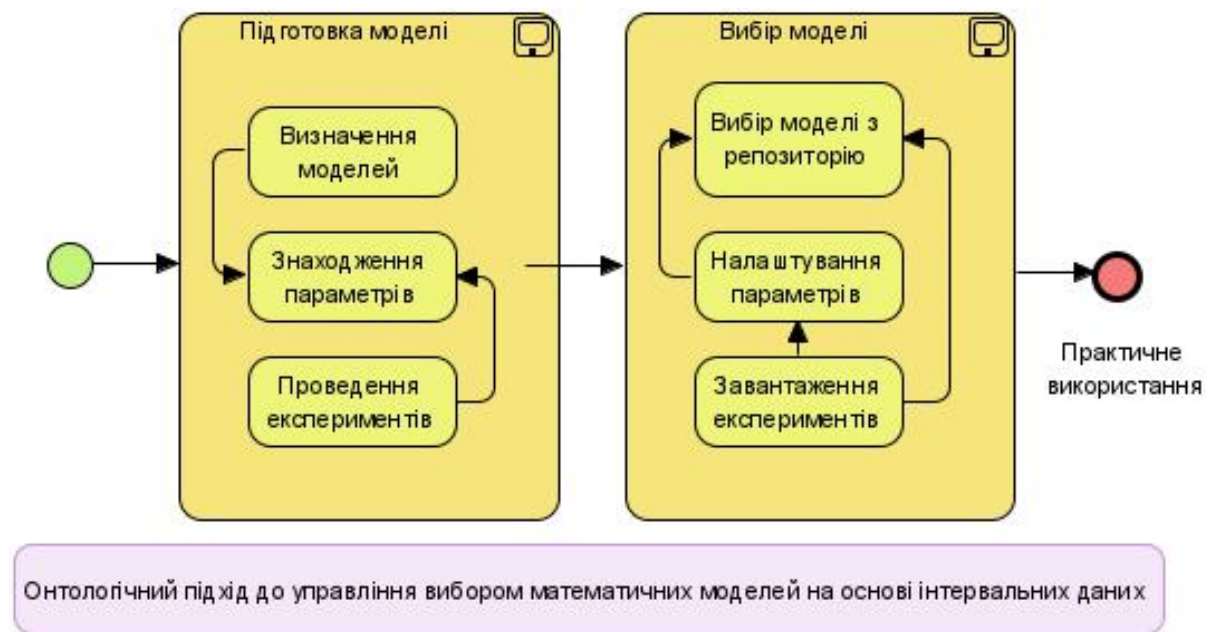


Рисунок 3.3 – Схема опису онтології математичних моделей на основі інтервальних даних

Такий програмно-інтерпретований онтологічний підхід надає нам багато корисних функцій, включаючи можливість символічної обробки, яка безпосередньо обробляє рівняння у різних форматах та розширюється можливістю сучасних мов програмування, таких як Java.

Графічний інтерфейс користувача використовується для відображення результатів розв'язування (графіків або виразів) разом із збереженням повертається до онтології використання математичних моделей, а також використовується для вибору найкращого екземпляра моделі, яку необхідно розв'язати і яка найкраще підійде до

використання в тій чи іншій практичній ситуації. Також можна змоделювати перебіг виконання тих чи інших операцій, що досить зручно для прийняття відповідних рішень.

3.2. Формалізоване представлення онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних

На основі аналізу структури математичних моделей на основі інтервальних даних, процесу моделювання та особливостей проведення експериментів, математичну модель Mm з точки зору онтологічного підходу можна формалізувати за допомогою наступних структур [42, 157]:

$$Mm = \langle Ma, Mi, Mo, Par, Mr, Mc, Mmt \rangle \quad (3.1)$$

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.

$$Ma = \langle IdMa, NmMa \rangle, \quad (3.2)$$

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

Описи математичної моделі мають наступну структуру:

$$Mi = \langle IdMi, NmMi, IdMa \rangle, \quad (3.3)$$

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

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

$$Mo = \langle IdMo, NmMo, IdMa, IdMi \rangle, \quad (3.4)$$

де $IdMo$ – ідентифікатор об'єкта; $NmMo$ – інформація, що описує структуру об'єкта використання моделі.

Опис кортежу набору параметрів можна представити за допомогою наступного відношення:

$$Par = \langle IdPar, PT, PV, IdMa, IdMi, IdMo \rangle, \quad (3.5)$$

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

Представлення результатів побудови моделей об'єктів виглядає наступним чином:

$$Mr = \langle IdMr, RNm, IdMa, IdMi, IdMo \rangle, \quad (3.6)$$

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

Характеристики опису експериментів представлені наступним відношенням:

$$Mc = \langle IdMc, MA, Dsc, IdMa, NA, IdMo, IdMi, IdPar \rangle, \quad (3.7)$$

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

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

$$SuMth = \langle IdMmt, NmMth, Ac, IdMth \rangle, \quad (3.8)$$

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

$$Mth = \langle IdMth, NmMth, Ac \rangle, \quad (3.9)$$

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

Приклад реалізації онтологічного підходу для побудови моделей полів концентрацій шкідливих викидів у приземистому шарі атмосфери в умовах великих похибок спостережень у середовищі SmartOntologyModeller наведено на рисунку 3.4.

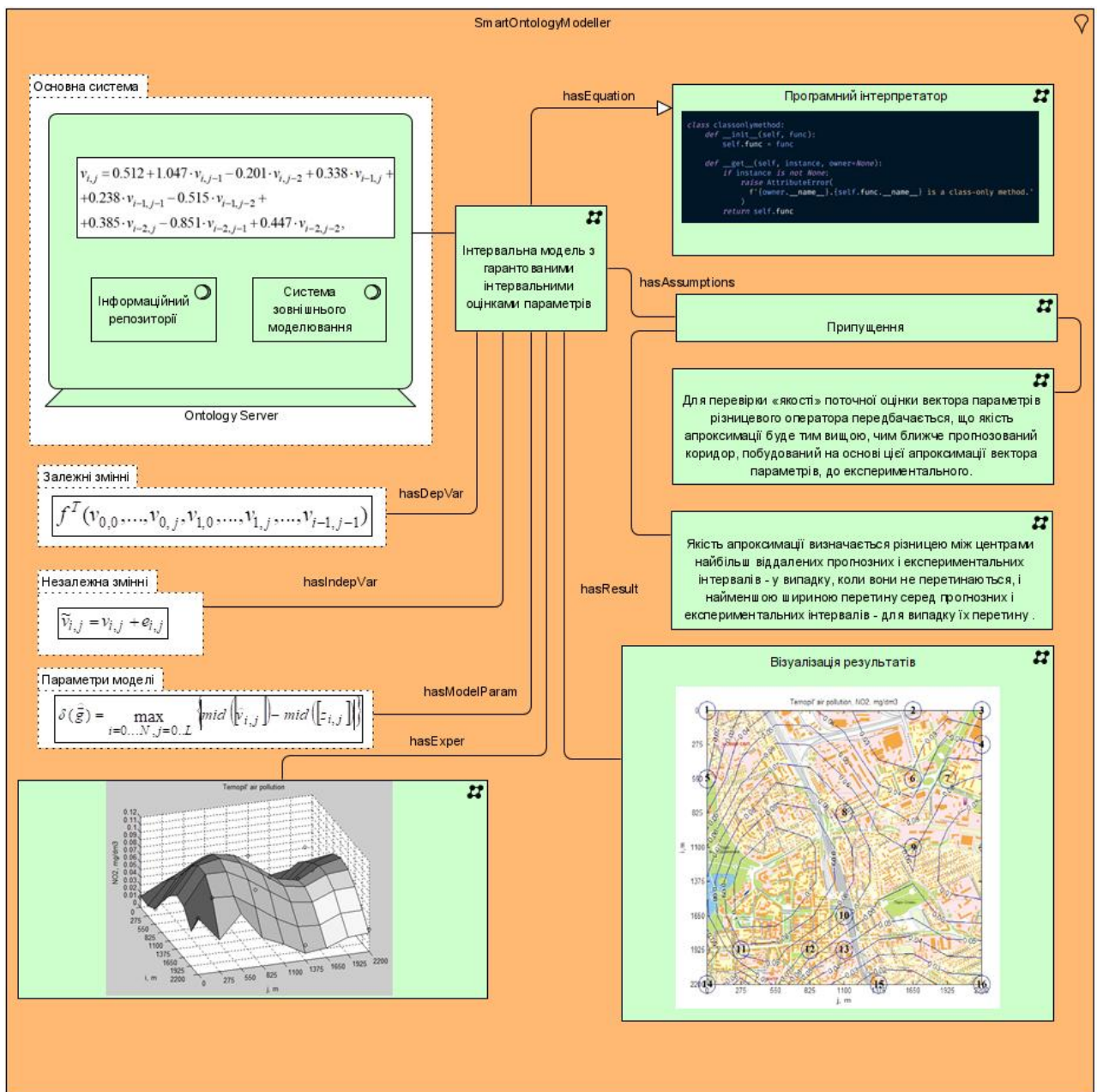


Рисунок 3.4 – Схема опису онтології математичних моделей на основі інтервальних даних

Схема формалізації математичної моделі за допомогою розробленого інструменту SmartOntologyModeller відображає основні структурні компоненти в рамках запропонованого онтологічного підходу [42, 159, 160, 162]. Як бачимо, інформаційне сховище з формалізованим описом моделі та зовнішнім середовищем моделювання, яке описує використання програмно-реалізованих моделей (в даному випадку інтервальної моделі з гарантованими інтервальними оцінками параметрів) транслюється в індексне представлення та зберігається в атрибут *Схема формалізації математичної моделі за допомогою розробленого інструменту SmartOntologyModeller* відображає основні структурні компоненти в рамках запропонованого онтологічного підходу. Як бачимо, інформаційне сховище з формалізованим описом моделі та зовнішнім середовищем моделювання, яке описує використання програмно реалізованих моделей (в даному випадку інтервальної моделі з гарантованими інтервальними оцінками параметрів) транслюється в індексне представлення та зберігається в атрибут *HasEquation*. Діаграма показує залежні, незалежні змінні та параметри, які об'єднані для представлення структури інтервальної моделі з гарантованими інтервальними оцінками параметрів. У правій частині діаграми формалізовано процес використання припущень для реалізації методів, умови експериментів, рекомендації щодо використання методів та візуалізації результатів моделювання. Діаграма також показує залежні, незалежні змінні та параметри, які об'єднані для представлення структури інтервальної

моделі з гарантованими інтервальними оцінками параметрів. У правій частині діаграми формалізовано процес використання припущень для реалізації методів, умови експериментів, рекомендації щодо використання методів та візуалізації результатів моделювання.

3.3. Гібридний метод ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів

Виходячи із формалізації математичних моделей та схеми їх використання, яка представлена в параграфі 3.2 пропонується гібридний метод ідентифікації інтервальних дискретних моделей складних об'єктів в рамках онтологічного підходу, який ґрунтується на виборі математичної моделі з репозиторію в залежності специфіки предметної області, умов проведення експериментів та результируючих ознак [39, 41, 42, 157].

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.

Як варіант використання наведеного онтологічного опису розглянемо метод вибору математичної моделі для моделювання на основі інтервальних даних.

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:

$$Mo_C = \pi_{IdMo, NmMo}(\sigma_{Mo(Idma)=IdMa_C \wedge Mo(IdMi)=IdMi_C}(\tau(Mo))), \quad (3.10)$$

де π – операція проєкції алгебри кортежів, σ – операція вибірки з множини за заданими атрибутами та умовами, τ – 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

$$Mc_C = \pi_{IdMc, Dsc, IdPar} \left(\sigma_{\substack{Mc(Idma)=IdMa_C \wedge Mc(IdMi)= \\ =IdMi_C \wedge Mc(IdMo)=IdMo_C}}(Mc) \right). \quad (3.11)$$

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

$$Mi_C = \pi_{IdMi, IdMc, NmMi} \left(\sigma_{Mi(IdMa)=IdMa_C \wedge Mc(IdMc)}(\tau(Mi)) \right). \quad (3.12)$$

5) Щоб вибрати Mi_C і Mb_C , формується набір, який представляє результати побудови об'єктних моделей за допомогою наступного опису:

$$Mr_C = \pi_{IdMr, RNm} \left(\sigma_{\substack{Mr(IdMa)=IdMa_C \wedge Mr(IdMi)= \\ =IdMi_C \wedge Mr(IdMo)=IdMo_C}}(\tau(Mr)) \right). \quad (3.13)$$

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

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

$$Mc_C = \pi_{IdMc, Dsc, IdPar} \left(\sigma_{\substack{Mc(IdMa)=IdMa_C \wedge Mc(IdMi)= \\ =IdMi_C \wedge Mc(IdMo)=IdMo_C}}(Mc) \right). \quad (3.14)$$

7) Користувач обирає метод ідентифікації структури моделі за наступною процедурою

$$Mmt_C = \pi_{IdMmt, IdMth} \left(\sigma_{\substack{Mmt(IdMa)=IdMa_C \wedge Mmt(IdMi)= \\ =IdPi_C \wedge Mmt(IdMo)=IdMo_C \wedge Mmt(IdPar)=Par_C}}(Mmt) \right). \quad (3.15)$$

8) Визначаємо структуру моделі та відповідну множину параметрів моделі

$$SuMth_C = \pi_{IdMmt,Ac,IdMth} \left(\sigma_{\substack{SuMth(IdMa)=IdMa_C \wedge SuMth(IdMi)= \\ =IdMi_C \wedge SuMth(IdMo)= \\ =IdMo_C \wedge SuMth(IdMth)=IdPar_C}} (\tau(SuMth)) \right). \quad (3.16)$$

$$Par_C = \pi_{IdPar,Ac} \left(\sigma_{\substack{Par(IdMa)=IdMa_C \wedge Par(IdMi)= \\ =IdMi_C \wedge Par(IdMo)=IdMo_C}} (\tau(Par)) \right). \quad (3.17)$$

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:

$$Mr_C = \pi_{IdMr,RNm} \left(\sigma_{\substack{Mr(IdMa)=IdMa_C \wedge Mr(IdMi)= \\ =IdMi_C \wedge Mr(IdMo)=IdMo_C}} (\tau(Mr)) \right). \quad (3.18)$$

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.

3.4. Дослідження особливостей вибору математичної моделі з репозиторію інтервальних моделей

Практична реалізація онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних призводить до формування загальних структурних елементів, виходячи зі специфіки їх використання для конкретної предметної галузі.

У наступному параграфі описано практичну реалізацію програмного забезпечення як одного з варіантів використання розробленого репозиторію модельних експериментів у різних предметних галузях у рамках запропонованого онтологічного підходу.

Як приклад застосування онтологічного підходу розглядається задача побудови моделей полів концентрацій шкідливих викидів у приземистому шарі атмосфери на основі макромоделей у вигляді різницевих операторів, структуру яких необхідно вибрати за умов узгодження з експериментальними даними і при великих помилках у спостереженнях [41, 153, 160].

Теоретичною основою для моделювання процесів розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері є диференціальні рівняння в частинних похідних або відповідні різницеві аналоги. Крім того, через великі похибки спостереження,

межі яких зазвичай відомі, різницеві оператори будуються на основі методів інтервального аналізу даних.

Розглянемо випадок опису поля концентрацій шкідливих викидів речовини в приземистому шарі атмосфери макромоделлю у вигляді різницевого оператора (3.19):

$$v_{(i,j)} = f^T (v_{0,0,\dots,0,\dots}, v_{0,j}, v_{1,j}, \dots, v_{(1,j)}, \dots, v_{i-1,j-1}) \cdot \vec{g}, \quad (3.19)$$

$$i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, L$$

де в нашому випадку $v_{(i,j)}$ – прогнозоване (дійсне) значення концентрації шкідливих речовин у приземистому шарі атмосфери в точці міста з дискретними координатами i, j ; \vec{g} – вектор параметрів різницевого оператора.

Для оцінки вектора параметрів \vec{g} різницевого оператора використаємо результати спостережень концентрації шкідливих речовин для заданих дискретних координат i, j :

$$\tilde{v}_{i,j} = v_{i,j} + e_{i,j}, i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, L. \quad (3.20)$$

де $\tilde{v}_{i,j}$ – виміряне значення концентрації шкідливих речовин у приземистому шарі атмосфери в точці міста з дискретними координатами i, j ; $e_{i,j}$ – випадкові, обмежені помилками амплітуди.

$$\begin{aligned} |e_{1,j}| = |e_{2,j}| = \dots = |e_{i,j}| \leq \Delta_{i,j}, \Delta_{i,j} > 0, \\ \forall i \dots, N, j = 1, \dots, L \end{aligned} \quad (3.21)$$

які в загальному випадку залежать від дискретних значень просторових координат.

За допомогою моделі спостережень (3.20) та з урахуванням обмеження на амплітуду похибки (3.21) оцінки концентрації шкідливих речовин, отримані на основі експериментальних даних, набувають інтервального представлення.

$$\begin{aligned} [z_{(i,j)}^-; z_{(i,j)}^+] = \left[(\tilde{v}_{i,j} - \Delta_{i,j}); (\tilde{v}_{i,j} + \Delta_{i,j}) \right], \\ i \dots, N, j = 1, \dots, L \end{aligned} \quad (3.22)$$

де $[z_{(i,j)}^-; z_{(i,j)}^+]$ – це гарантований інтервал, який включає справжню невідому концентрацію речовини, тобто

$$\begin{aligned} v_{i,j} \in [z_{(i,j)}^-; z_{(i,j)}^+] \\ \forall i = 1 \dots, N, j = 1, \dots, L. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Тоді, підставляючи у вираз (3.19) значення $v_{i,j}$, яке задається різницеvim оператором (3.20), отримують умови узгодження експериментальних значень концентрацій із змодельованими.

$$\begin{aligned} z_{(i,j)}^- \leq f^T(v_{0,0}, \dots, v_{0,k}, v_{1,0}, \dots, v_{(1,j)}, \dots, v_{i,j}) \cdot \vec{g} \leq z_{(i,j)}^+ \\ i = 1 \dots, N, j = 1, \dots, L. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Далі, згідно з запропонованим у розділі 1 методом, необхідно вирішити задачу структурно-параметричної ідентифікації моделі за допомогою процедур у поведінкових моделях бджолиної колонії.

Одна з вихідних структур, сформованих на основі онтологічного опису, має такий вигляд:

$$v_{i,j} = g_1 + g_2 \cdot v_{i-1,j} + g_3 \cdot v_{i,j-1} + g_4 \cdot v_{i-1,j-1}. \quad (3.25)$$

В результаті розв'язання задачі структурно-параметричної ідентифікації отримано різницевий оператор, що описує розподіл концентрацій діоксиду азоту:

$$v_{i,j} = 0.512 + 1.047 \cdot v_{i,j-1} - 0.201 \cdot v_{i,j-2} + 0.338 \cdot v_{i-1,j} + 0.238 \cdot v_{i-1,j-1} - \\ - 0.515 \cdot v_{i-1,j-2} + 0.385 \cdot v_{i-2,j} - 0.851 \cdot v_{i-2,j-1} + 0.447 \cdot v_{i-2,j-2}. \quad (3.26)$$

Отримані таким чином математичні моделі зберігаються в репозиторії. Якщо змінюється об'єкт, то в цілому схема ідентифікації залишається незмінною.

У репозиторії інтервальних математичних моделей знаходяться екземпляри не тільки для прогнозування просторового розподілу концентрацій діоксиду азоту для різних умов, а й для прогнозування динаміки цієї шкідливої речовини або отриманої математичної моделі динаміки оксиду вуглецю для різних умов. Однак для їх ефективного використання необхідно отримати коректний онтологічний опис [42, 157, 160].

На основі розробленого методу онтологічного опису математичного моделювання об'єктів із застосуванням інтервальних даних програмно реалізовано особливості наповнення онтології. Деякі результати такого опису наведено на рисунках 3.5-3.7.

Зокрема, на рисунку 3.5 представлено приклад пошуку математичної моделі прогнозування динаміки добового циклу зміни концентрації оксиду вуглецю в репозиторії інтервальних математичних моделей в середовищі SmartOntologyModeller.

The screenshot shows the SmartOntologyModeller interface. At the top, there is a search bar with the text "Інтервальні моделі" and a dropdown menu for "Репозиторій мод...". On the left, there is a sidebar with various actions like "Очистити вибір моделей", "Відкрити", "Зберегти", etc. The main area displays a table with columns: "Атрибут", "Опис", and "Значення".

Атрибут	Опис	Значення
<i>Ma</i>	предметна область	Шкідливі викиди Забруднення атмосфери Викиди транспортних засобів
<i>Mi</i>	описи математичної моделі	$[\hat{v}_j^-, \hat{v}_j^+] = \hat{g}_1 \cdot [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+] + \hat{g}_2 \cdot ([\hat{v}_{k-2}^-, \hat{v}_{k-2}^+] - [\hat{v}_{k-1}^-, \hat{v}_{k-1}^+])$ $[\hat{v}_0^-, \hat{v}_0^+] \in [52,25; 57,75], [\hat{v}_1^-, \hat{v}_1^+] \in [44,65; 49,35],$ $\hat{g}_1 = 0,8897; \hat{g}_2 = -0,0261.$
<i>Mo</i>	набір характеристик об'єкта	розподіл концентрації оксиду вуглецю пряма ділянка вулиці рівномірний транспортний потік постійна емісійна здатність
<i>Attr</i>	набір параметрів	\hat{v}_k^- – концентрація CO в k момент часу x_k це відстань u_k – це інтенсивність транспортних потоків z_k є вимірною концентрацією $[v_k] = [v_k^-, v_k^+]$ – інтервальні значення концентрації оксиду вуглецю
<i>Mr</i>	множина можливих результатів	прогнозована динаміка добового циклу зміни концентрації оксиду вуглецю концентрація оксиду вуглецю в межах похибок спостереження набір інтервальних моделей процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту
<i>Mc</i>	множина характеристик експериментів	похибка вимірювання концентрації оксиду вуглецю 25% добовий цикл концентрації шкідливих викидів автотранспорту зміна інтенсивності транспортних потоків
<i>Mmt</i>	множина методів ідентифікації	ідентифікація за допомогою процедури випадкового пошуку з лінійною тактикою ідентифікація з процедурою випадкового пошуку за найкращою спробою ідентифікація за допомогою процедури випадкового пошуку за допомогою напрямного конуса ідентифікація за допомогою процедури випадкового пошуку з адаптацією розподілу випадкового кроку ідентифікація на основі моделі поведінки бджолиної сім'ї

At the bottom of the table, there are two buttons: "Моделі" and "Підключення до репозиторію". Below the table, there is a pagination indicator: "6/6".

Рисунок 3.5 – Математична модель прогнозування динаміки добового циклу зміни концентрації оксиду вуглецю в репозиторії

На рисунку 3.6 представлено приклад пошуку математичної моделі динаміки концентрацій діоксиду азоту в репозиторії інтервальних математичних моделей в середовищі SmartOntologyModeller.

SmartOntologyModeller Інтервальні моделі Репозиторій мод...

- ✕ Очистити вибір моделей
- 🔍 Відкрити
- 💾 Зберегти
- 🔗 Підключитися до середовища моделювання
- 📄 Експортувати опис моделі
- ⬇️ Завантажити як
- 🖨️ Попередній перегляд
- 🔄 Вибір моделі
- ⚙️ Налаштування репозиторію
- ❓ Допомога & Зв'язок
- 🏠 Увійти

Атрибут	Опис	Значення
Ma	предметна область	Шкідливі викиди
		Забруднення атмосфери
		Викиди транспортних засобів
Mi	описи математичної моделі	$\hat{v}_k = 0,0149 - 0,5788\hat{v}_{k-2} + 0,7425\hat{v}_{k-3} + 0,046\hat{v}_{k-1}/\hat{v}_{k-4}, k=4,\dots,18$
		$\hat{v}_k = 0,124 - 0,5764\hat{v}_{k-2} + 0,7078\hat{v}_{k-3} + 0,0473\hat{v}_{k-1}/\hat{v}_{k-4} + 0,0159\hat{v}_{k-1}\hat{v}_{k-2}/\hat{v}_{k-1}, k=4,\dots,18$
		$\hat{v}_k = 0,0226 - 0,6114\hat{v}_{k-2} + 0,7781\hat{v}_{k-3} + 0,037\hat{v}_{k-1}/\hat{v}_{k-4} + 0,0282\hat{v}_{k-1}\hat{v}_{k-4}/\hat{v}_{k-2}, k=4,\dots,18$
Mo	набір характеристик об'єкта	динаміка концентрацій діоксиду азоту
		рівномірна інтенсивність транспортних потоків
		пряма ділянка вулиці
Attr	набір параметрів	\hat{v}_k – концентрацією NO ₂ в момент часу k
		u_k – це інтенсивність транспортних потоків
		x_k це відстань
Mr	множина можливих результатів	інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту
		інтервали вимірних значень концентрацій діоксиду азоту
		інтервальна модель з більш простою структурою
Mc	множина характеристик експериментів	похибка вимірювання концентрацій діоксиду азоту 15%
		контролювати інтенсивність транспортних потоків
		рівномірний період вимірювань

Моделі
Підключення до репозиторію

⏪ ⏩ 5/6 ⏪ ⏩

Рисунок 3.6 – Математична модель прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту для прямої ділянки вулиці

На рисунку 3.7 представлено приклад пошуку математичної моделі динаміки концентрацій діоксиду азоту для центральної частини міста в репозиторії інтервальних математичних моделей в середовищі SmartOntologyModeller. Для реалізації цього пошуку програмно реалізовано відповідні форми, які також містять

можливості формування відповідних логічних операцій, які в комплексі дозволяють будувати складні пошукові запити.

Зміна набору характеристик об'єкта при інших зафіксованих значеннях атрибутів дозволяє більш точно вибрати необхідну модель із репозиторію інтервальних математичних моделей, відповідні результати відображені на рисунках 3.6 та 3.7, де в якості змінюваних характеристик об'єкта обрано зміну властивостей спостережуваних ділянок вулиці.

SmartOntologyModeller Інтервальні моделі Репозиторій мод...

Атрибут	Опис	Значення
<i>Ma</i>	предметна область	Шкідливі викиди
		Забруднення атмосфери
		Викиди транспортних засобів
<i>Mi</i>	описи математичної моделі	$v_{i,j} = 0.512 + 1.047 \cdot v_{i,j-1} - 0.201 \cdot v_{i,j-2} + 0.338 \cdot v_{i-1,j} + 0.238 \cdot v_{i-1,j-1} - 0.515 \cdot v_{i-1,j-2} + 0.385 \cdot v_{i-2,j} - 0.851 \cdot v_{i-2,j-1} + 0.447 \cdot v_{i-2,j-2}$
<i>Mo</i>	набір характеристик об'єкта	розподіл концентрацій діоксиду азоту
		рівномірна інтенсивність транспортних потоків
		центральна частина міста
<i>Attr</i>	набір параметрів	\hat{v}_k^- є концентрацією NO ₂ в точці з дискретними координатами i, j x_k це відстань
<i>Mr</i>	множина можливих результатів	інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту
		інтервали виміряних значень концентрацій діоксиду азоту
		інтервальна модель з більш простою структурою
<i>Mc</i>	множина характеристик експериментів	похибка вимірювання концентрацій діоксиду азоту 15%
		рівномірний період вимірювань

Моделі Підключення до репозиторію

4 / 6

Рисунок 3.7 – Математична модель прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту для центральної частини міста

На основі методу вибору математичної моделі в рамках онтологічного підходу для моделювання на основі інтервальних даних можливе перемикання моделей з інформаційного сховища в залежності від умов і специфіки відповідних експериментальних досліджень. Можливість контролювати процес перемикання була практично реалізована в веб-орієнтованій інформаційній системі SmartOntologyModeller. Розглянемо детальніше послідовність вибору математичної моделі з репозиторію.

На рисунках 3.5-3.7 результуюча таблиця містить три колонки, які відповідають опису онтологічної моделі, а саме: “Атрибут”, “Опис”, “Значення”. Ці структурні елементи являють собою: предметну область, об’єкт, умови моделювання (дві групи умов), змінні тощо. Також для зазначених умов застосування існує репозиторій моделей (на рисунках наведено 3 таких моделі).

Таким чином, маючи сховище для зазначеного об’єкта (концентрації шкідливих викидів у приземистому шарі атмосфери), можна застосувати перші п’ять кроків описаного вище методу вибору математичної моделі для моделювання на основі інтервальних даних:

Крок 1. Вибір предметної області: *IdMa_C* – «забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами автотранспорту».

Крок 2. Вибір об’єкта моделювання *Mo_C* – «концентрація викидів діоксиду азоту від транспортних засобів».

Крок 3. Вибір умов для застосування моделі M_{s_C} – «похибка вимірювання концентрації діоксиду азоту на рівні 15%; контроль інтенсивності руху; рівномірний період вимірювань».

Крок 4. Вибір моделі з репозиторію для апроксимації полів концентрацій викидів діоксиду азоту від автотранспорту м. Тернопіль з урахуванням результатів, отриманих на попередніх кроках представлено на рисунку 3.8.

The screenshot shows the SmartOntologyModeller interface. At the top, there is a navigation bar with the text "SmartOntologyModeller" and "Інтервальні моделі". To the right, there is a dropdown menu labeled "Репозиторій мод...". On the left side, there is a sidebar with four menu items: "Очистити вибір моделей", "Відкрити", "Зберегти", and "Підключитися до середовища моделюва". The main area displays a table with three columns: "Атрибут", "Опис", and "Значення". The table contains one row with the following data:

Атрибут	Опис	Значення
M_i	описи математичної моделі	$v_{i,j} = 0.512 + 1.047 \cdot v_{i,j-1} - 0.201 \cdot v_{i,j-2} + 0.338 \cdot v_{i-1,j} + 0.238 \cdot v_{i-1,j-1} - 0.515 \cdot v_{i-1,j-2} + 0.385 \cdot v_{i-2,j} - 0.851 \cdot v_{i-2,j-1} + 0.447 \cdot v_{i-2,j-2}$

Below the table, there is a green button labeled "Моделі".

Рисунок 3.8 – Результат вибору математичної моделі для апроксимації полів концентрацій викидів діоксиду азоту від автотранспорту

Крок 5. Для отриманої моделі також можна отримати табличні та візуальні результати її використання з репозиторію. Наприклад, у таблиці на рисунку 3.9 порівнюються результати прогнозування концентрації діоксиду азоту та вимірянні результати в контрольних точках.

На рисунку 3.10 наведено приклад перемикання шляхом вибору математичної моделі на основі інтервальних даних в залежності від зміни предметних характеристик моделі. Перемикання відбувається шляхом зміни умов середовища моделювання.

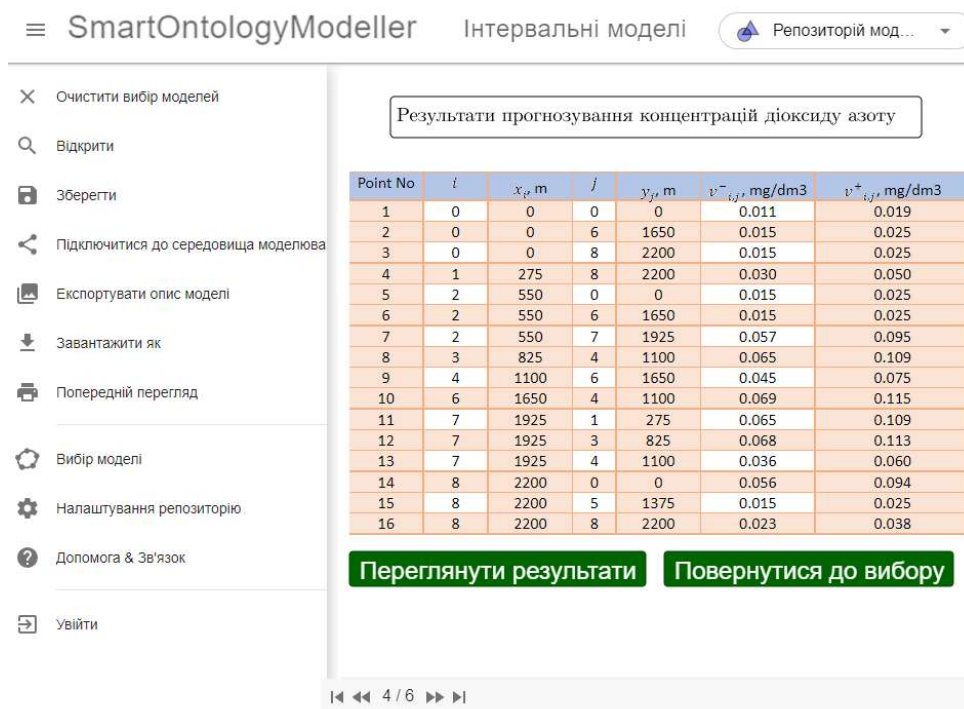


Рисунок 3.9 – Перегляд результатів прогнозування концентрацій діоксиду азоту в контрольних точках

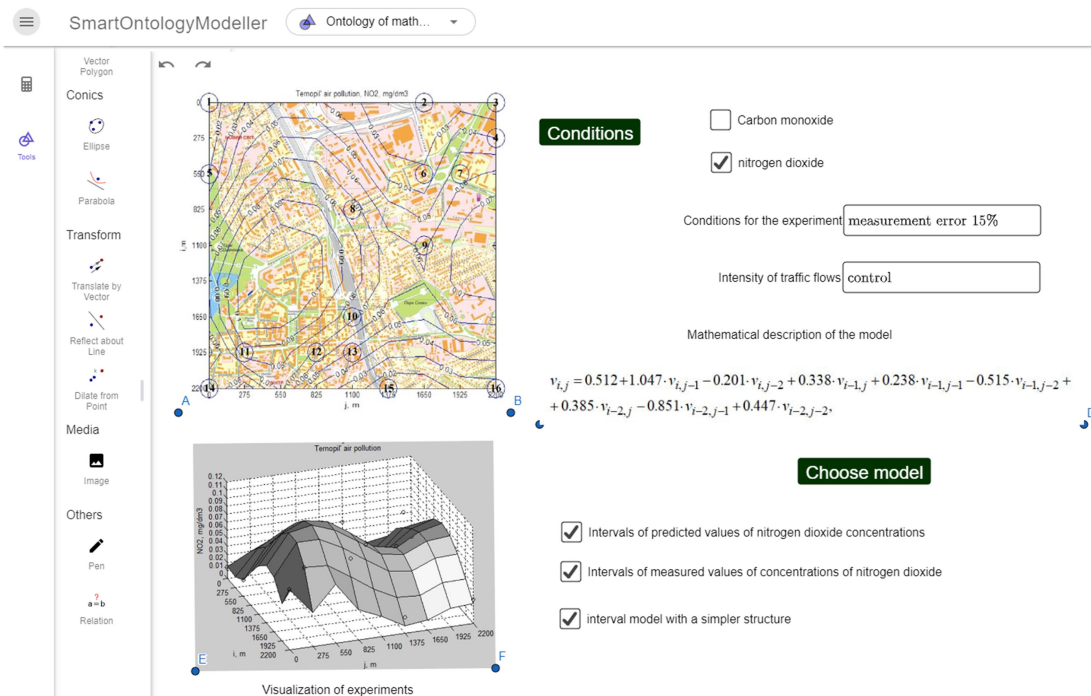


Рисунок 3.10 – Приклад «перемикання» при виборі математичної моделі в залежності від зміни контрольних характеристик та умов проведення експериментів у середовищі SmartOntologyModeller.

Слід зазначити, що у випадку виконання іншої задачі, наприклад, моделювання динаміки концентрацій шкідливих викидів оксиду вуглецю протягом доби в певному районі міста та наявного сховища цих моделей, схема застосування методу вибору математична модель для моделювання на основі інтервальних даних буде такою ж. Однак на п'ятому кроці результати будуть представлені адекватно обраному об'єкту.

Точність моделі динаміки забруднення атмосфери автотранспортом характеризується точністю вимірювального експерименту. При зміні умов експерименту може змінитися і точність моделі. Перевагою запропонованого підходу є економія ресурсів, яка досягається за рахунок повторного використання розробленої моделі сховища для відповідних об'єктів з репозиторію.

На рисунку 3.11 наведені результати відповідного перемикання, пов'язані зі зміною умов відстеження транспортних потоків та за характеристиками досліджуваної ділянки вулиці.

Інстальований набір інструментів Python дозволяє користувачеві вибрати зразок моделі та відповідний операційний приклад, після чого оператори можуть будувати за допомогою відповідних бібліотек, які інтерпретують рівняння з відформатованих, індексованих частин, ініціалізують параметри моделі на основі відповідного зразка операції, і, нарешті, дозволити моделі створити необхідне рішення.

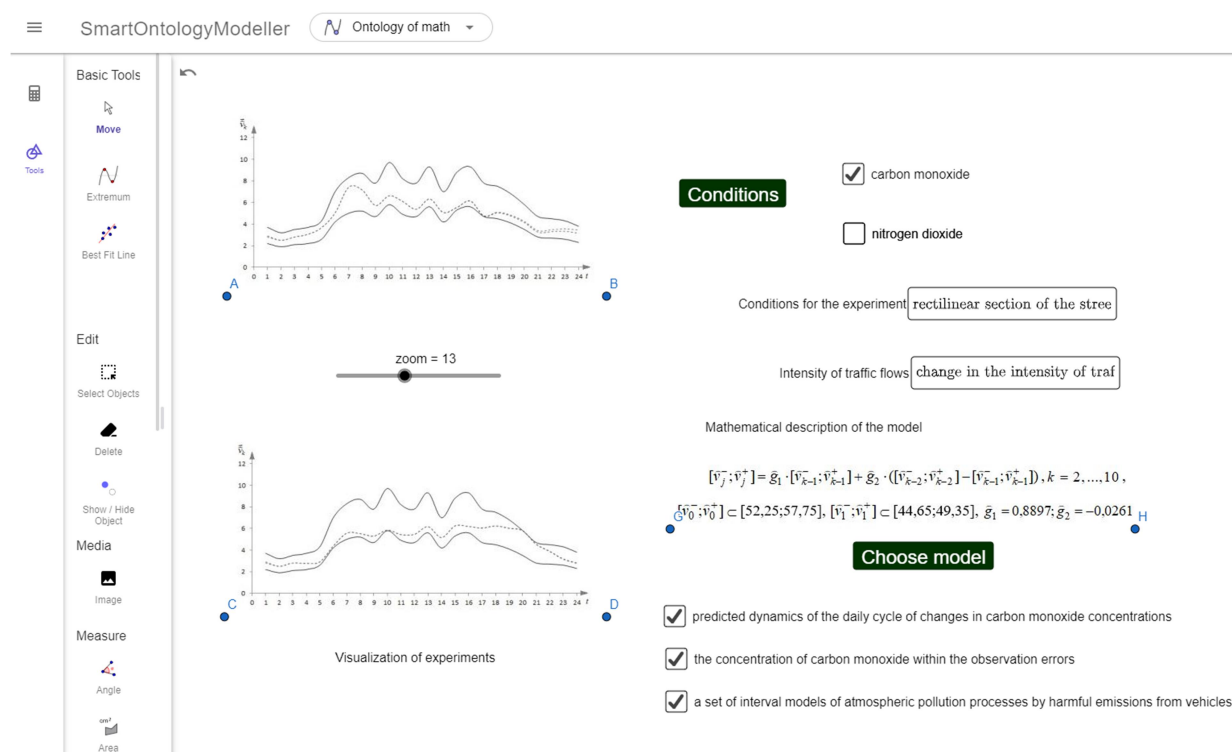


Рисунок 3.11 – Приклад «перемикання» при виборі математичної моделі внаслідок зміни умов середовища моделювання або умов відповідного експерименту

Результати обчислень інтерпретуються у відповідному графічному інтерфейсі за допомогою графіків, таблиць, результуючих файлів, а також інших результатів, які зберігаються в операційній частині математичної моделі з відповідними уточненнями. Таке доопрацювання дозволяє підбирати математичні моделі залежно від специфіки умов експериментів та відповідної предметної області.

Очевидно, що у порівнянні з відомими методами структурної ідентифікації, розроблений метод структурної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів є суттєво ефективніший (рисунок 3.12).

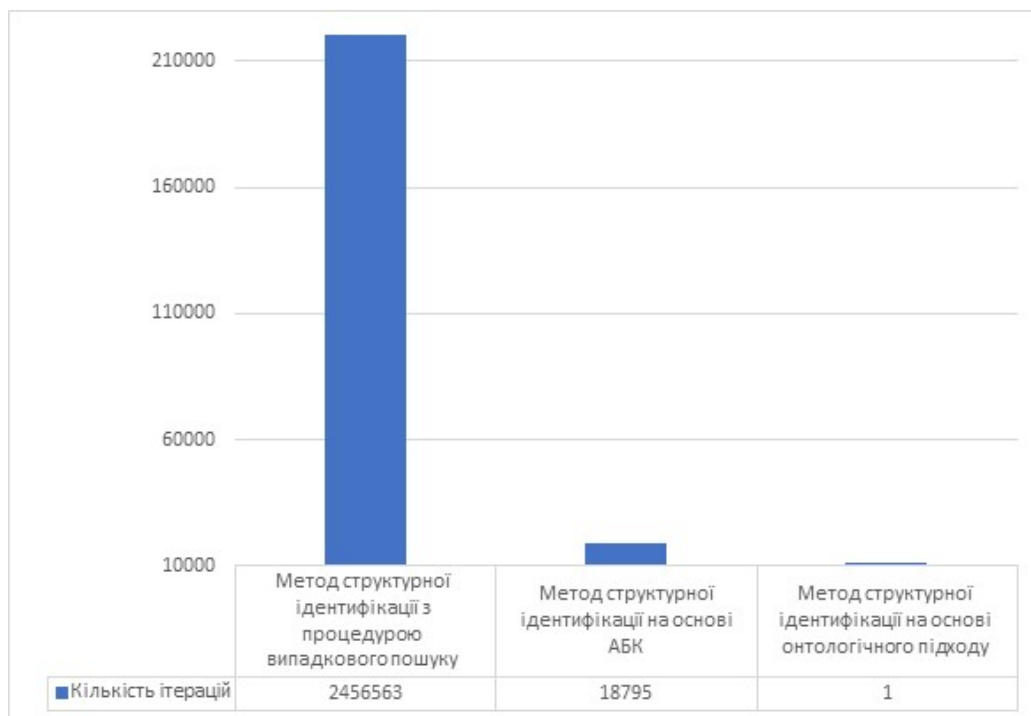


Рисунок 3.12 – Результати порівняння обчислювальної складності реалізації методу структурної ідентифікації математичної моделі динаміки забруднення атмосфери автотранспортом

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

3.5. Дослідження особливостей виділення нелінійного елемента математичної моделі з репозиторію інтервальних моделей

Проблемою застосування підходу, який представлений у першому розділі є складність використання побудованої інтервальної моделі у випадку інших умов середовища. Наприклад, у репозиторії представлено

застосування зазначеного методу для побудови моделі поширення забруднень шкідливих викидів автотранспорту із використанням моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів NO₂ (діоксид азоту) на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича, м. Тернопіль. Результати експериментів показали, що побудована модель динаміки концентрацій діоксиду азоту не є універсальною, тобто не може бути використана для моделювання в інших точках міста, а бо 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.

Таким чином, для підвищення прогностичних властивостей моделей пропонується модифікувати вищеописаний підхід із використанням нелінійного елемента в моделі, який виконує функцію перемикача для обрання адекватної моделі, в залежності від умов її застосування [48, 248, 250].

На рисунку 3.13 представлено схему взаємодії між зовнішніми інформаційними системами, середовищем моделювання, інформаційним репозиторієм та онтологічно-керованою підсистемою.

В інформаційному репозиторії зберігається база раніше розроблених 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 моделей).

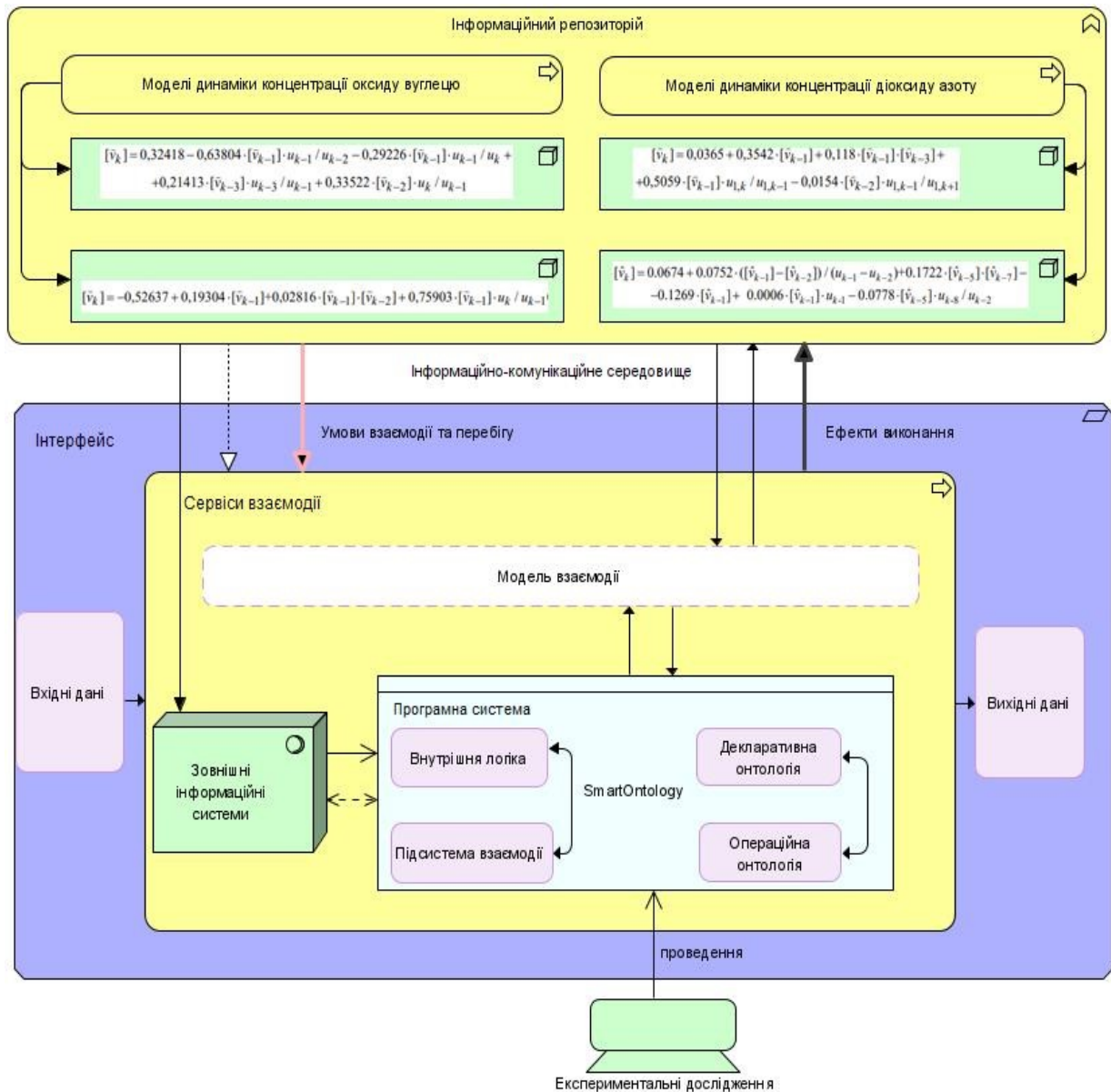


Рисунок 3.13 – Схема реалізації взаємодії онтологічно-керованої системи із зовнішніми інформаційними системами та відповідним інформаційним репозиторієм

Програмна онтологічно-керована система SmartOntologyModeller містить реалізацію декларативної та операційної онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу, а також

включає підсистему взаємодії із зовнішніми інформаційними системами та підсистему комунікації з інформаційними репозиторієм з метою повторного використання математичних моделей та побудову нових.

Модель взаємодії програмних підсистем слугує для отримання інформації про принципи взаємодії, які виникають в процесі операції побудови та використання математичних моделей. Сюди відносять інформацію про протоколи взаємодії, структуру пакетів для обміну даними та правила управління відповідним обміном.

Важливим елементом у цьому підході є онтологічна модель предметної області, яка враховує різні умови застосування інтервальних моделей. Розглянемо цей підхід детальніше.

Онтологічно-керована система інтерпретує знання, які отримані в процесі використання інтервальних математичних моделей. Ці знання можна розділити на декларативну та процедурну частини.

Декларативна частина складається з інформації, яка необхідна для обчислювальних процедур побудови моделі, інформації отриманої з моделі та відповідні рівняння моделі.

Процедурна частина складається з деталізованих особливостей моделі, відповідних використовуваних методів та алгоритмів пошуку розв'язків, ініціалізації змінних та їх відповідна інтерпретація.

Онтологічний підхід, забезпечує побудову моделі представлення предметної області, та слугує своєрідним нелінійним елементом інтервальної дискретної моделі, побудованої на основі

аналізу інтервальних даних для розширення сфери застосування простіших моделей у певній предметній області.

Як зазначалося вище, для покращення прогностичних властивостей моделей, достатньої для прийняття рішень, поряд із методами управління вибором моделей із інформаційного репозиторію, пропонується модифікувати онтологічний підхід із використанням нелінійного елемента в моделі. Такий елемент слугуватиме засобом перемикання в процесі вибору адекватної математичної моделі в залежності від умов її застосування.

На рисунку 3.14 представлено схему виділення нелінійного елемента математичної моделі із врахуванням основних його особливостей. Розглянемо ці особливості більш детально.

Процес виділення нелінійного елемента повинен знаходитися в домені основних його характеристик та характеристик математичної моделі. До основних характеристик самого нелінійного елемента необхідно віднести:

- формуючі параметри, які можуть містити як вхідні, так і вихідні дані та які можна отримувати як і з інформаційного репозиторію, так і в процесі взаємодії із зовнішніми інформаційними системами;
- гіпотези, які описують основні варіанти використання обраного нелінійного параметра, а також інші специфічні припущення;
- об'єкти, які дозволяють виділити основні властивості досліджуваних характеристик та сформувані основні цілі його впливу;
- дії, які визначають можливий набір операцій використання елемента;

– платформа, яка характеризує набір програмного забезпечення, яке можна використовувати в процесі імплементації математичної моделі;

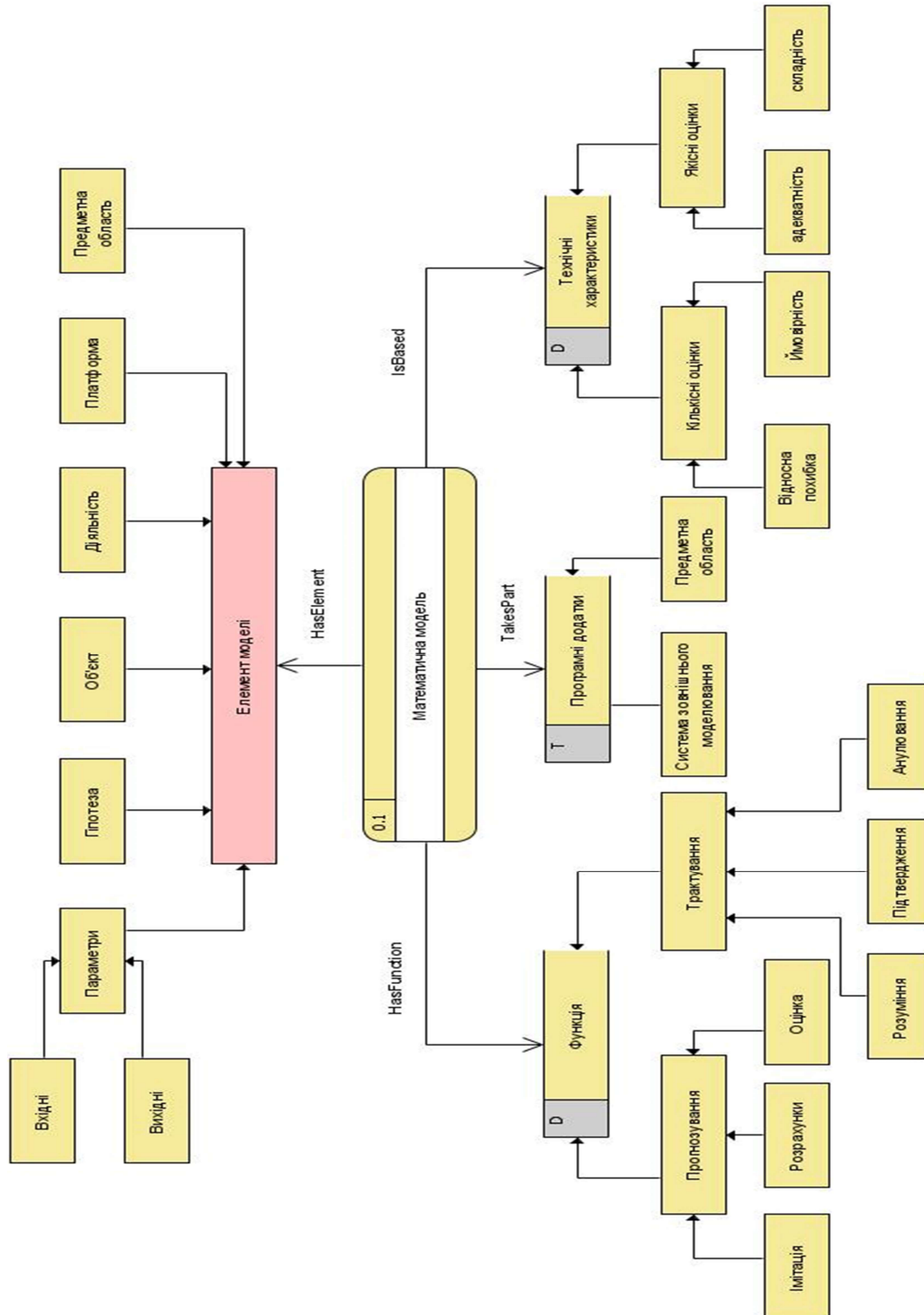


Рисунок 3.14 – Схема виділення нелінійного елемента інтервальної математичної моделі із врахуванням основних його особливостей та особливостей моделі

- предметна область, яка характеризує сукупність пов'язаних між собою функцій, засобів управління, що розглядається в межах певного контексту.

До основних характеристик математичної моделі на основі інтервального підходу, які б корелювали з характеристиками виділеного нелінійного елемента необхідно віднести такі:

- функції, які поряд із реалізацією виконання загально прийнятих математичних обчислень включають реалізацію основних процесів опису математичної моделі. Тут також необхідно враховувати ступінь осмислення та розуміння функцій, які враховуються на етапі вибору можливих варіантів використання.

- використання, яке дозволяє описати та оцінити основні особливості, які стосуються певної предметної області та зовнішніх інформаційних систем, в тому числі і зовнішніх середовищ моделювання;

- технічні характеристики, які включають кількісні (похибка, ймовірність) та якісні (точність, адекватність, складність) оцінки моделей в процесі їх побудови та практичного використання.

Дуже важливим етапом виокремлення нелінійного елемента інтервальної дискретної моделі є процес його узгодження, як окремого об'єкта з притаманними йому характеристиками та самої математичної моделі, яка має власну множину відповідних характеристик.

Такий процес можна формалізувати на основі відповідних описів онтологічної моделі предметної області та онтологічного підходу для моделювання на основі інтервальних даних. Правила та оператори узгодженості згаданих характеристик можна описати на основі операцій класичної алгебри кортежів.

Іншою 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 ідентифікації іншої моделі, або сформована база математичних моделей може бути повторно використана в процесі інтерпретації в інших інформаційних системах.

Підсистема управління перемиканням нелійним параметром в процесі вибору математичних моделей ініціалізує оператори для формування параметрів моделі з відповідними значеннями, створює асоціації між змінними, формує фактичні команди побудови моделі та відповідний розв'язок множини рівнянь.

Таким чином, вдається поєднати методи та засоби побудови математичних моделей складних об'єктів у вигляді інтервальних алгебричних чи різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних.

Практична реалізація онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних дозволяє сформувати спільні структурні елементи, виходячи із особливостей їх застосування у складних предметних областях.

Онтологічний підхід дозволив здійснити побудову моделей представлення предметної області, а запропонована схема вибору нелінійного елемента інтервальної дискретної моделі, побудованої на основі аналізу інтервальних даних дозволила розширити сферу застосування простіших моделей у обраній предметній області.

Програмна система, яка підтримує вищезазначені функції реалізована з використанням мови програмування Java, підключення Python інструментального засобу та реляційної бази даних MySQL. Користувач обирає екземпляр моделі та відповідний операційний приклад. Для вибраної моделі здійснюється виокремлення нелінійного елемента, який на основі правил узгодженості дозволяє будувати відповідні оператори з використанням бібліотек модулів, які інтерпретують рівняння з формалізованих, проіндексованих частин, ініціалізувати відповідні параметри моделі, засновані на відповідному екземплярі операції, і, нарешті, дозволяють обрати відповідну модель для побудови необхідного розв'язку або здійснити уточнення та побудову нової моделі. Отримані результати можна інтерпретувати у відповідному графічному інтерфейсі (графіки, таблиці, схеми, набір результуючих файлі), а також відображати інші результати, які зберігаються в операційному екземплярі математичної моделі з відповідними уточненнями та розміщуються в інформаційному репозиторії з присвоєнням окремого ідентифікатора.

Розглянемо приклад застосування онтологічного підходу для побудови інтервальної дискретної динамічної моделі для

моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів концентрацій діоксиду азоту на одному із перехресть з насиченим рухом автотранспорту в м. Тернопіль.

В інформаційному репозиторії для вказаного об'єкта дослідження знайдено декілька інтервальних математичних моделей. На рисунку 3.15 наведено формальне представлення вибраної моделі в середовищі SmartOntologyModeller.

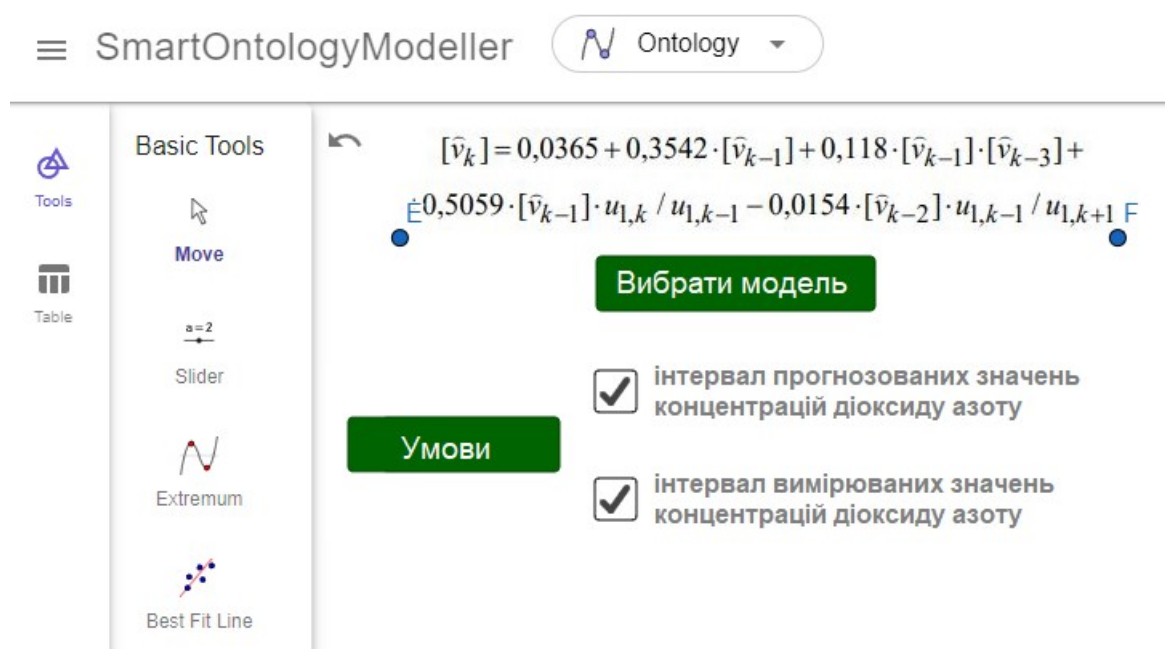


Рисунок 3.15 – Вибір інтервальної математичної моделі для моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів концентрацій діоксиду азоту в середовищі SmartOntologyModeller

Вказана в інтерфейсному вікні на рисунку 3.15 модель показує взаємозв'язок між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспорту для різних точок міста.

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. Як витікає з проведеного аналізу, для усунення цієї проблеми необхідно здійснювати управління вибраним структурним елементом моделі.

На рисунку 3.16 представлено процедуру вибору нелінійного елемента інтервальної дискретної динамічної моделі та відповідне перемикання на інший екземпляр моделі.

Таким чином, отримані результати в межах онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних дозволяють представляти предметну область, у вигляді комплексного нелінійного елемента інтервальної дискретної моделі.

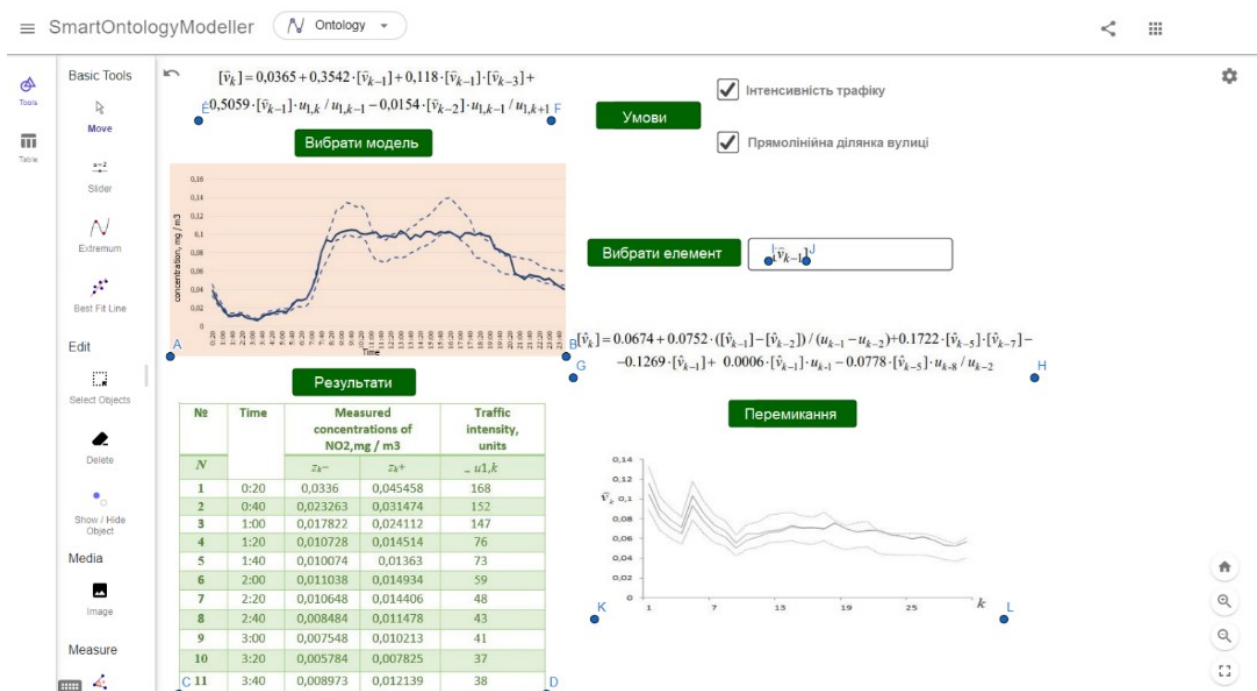


Рисунок 3.16 – Результати вибору нелінійного елемента дискретної динамічної моделі та відповідне перемикання на інший екземпляр математичної моделі в середовищі SmartOntologyModeller

З проведених досліджень випливає, що запропонований підхід дозволяє спростити процес ідентифікації математичної моделі, повторного її використання, підвищення прогностичних характеристик моделей та апробації у відповідних зовнішніх програмно-інтерпретованих середовищах.

Висновки до розділу 3

1. Запропоновано 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, що у сукупності створило можливість розробки нових, більш ефективних з обчислювальної точки зору методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей об'єктів.

2. Обґрунтовано та побудовано гібридний метод структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів, який ґрунтується на поєднанні методів інтервального аналізу, поведінкових моделей бджолоїної колоній та знання-орієнтованому підході опису предметної області об'єктів на основі онтології, що у сукупності забезпечило зниження обчислювальної складності структурної ідентифікації.

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено, що гібридний метод ідентифікації інтервальних

моделей складних об'єктів має вищу ефективність у порівнянні з відомими методами ідентифікації, а при знаходженні структури моделі у репозиторії для подібних за функціонуванням об'єктів обчислювальна складність зменшується за рахунок уникнення процедури структурної ідентифікації.

3. Запропонована та представлена онтологічна надбудова для математичного моделювання об'єктів на основі інтервальних даних дає можливість генерувати засоби у вигляді програмного забезпечення для побудови інтервальних моделей.

З іншого боку, за наявності раніше побудованих інтервальних дискретних моделей, онтологічна надбудова дає можливість створити репозиторій цих моделей, а також керувати цим репозиторієм. У цьому випадку він служить «перемикачем», який вибирає найбільш точну і адекватну модель зі сховища раніше створених моделей.

Переваги запропонованого підходу проілюстровано на прикладі моделювання процесів забруднення повітря шкідливими викидами автотранспорту. Зокрема, приклад ілюструє «перемикання» вибору математичної моделі на основі інтервальних даних залежно від зміни предметних характеристик моделі. Перемикання відбувається шляхом зміни умов середовища моделювання.

РОЗДІЛ 4

ОНТОЛОГІЧНО-КЕРОВАНА ПРОГРАМНА СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Нові гібридні методи структурної та параметричної ідентифікації моделей об'єктів, які представлені у вигляді інтервальних різницевих рівнянь, відрізняються від існуючих використанням як високоефективних алгоритмів штучної бджолиної колонії для розв'язування задач оптимізації структури та параметрів моделі, так і методів онтологічного підходу для формального представлення предметної області, що забезпечує підвищення прогностичних характеристик моделей і розширення сфери та умов їх застосування при спрощенні обчислювальної складності оперування моделлю.

Даний розділ присвячений питанням обґрунтування використання онтологічного підходу, як ефективного інструмент управління процесами побудови математичних моделей на основі інтервальних даних та використання цих моделей для прикладних задач. Використання онтологічної моделі дало можливість формалізувати процес отримання, зберігання та використання знань, які отримано в процесі математичного моделювання.

Онтологічний підхід програмно імплементовано до формалізації як самих математичних моделей на основі інтервальних даних, так і формалізації особливостей їх використання. 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.

У розділі також представлено особливості побудови архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу.

Описано технологію створення програмного забезпечення на основі розробленої онтологічної надбудови для математичного моделювання з використанням інтервальних даних для різних об'єктів, а також різних форм реалізації інтерфейсу користувача.

Наведено ряд діаграм, які ілюструють особливості використання онтологічного підходу на основі інтервальних даних та описано особливості його інтерпретації в прикладних сферах, зокрема, в задачах медицини, екологічного моніторингу та при використанні веб-орієнтованих інформаційних систем.

4.1. Архітектура онтологічно-керованої системи інтервального моделювання складних об'єктів

Розглянута у третьому розділі концепція побудови математичних та комп'ютерних моделей, відрізняється від існуючих поєднанням методів аналізу інтервальних даних та методів онтологічного аналізу, що забезпечує підвищення

прогностичних характеристик моделей і розширення сфери та умов їх застосування. Розроблені на підставі згаданої концепції гібридні методи структурної та параметричної ідентифікації моделей об'єктів у вигляді інтервальних різницевих рівнянь, відрізняються від існуючих використанням як високоефективних алгоритмів штучної бджолоїної колонії для розв'язуванням задач оптимізації структури та параметрів моделі, так і методів онтологічного підходу для формального представлення предметної області, що забезпечує підвищення прогностичних характеристик моделей і розширення сфери та умов їх застосування при спрощені обчислювальної складності оперування моделлю [51, 99, 160].

У цьому розділі також описане 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 [42, 159, 160].

Програмний комплекс належить до класу об'єкто-орієнтованих систем, розроблений з 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 4.1.

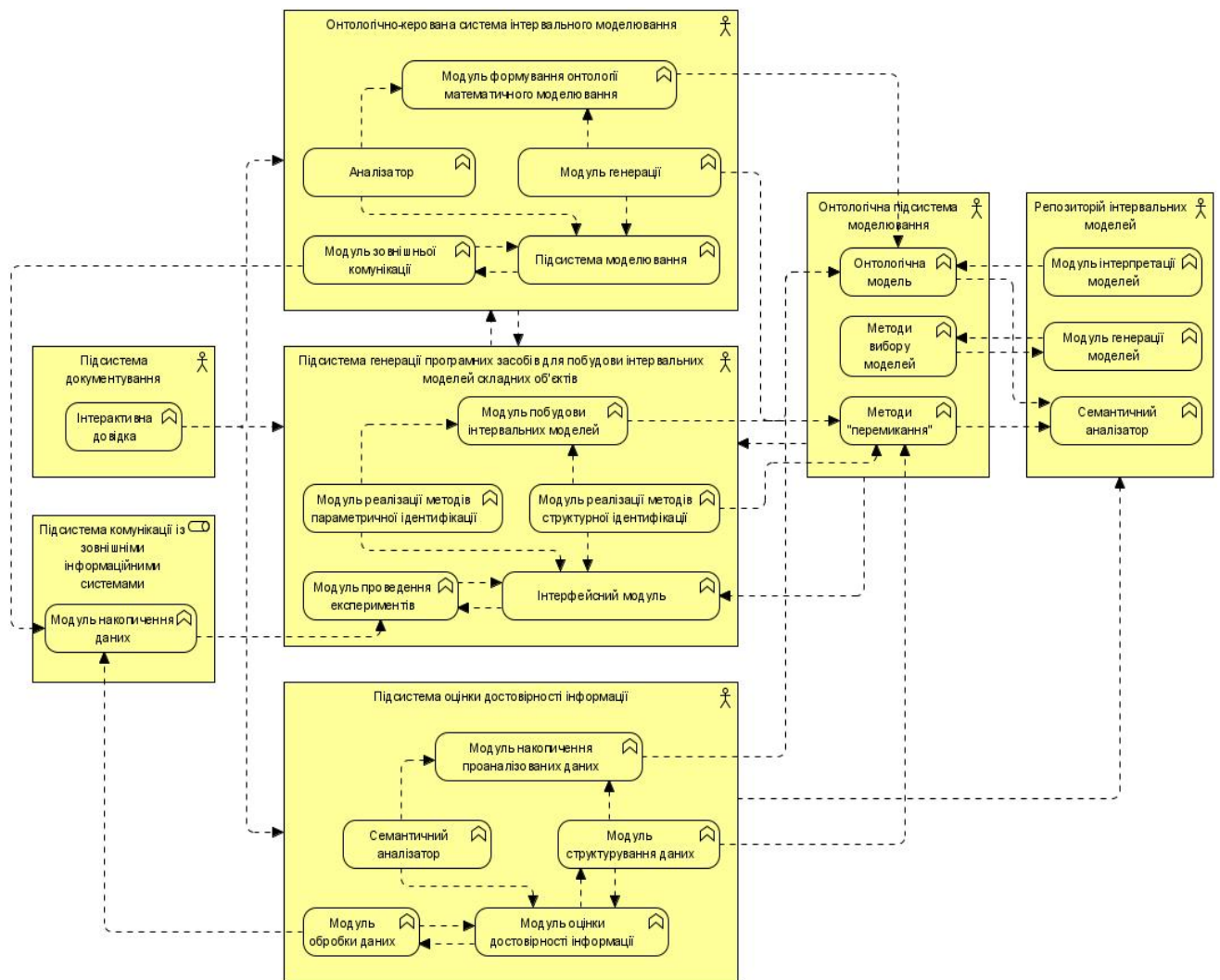


Рисунок 4.1 – Загальна архітектура програмного комплексу

З представленої архітектури програмного комплексу можна виділити декілька основних підсистем:

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

- онтологічна підсистема моделювання, яка містить модуль представлення самої онтологічної моделі, модуль реалізації методів

вибору моделей, модуль перемикання параметрами у зв'язку із зміною умов моделювання;

- підсистема «Репозиторій інтервальних моделей», яка містить модуль інтерпретації моделей, модуль генерації моделей, семантичний аналізатор;

- підсистема «Репозиторій інтервальних моделей», яка містить модуль інтерпретації моделей, модуль генерації моделей, семантичний аналізатор;

- підсистема оцінки достовірності інформації, яка містить 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 містить 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.

На рисунку 4.2 представлено загальну діаграму варіантів використання програмного комплексу для моделювання на основі методів інтервального аналізу та онтологічного підходу.

Основними користувачами системи є дослідник, адміністратор та користувач, які можуть виконувати визначений набір функцій, які представлено на рисунку 4.2.

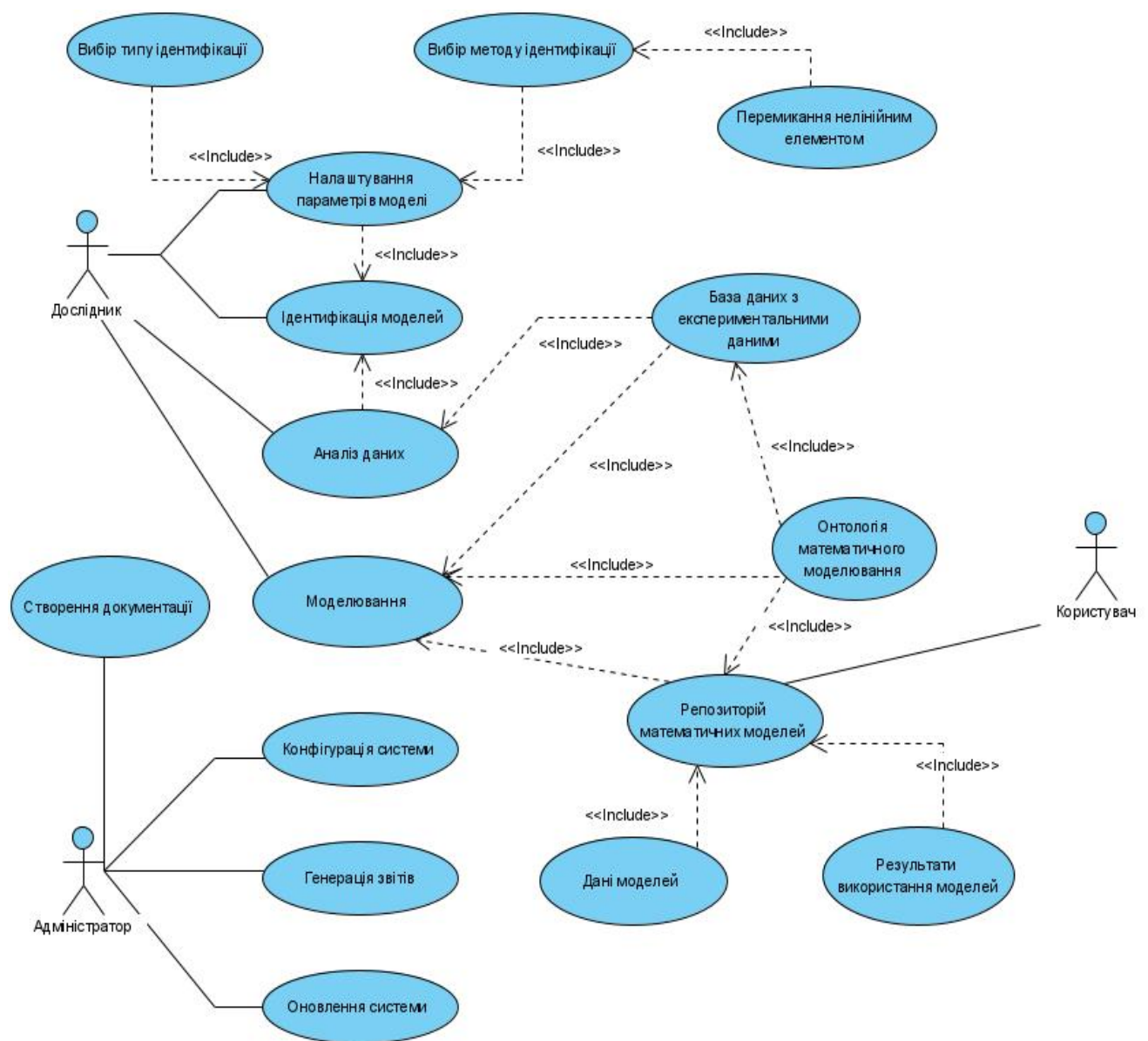


Рисунок 4.2 – Use-case діаграма системи для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу

Як показано на рисунку 4.2 дослідник має можливість налаштування параметрів моделі, вибір методів та типу ідентифікації, здійснення процедури моделювання із можливістю проведення експериментальних досліджень та аналізом даних. При виборі користувачем структурної ідентифікації, є можливість перевірки повноти опису моделі з використанням онтології математичного моделювання та репозиторію інтервальних моделей.

На рисунку 4.3 представлено відповідну діаграму послідовності для дослідника в процесі побудови математичної моделі, або її вибору із репозиторію математичних моделей.

Системний адміністратор має можливість конфігурувати систему, здійснювати генерацію звітів, а також здійснювати оновлення програмного забезпечення. На рисунку 4.4 представлена відповідна діаграма послідовності.

Звичайний користувач програмного комплексу через згенеровані програмні засоби для побудови інтервальних моделей складних об'єктів може працювати із репозиторієм математичних моделей, який також включає можливість повторного використання даних, а також аналіз застосування результатів моделювання. На рисунку 4.5 представлено відповідну діаграму послідовності для даного користувача.

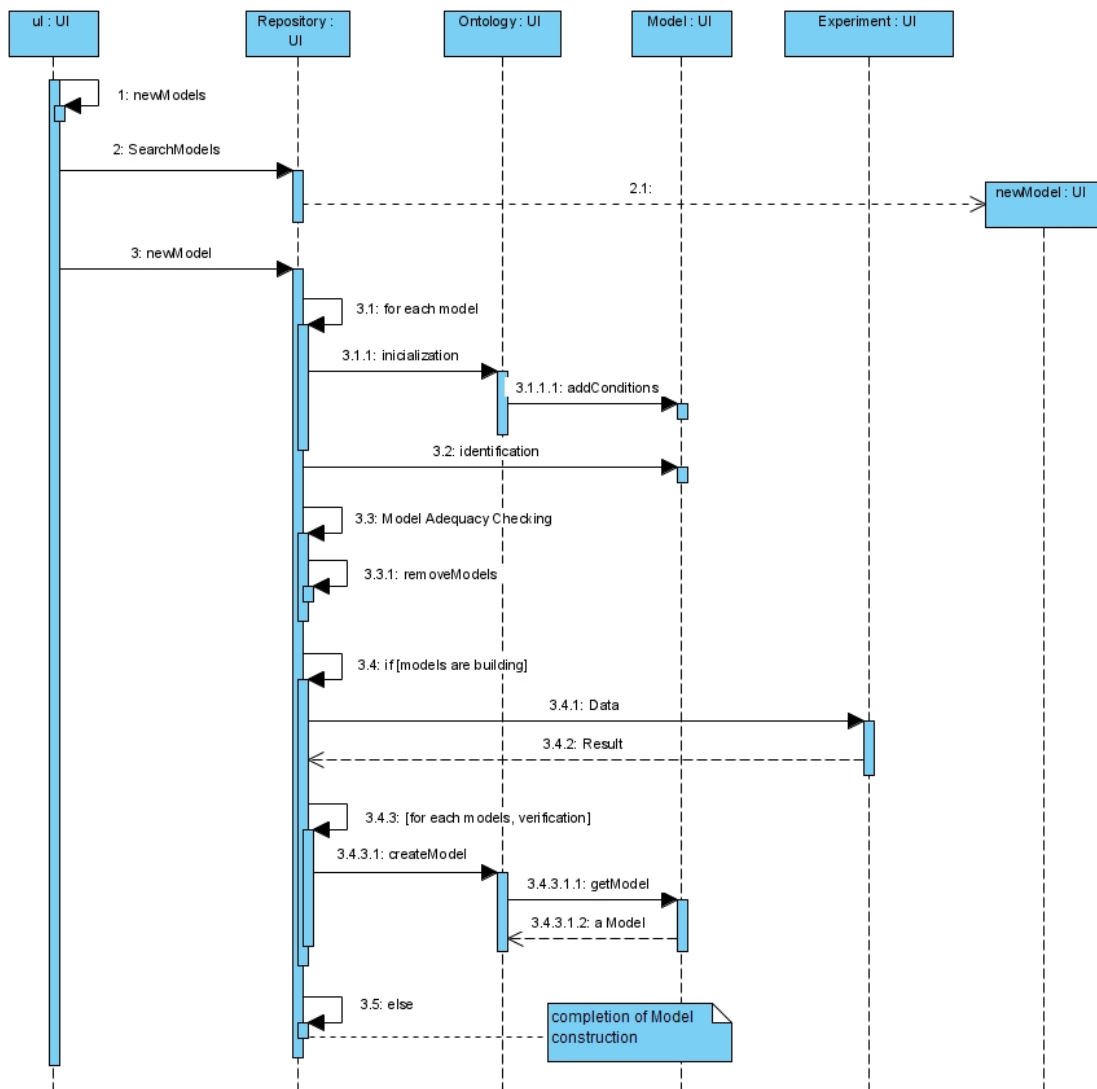


Рисунок 4.3 – Діаграма послідовності побудови математичної моделі або її пошуку в репозиторії інтервальних математичних моделей

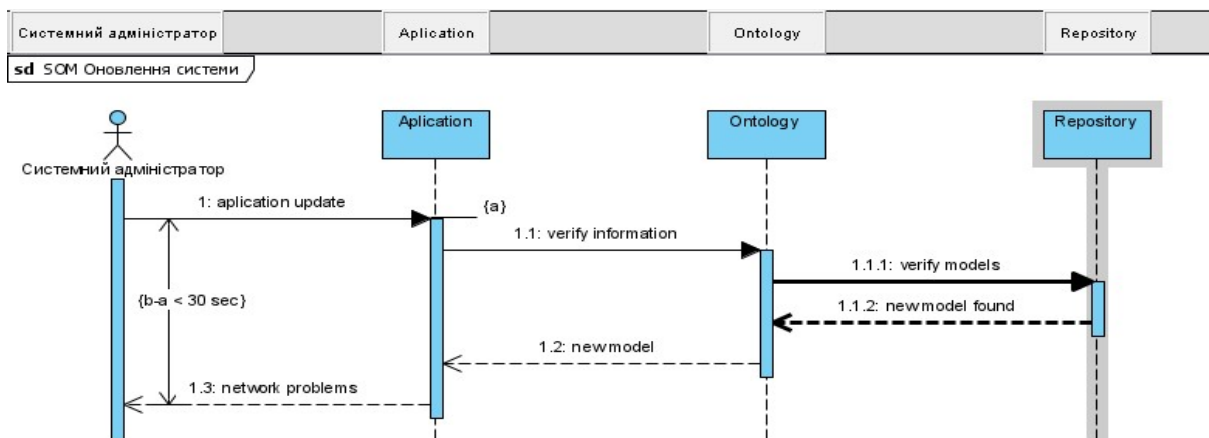


Рисунок 4.4 – Діаграма послідовності оновлення системи на наявність нових моделей у репозиторії

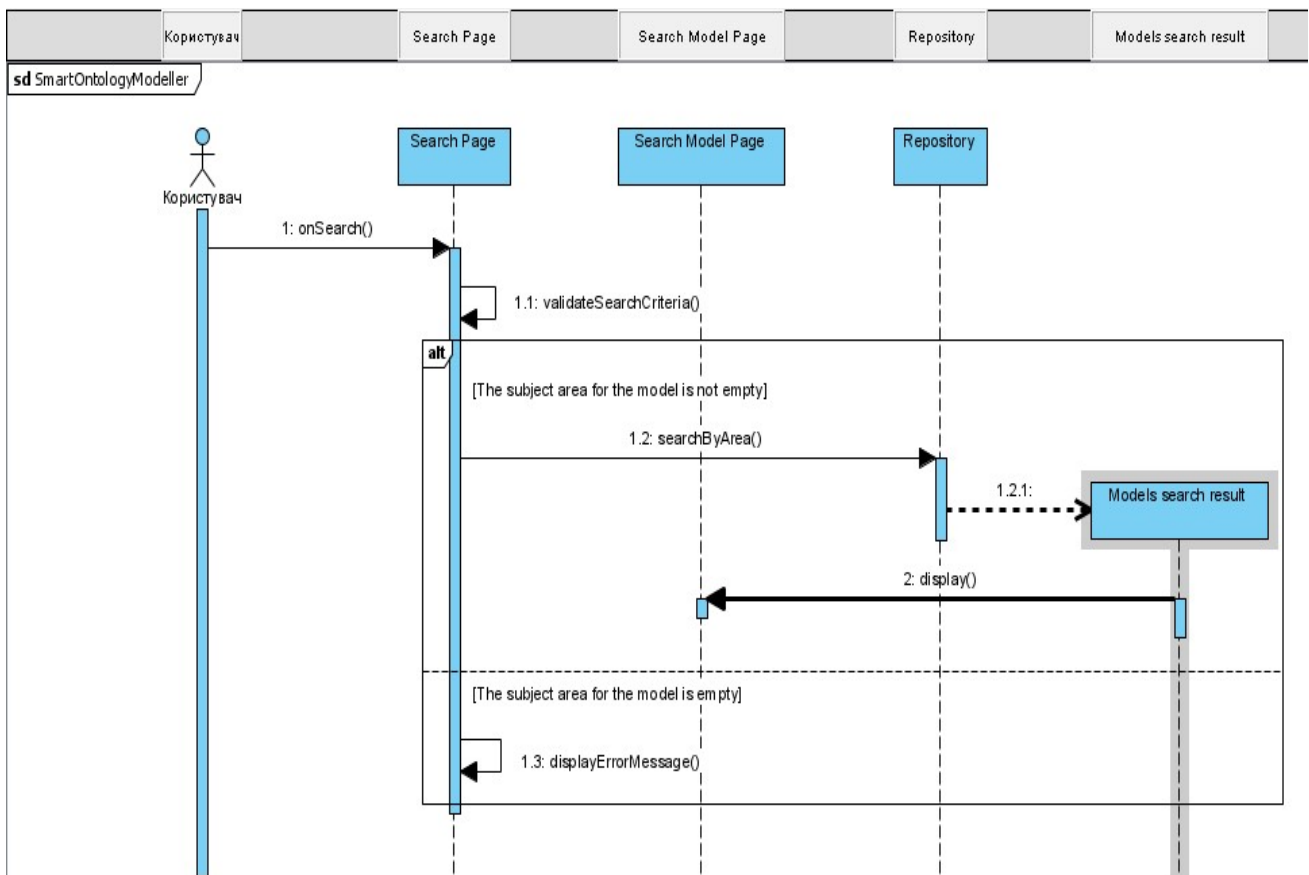


Рисунок 4.5 – Діаграма послідовності пошуку моделі за обраним критерієм в репозиторію

На рисунку 4.6 представлено узагальнену діаграму діяльності, яка описує основні процеси та позначає рішення, які виникають на етапі експлуатації програмного комплексу. Стрілками на діаграмі показано порядок, в якому відбуваються активності.

Основним користувачем програмного комплексу є дослідник. На рисунку 4.7 представлено діаграму комунікації, яка показує взаємодії між об'єктами в термінах впорядкованих повідомлень. Як видно з рисунка 4.7 дослідник послідовно виконує операції із системою, починаючи від вибору предметної області і завершуючи отриманням результату.

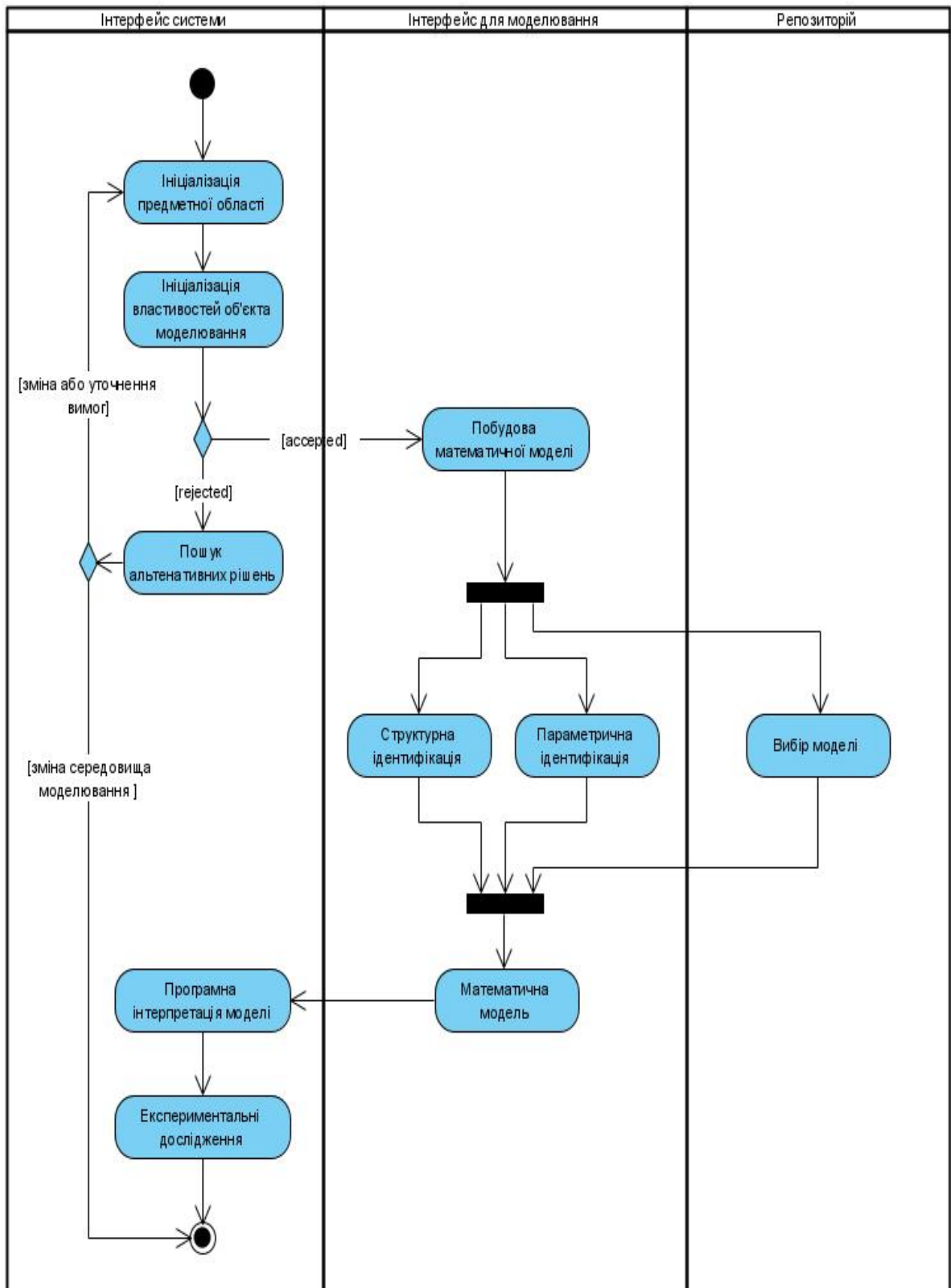


Рисунок 4.6 – Узагальнена діаграма діяльності

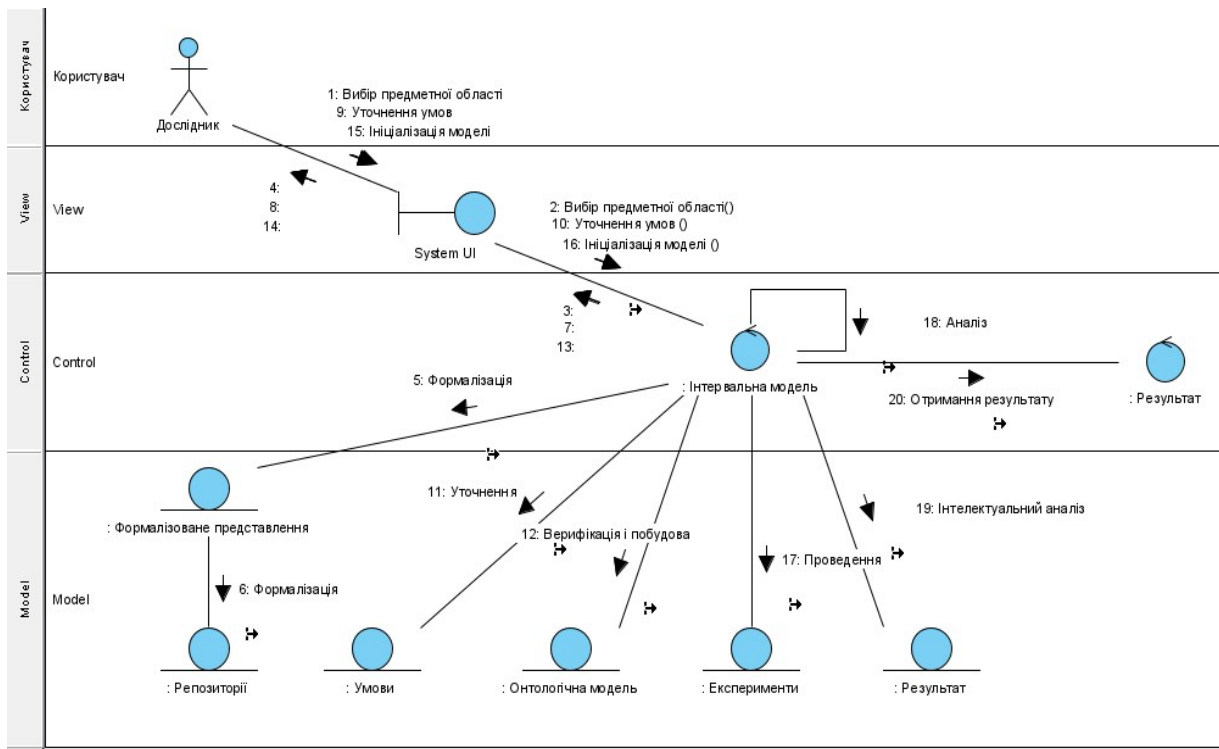


Рисунок 4.7 – Узагальнена діаграма комунікації

На рисунку 4.8 представлена діаграма класів програмного комплексу для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу.

Основними класами є *Ontology* та *Model*, які використовуються для представлення та опрацювання інформації про предметну область моделювання, об'єкт моделювання, умови, які уточнюють поведінку об'єкта в тій чи іншій ситуації.

Клас *Model* окрім атрибутів, які характеризують саме представлення моделі, містить реалізовані методи моделювання складних об'єктів та відповідних процесів та методи структурної та параметричної ідентифікації цих моделей.

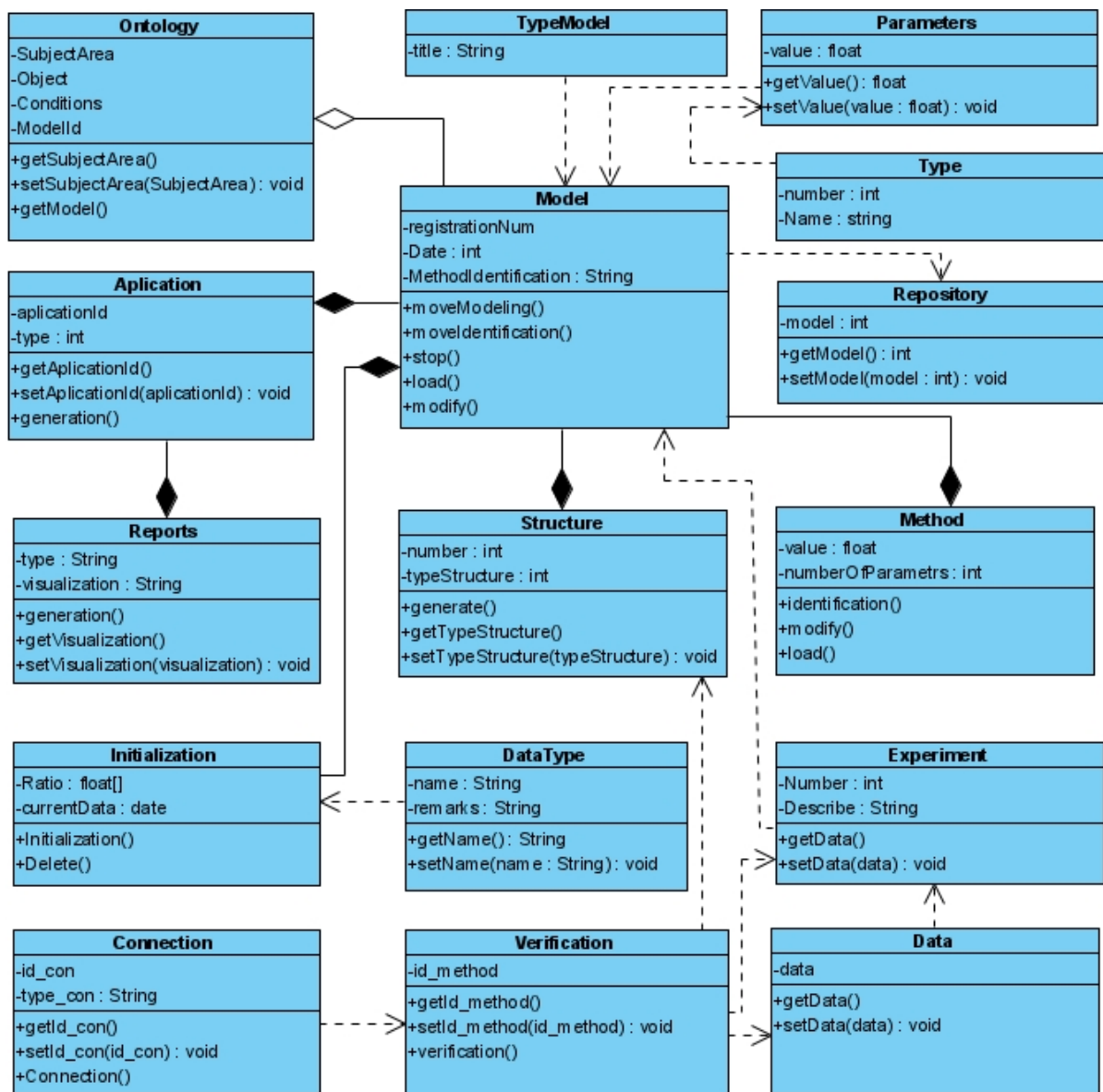


Рисунок 4.8 – Діаграма класів програмного комплексу для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу

Важливими характеристиками, які пов’язані з класом Model є такі як тип моделі, структура моделі, методи ідентифікації, ініціалізація, параметри моделі та тип параметрів моделі. Ці характеристики реалізовані у відповідних класах:

клас Structure – використовується для представлення інформації про структуру моделі, методи пошуку структурних елементів та відповідні методи структурної ідентифікації;

клас `Method` – використовується для реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей;

класи `Parameters` та `Type` описують набір параметрів, зміна яких характеризується відповідними залежностями.

клас `Initialization` – використовується для фази ініціалізації моделі в програмному середовищі.

Однією з ключових особливостей програмного комплексу є реалізована функціональність, яка використовується для генерування засобів у вигляді програмного забезпечення для побудови інтервальних моделей. Сюди відносять наступні класи:

клас `Application` та клас `Reports`. Перший клас на основі відповідних залежностей, які формалізовано представлені в класах `Ontology` та `Model` та з використанням відповідних реалізованих методів – `getApplicationId()` та `generation()` дозволяє здійснювати генерування інструментальних засобів для математичного моделювання в межах вибраної предметної області.

Клас `Repository` реалізовує функціонал, який дозволяє управляти накопиченою базою математичних моделей, особливостями проведення експериментів та поповнення репозиторію із зовнішніх інформаційних систем.

З метою отримання даних для проведення експериментальних досліджень налагоджено комунікацію із зовнішніми джерелами, основний функціонал якої реалізовано з використанням класу `Connection`.

В рамках програмного комплексу реалізовано підсистему для оцінки достовірності інформації. Основними класами в її підсистемі є Verification, Data та Experiment. Функціональне поєднання цих класів дозволило реалізувати оцінку достовірності інформації в процесі забезпечення повноти структури моделі та опису об'єкта моделювання.

Інші класи, які реалізовані в рамках комплексу носять допоміжний характер і призначені для забезпечення функціональної повноти програмного комплексу для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу.

Програмний комплекс складається із шести великих компонент, які об'єднані у відповідні підсистеми, які детально представлено на рисунку 4.9.

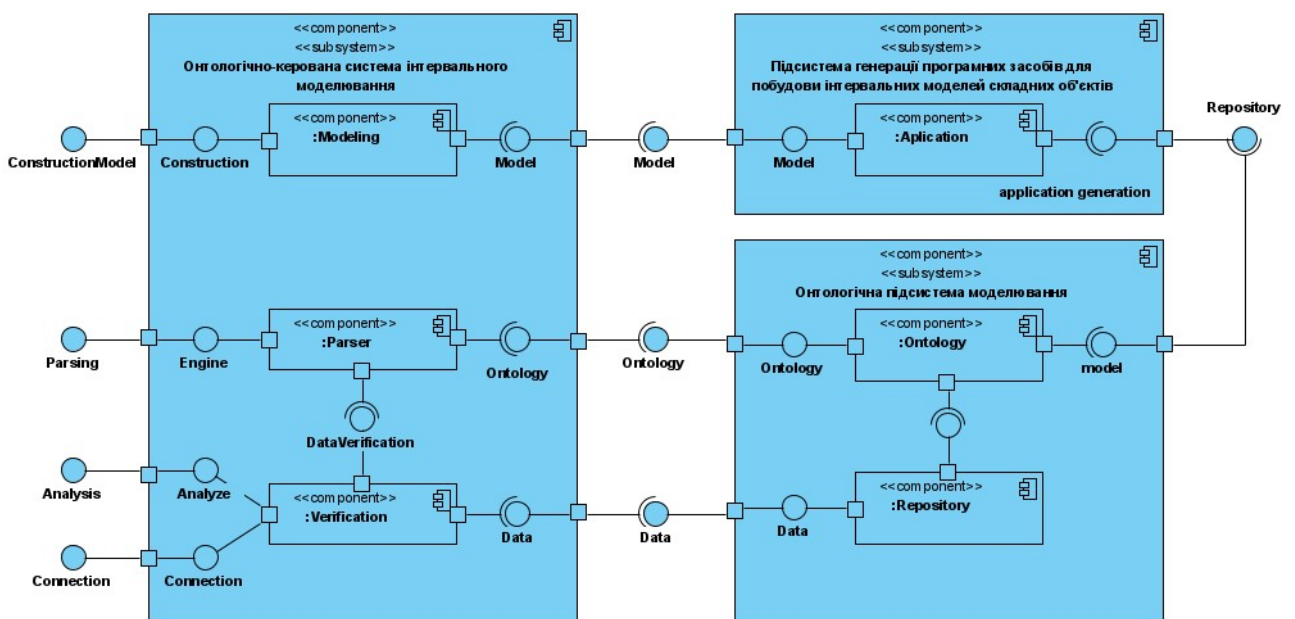


Рисунок 4.9 – Діаграма компонентів програмного комплексу для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу

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 4.9, взаємодія між компонентами реалізована за допомогою відповідних класів – Data, Ontology, Model, ApplicationGeneration, Repository.

Програмний комплекс для моделювання на основі інтервального та онтологічного підходів розроблений з використанням технології Spring framework на мові програмування Java, а також інтерпретатором Python. В якості Python інтерпретатора було обрано Jython. В якості СУБД використовується MySQL версії 5.7.

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

Tomcat. Детальну діаграму розгортання представлено на рисунку 4.10.

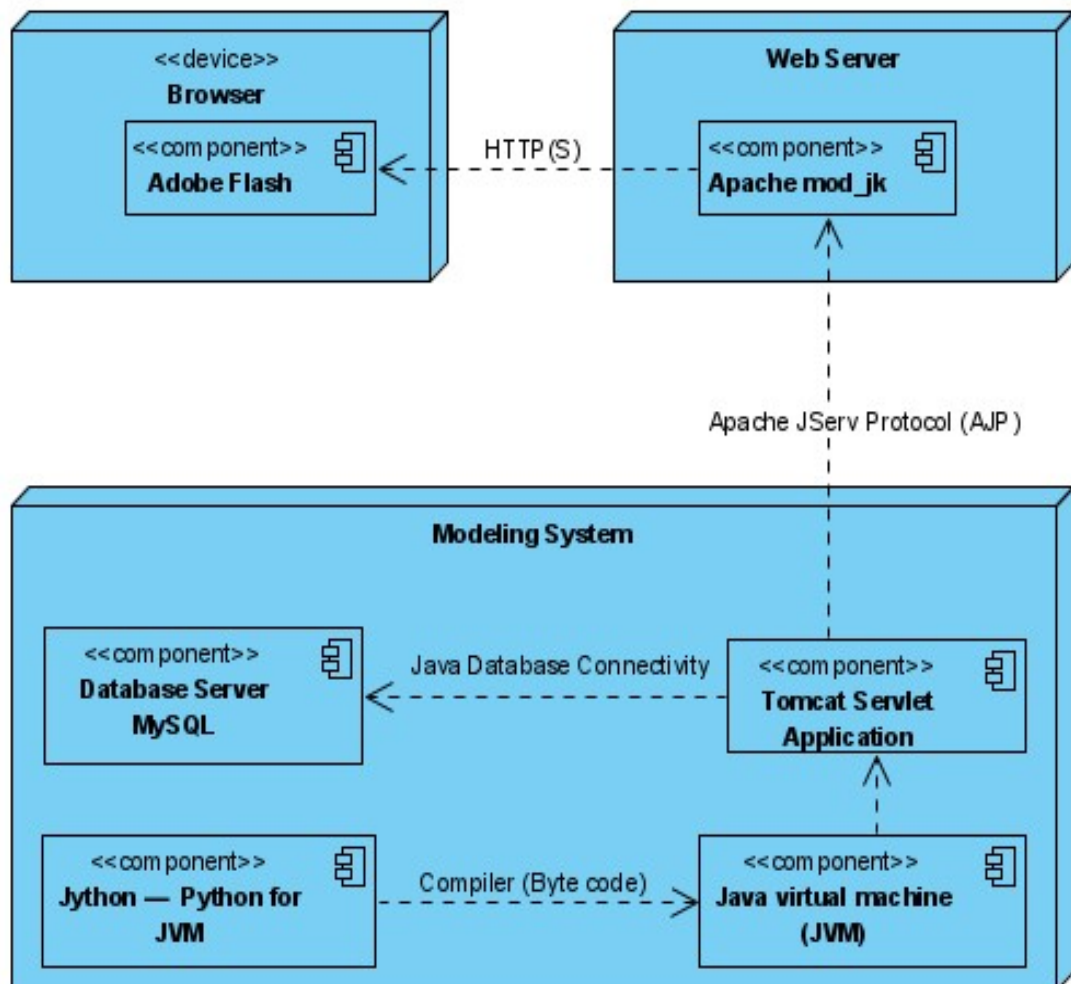


Рисунок 4.10 – Діаграма розгортання програмного комплексу для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу

4.2. Проектування та реалізація підсистеми зберігання інформації

Важливим етапом реалізації програмного комплексу для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного

підходу є проектування та програмна реалізація підсистеми зберігання інформації. Для програмної реалізації комплексу було обрано СУБД MySQL. Основними критеріями такого вибору є висока продуктивність опрацювання даних та наявність широкого спектру реалізованих засобів комунікації із зовнішніми інформаційними системами.

MySQL забезпечує високу швидкість обробки транзакцій з оптимальною швидкістю, здатний здійснювати кешування результатів, що підвищує продуктивність зчитування даних. Реплікація та кластеризація забезпечують кращу паралельність і дозволяють здійснювати динамічне управління навантаженням. Для підвищення продуктивності опрацювання великих обсягів даних та пришвидшення пошуку даних, в MySQL індекси бази даних включені в загальну схему організації продуктивності системи.

На рисунку 4.11 наведено загальну ER діаграму бази даних, яка використовується для зберігання інформації в процесі моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу. Для забезпечення основного функціоналу системи реалізовано основні та допоміжні відношення. Розглянемо детальніше спроектовані відношення. Атрибути відношень відображають основні характеристики виділених сутностей, а тип даних та розмірність цих атрибутів формувалася виходячи із їх фізичної інтерпретації.

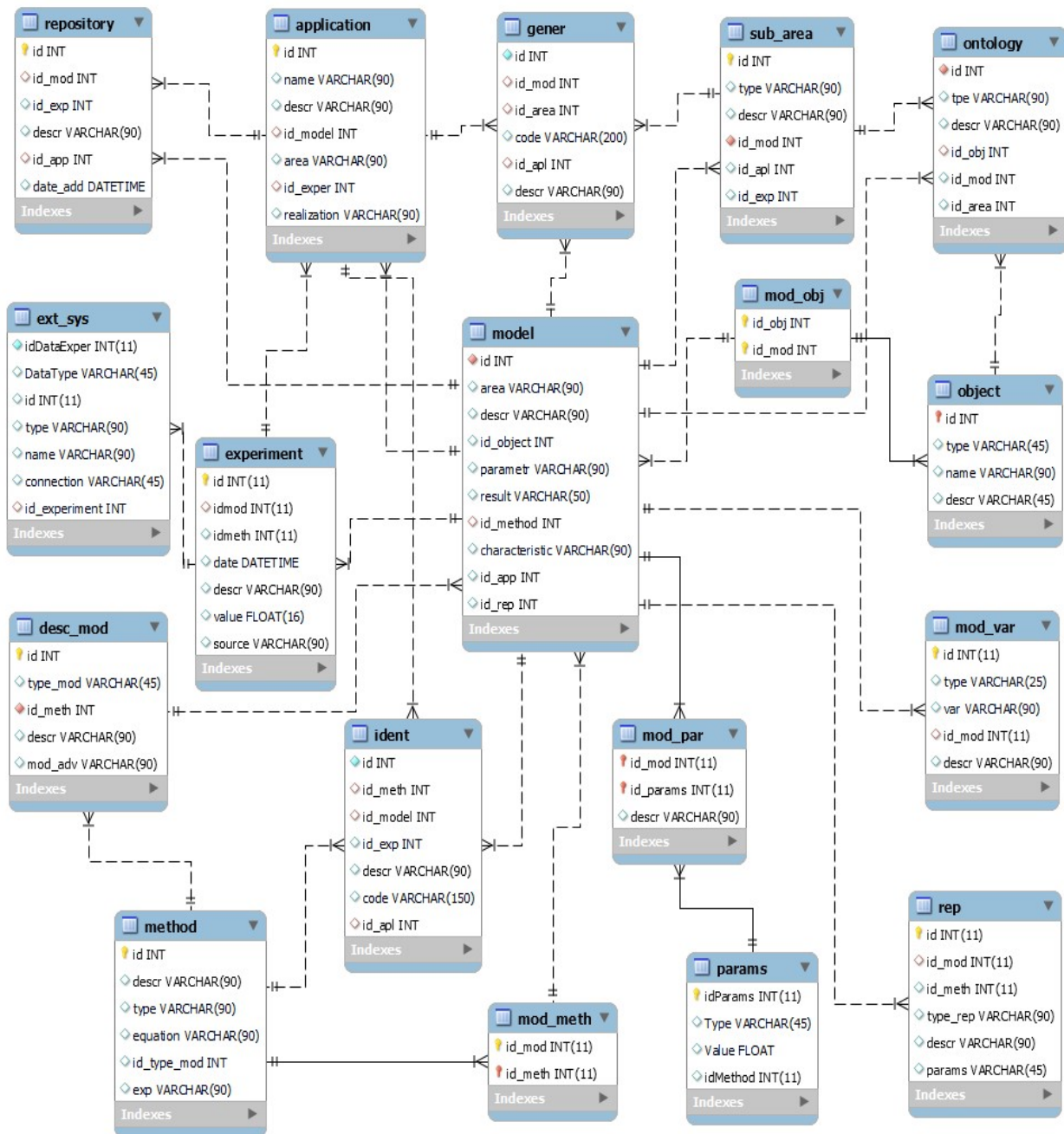


Рисунок 4.11 – ER-діаграма бази даних системи для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу

Основним відношенням в базі даних є “model”, яке містить інформацію про предметну область моделювання, детальний словесний опис, посилання на об’єкт моделювання, інформацію про пов’язані методи структурної та параметричної ідентифікації, набір

характеристик перебігу експериментів, а також інформацію про можливість генерування інструментальних програмних засобів для подальшого практичного використання цих моделей.

Структура відношення “model” представлена на рисунку 4.12.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
area	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_object	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
parametr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
result	VARCHAR(50)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_method	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
characteristic	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_app	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_rep	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
modelcol	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.12 – Структура відношення «model»

Важливим аспектом розуміння організації підсистеми зберігання інформації є наявність встановлених зв'язків між сутностями предметної області та їх імплементація в конкретній СУБД. Для вирішення цієї проблеми в роботі використано представлення DDL описів ключових відношень.

DDL опис для відношення «model»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`model` (
  `id` INT NOT NULL,
  `area` VARCHAR(90) NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL,
  `id_object` INT NOT NULL,
```

```
`parametr` VARCHAR(90) NULL,  
`result` VARCHAR(50) NULL,  
`id_method` INT NOT NULL,  
`characteristic` VARCHAR(90) NULL,  
`id_app` INT NOT NULL,  
`id_rep` INT NOT NULL,  
INDEX `meth_idx` (`id_method` ASC) VISIBLE,  
CONSTRAINT `meth`  
FOREIGN KEY (`id_method`)  
REFERENCES `som`.`mod_meth` (`id_meth`),  
CONSTRAINT `t1`  
FOREIGN KEY (`id`)  
REFERENCES `som`.`desc_mod` (`id`)  
CONSTRAINT `t2`  
FOREIGN KEY (`id`)  
REFERENCES `som`.`mod_obj` (`id_mod`))  
ENGINE = InnoDB
```

Для представлення інформації про методи структурної та параметричної ідентифікації використовується відношення «method», структуру якого представлено на рисунку 4.13. Ключовими атрибутами даного відношення є *equation* – використовується для формалізованого математичного представлення опису та реалізації конкретного методу, *exp* – використовується для опису пов'язаних експериментальних досліджень та *id_type_mod* – ідентифікатор типу відповідних моделей.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
type	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
equation	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_type_mod	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
exp	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.13 – Структура відношення «method»

DDL представлення відношення «method»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`method` (
  `id` INT NOT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL,
  `type` VARCHAR(90) NULL,
  `equation` VARCHAR(90) NULL,
  `id_type_mod` INT NULL,
  `exp` VARCHAR(90) NULL,
  PRIMARY KEY (`id`))
ENGINE = InnoDB
```

Необхідно відзначити, що через додаткове відношення – mod_meth реалізовано зв'язок з відношенням “model”, який показує можливість застосування конкретних методів ідентифікації для визначеного типу чи конкретної інтервальної моделі.

Інформація про предметну область зберігається у відношенні «sub_area» (рисунок 4.14). Ключовими атрибутами у даному відношенні є type, descr, id_mod, які використовуються для представлення опису предметної області та його зв'язку з відповідною математичною моделлю.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
type	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
id_mod	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_apl	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
id_exp	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.14 – Структура відношення «sub_area»

DDL представлення відношення «sub_area» наведено нижче:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`sub_area` (
  `id` INT NOT NULL,
  `type` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
  `id_mod` INT NOT NULL,
  `id_apl` INT NULL DEFAULT NULL,
  `id_exp` INT NULL,
  PRIMARY KEY (`id`),
  INDEX `m1_idx` (`id_mod` ASC) VISIBLE,
```

```

CONSTRAINT `m1`
FOREIGN KEY (`id_mod`)
REFERENCES `som`.`model` (`id`))
ENGINE = InnoDB

```

Для уточнення інформації, яка стосується використання математичних моделей, реалізовано кілька додаткових відношень – «object», «params», «desc_mod». Інформація про об'єкт моделювання представлена у відношенні «object» (рисунок 4.15).

До ключових атрибутів даного відношення віднесено name та descr, які визначають сам об'єкт моделювання та його деталізований опис.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
type	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
name	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.15 – Структура відношення «object»

DDL представлення відношення «object»:

```

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`object` (
`id` INT NOT NULL,
`type` VARCHAR(45) NULL,

```

```

`name` VARCHAR(90) NULL,
`descr` VARCHAR(45) NULL,
INDEX `obj_idx` (`id` ASC) VISIBLE,
PRIMARY KEY (`id`),
CONSTRAINT `obj`
FOREIGN KEY (`id`)
REFERENCES `som`.`mod_obj` (`id_obj` )
ENGINE = InnoDB
    
```

Для деталізованого представлення інформації про особливості практичного функціонування моделей, відповідне групування по типах та додатковий опис використовується відношення «desc_mod» (рисунок 4.16).

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
type_mod	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
id_meth	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
mod_adv	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL

Рисунок 4.16 – Структура відношення «desc_mod»

DDL представлення відношення «desc_mod»:

```

CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`desc_mod` (
  `id` INT NOT NULL,
  `type_mod` VARCHAR(45) NULL DEFAULT NULL,
    
```



```

`id_meth` INT NOT NULL,
`descr` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
`mod_adv` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
PRIMARY KEY (`id`),
INDEX `d1_idx` (`id_meth` ASC) VISIBLE,
CONSTRAINT `d1`
  FOREIGN KEY (`id_meth`)
  REFERENCES `som`.`method` (`id`)
)
ENGINE = InnoDB

```

Інформація, яка стосується параметрів математичних моделей відображена у відношенні «params» (рисунок 4.17), яке включає такі атрибути як type, value та idmethod – ідентифікатор методу параметричної ідентифікації моделі.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
idParams	INT(11)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
type	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
value	FLOAT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
idmethod	INT(11)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL

Рисунок 4.17 – Структура відношення «params»

Основні аспекти, які відносяться до характеристики процесів ідентифікації математичних моделей зберігаються у відношенні «ident» (рисунок 4.18).

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_meth	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_model	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_exp	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
code	VARCHAR(150)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_apl	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.18 – Структура відношення «ident»

DDL представлення відношення «ident»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`ident` (
  `id` INT NOT NULL,
  `id_meth` INT NULL,
  `id_model` INT NULL,
  `id_exp` INT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL,
  `code` VARCHAR(150) NULL,
  `id_apl` INT NULL,
  INDEX `i1_idx` (`id_meth` ASC) VISIBLE,
  INDEX `i2_idx` (`id_model` ASC) VISIBLE,
  INDEX `i3_idx` (`id_apl` ASC) VISIBLE,
  CONSTRAINT `i1`
    FOREIGN KEY (`id_meth`)
    REFERENCES `som`.`method` (`id`),
  CONSTRAINT `i2`
```

```
FOREIGN KEY (`id_model`  
REFERENCES `som`.`model` (`id`),  
CONSTRAINT `i3`  
FOREIGN KEY (`id_apl`  
REFERENCES `som`.`application` (`id`))  
ENGINE = InnoDB
```

Процедура ідентифікації супроводжується відповідними характеристиками, які уточнюють особливості їх застосування для обраного типу моделей, та відповідними експериментальними дослідженнями. До ключових атрибутів даного відношення також належать `id_meth` (посилання на метод ідентифікації), `id_model` (ідентифікатор математичної моделі) та `code` (можливість та особливості програмної реалізації процедури ідентифікації).

Інша група відношень використовується для зберігання інформації про процедуру проведення експериментальних досліджень, відповідних експериментальних даних та особливостей налагодження комунікації із зовнішніми інформаційними системами. Це відношення «`experiment`», «`ext_sys`», та «`rep`».

Відношення «`experiment`» (рисунок 4.19) містить такі ключові атрибути як `source` – опис інформаційного джерела з якого отримано дані, `value` – конкретні значення, `date` – дата отримання чи проведення експерименту, `idmod` та `idmeth` – відповідно ідентифікатори моделі та методу ідентифікації.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT(11)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
idmod	INT(11)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
idmeth	INT(11)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
date	DATETIME	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
value	FLOAT(16)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
source	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.19 – Структура відношення «experiment»

DDL представлення відношення «experiment»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`experiment` (
  `id` INT(11) NOT NULL,
  `idmod` INT(11) NULL DEFAULT NULL,
  `idmeth` INT(11) NULL DEFAULT NULL,
  `date` DATETIME NULL DEFAULT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
  `value` FLOAT(16) NULL DEFAULT NULL,
  `source` VARCHAR(90) NULL,
  PRIMARY KEY (`id`),
  INDEX `e1_idx` (`idmod` ASC) VISIBLE,
  CONSTRAINT `e1`
    FOREIGN KEY (`idmod`)
    REFERENCES `som`.`model` (`id`))
ENGINE = InnoDB
```

Відношення «ext_sys» (рисунок 4.20) містить такі ключові атрибути як name, type – відповідно назва та тип зовнішнього інформаційного джерела, connection – тип використовуваного

зв'язку між інформаційними системами, `id_experiment` – ідентифікатор відповідного експерименту, `datatype` – тип оптимуваних даних.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT(11)	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
datatype	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
type	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
name	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
connection	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_experiment	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.20 – Структура відношення «ext_sys»

DDL представлення відношення «ext_sys»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`ext_sys` (
  `id` INT(11),
  `datatype` VARCHAR(45),
  `type` VARCHAR(90) NULL,
  `name` VARCHAR(90) NULL,
  `connection` VARCHAR(45) NULL,
  `id_experiment` INT NULL,
  INDEX `x1_idx` (`id_experiment` ASC) VISIBLE,
  CONSTRAINT `x1`
  FOREIGN KEY (`id_experiment`)
  REFERENCES `som`.`experiment` (`id`) )
ENGINE = InnoDB
```

Відношення «rep» (рисунок 4.21) використовується для генерації відповідних звітів, які стосуються особливостей побудови математичних моделей та проведення відповідних експериментальних досліджень, а також це відношення є одним із базових, що використовується в процесі генерування відповідних інструментальних засобів.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT(11)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_mod	INT(11)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
id_meth	INT(11)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
type_rep	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL
params	VARCHAR(45)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	NULL

Рисунок 4.21 – Структура відношення «rep»

DDL представлення відношення «rep»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`rep` (
  `id` INT(11) NOT NULL,
  `id_mod` INT(11) NULL DEFAULT NULL,
  `id_meth` INT(11) NULL DEFAULT NULL,
  `type_rep` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL DEFAULT NULL,
  `params` VARCHAR(45) NULL DEFAULT NULL,
  PRIMARY KEY (`id`),
  INDEX `rp_idx` (`id_mod` ASC) VISIBLE,
  CONSTRAINT `rp`
```

```
FOREIGN KEY (`id_mod`)
REFERENCES `som`.`model` (`id` )
ENGINE = InnoDB
```

Іншою важливою групою відношень є відношення, які використовуються для загального представлення онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу – «ontology» та «repository», яке використовується для накопичення даних відносно побудованих математичних моделей та особливостей їх використання.

Відношення «ontology» (рисунок 4.22) містить такі ключові атрибути як `id_area` – ідентифікатор предметної області, `id_obj` – ідентифікатор об'єкта, `id_mod` – ідентифікатор інтервальної математичної моделі, `descr` – загальний опис використання.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
type	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_obj	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_mod	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_area	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.22 – Структура відношення «ontology»

DDL представлення відношення «ontology»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`ontology` (
  `id` INT NOT NULL,
  `type` VARCHAR(90) NULL,
```

```
`descr` VARCHAR(90) NULL,  
`id_obj` INT NOT NULL,  
`id_mod` INT NOT NULL,  
`id_area` INT NOT NULL,  
INDEX `o1_idx` (`id` ASC) VISIBLE,  
INDEX `o3_idx` (`id_obj` ASC) VISIBLE,  
PRIMARY KEY (`id`),  
CONSTRAINT `o1`  
FOREIGN KEY (`id`)  
REFERENCES `som`.`sub_area` (`id`),  
CONSTRAINT `o2`  
FOREIGN KEY (`id`)  
REFERENCES `som`.`model` (`id`),  
CONSTRAINT `o3`  
FOREIGN KEY (`id_obj`)  
REFERENCES `som`.`object` (`id`)  
ENGINE = InnoDB
```

Відношення «repository» (рисунок 4.23) містить такі ключові атрибути як `id_mod` – ідентифікатор інтервальної математичної моделі, `descr` – загальний опис моделі, `id_exp` – ідентифікатор експерименту, `id_app` – ідентифікатор типу генерованого інструментального засобу, `date_add` – дата додавання моделі в репозиторії.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_mod	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_exp	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_app	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
date_add	DATETIME	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.23 – Структура відношення «repository»

DDL представлення відношення «repository»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`repository` (
  `id` INT NOT NULL,
  `id_mod` INT NULL,
  `id_exp` INT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL,
  `id_app` INT NULL,
  `date_add` DATETIME NULL,
  PRIMARY KEY (`id`),
  INDEX `r1_idx` (`id_mod` ASC) VISIBLE,
  INDEX `r2_idx` (`id_app` ASC) VISIBLE,
  CONSTRAINT `r1`
    FOREIGN KEY (`id_mod`)
    REFERENCES `som`.`model` (`id`),
  CONSTRAINT `r2`
    FOREIGN KEY (`id_app`)
    REFERENCES `som`.`application` (`id`)
    REFERENCES `som`.`model` (`id`)
  ENGINE = InnoDB
```

Однією із основних функцій програмного комплексу для моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу є можливість генерувати інструментальні засоби для побудови інтервальных моделей.

Основні інформаційні масиви, які використовуються для досягнення даних цілей описуються наступними відношеннями «application» та «gener» відповідно.

Відношення «application» (рисунок 4.24) містить такі ключові атрибути як name – назва згенерованого засобу, descr – загальний опис, id_model – ідентифікатор формалізованої математичної моделі, area – предметна область, realization – структурований опис засобів реалізації генерованого інструментального засобу, який використовується для математичного моделювання складних об'єктів та відповідного управління процесами прикладній предметній області.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
name	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_model	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
area	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_exper	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
realization	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.24 – Структура відношення «application»

DDL представлення відношення «application»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`application` (  
  `id` INT NOT NULL,  
  `name` VARCHAR(90) NULL,  
  `descr` VARCHAR(90) NULL,  
  `id_model` INT NULL,  
  `area` VARCHAR(90) NULL,  
  `id_exper` INT NULL,  
  `realization` VARCHAR(90) NULL,  
  PRIMARY KEY (`id`),  
  INDEX `p1_idx` (`id_model` ASC) VISIBLE,  
  INDEX `p2_idx` (`id_exper` ASC) VISIBLE,  
  CONSTRAINT `p1`  
    FOREIGN KEY (`id_model`)  
    REFERENCES `som`.`model` (`id`),  
  CONSTRAINT `p2`  
    FOREIGN KEY (`id_exper`)  
    REFERENCES `som`.`experiment` (`id`))  
ENGINE = InnoDB
```

Відношення «gener» (рисунок 4.25) використовується для зберігання інформації, яка використовується в процесі генерування інструментальних засобів для моделювання на основі інтервального аналізу та містить такі ключові атрибути як `id_area` – ідентифікатор предметної області, `id_mod` – ідентифікатор моделі, `code` –

програмний код реалізації процедури генерування, `id_apl` – ідентифікатор згенерованого засобу, `descr` – загальний опис.

Column Name	Datatype	PK	NN	UQ	B	UN	ZF	AI	G	Default/Expression
id	INT	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_mod	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_area	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
code	VARCHAR(200)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
id_apl	INT	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
descr	VARCHAR(90)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

Рисунок 4.25 – Структура відношення «gener»

DDL представлення відношення «gener»:

```
CREATE TABLE IF NOT EXISTS `som`.`gener` (
  `id` INT NOT NULL,
  `id_mod` INT NULL,
  `id_area` INT NULL,
  `code` VARCHAR(200) NULL,
  `id_apl` INT NULL,
  `descr` VARCHAR(90) NULL,
  INDEX `g1_idx` (`id_apl` ASC) VISIBLE,
  INDEX `g2_idx` (`id_mod` ASC) VISIBLE,
  INDEX `g3_idx` (`id_area` ASC) VISIBLE,
  CONSTRAINT `g1`
    FOREIGN KEY (`id_apl`)
    REFERENCES `som`.`application` (`id`),
  CONSTRAINT `g2`
```

```
FOREIGN KEY (`id_mod`)  
REFERENCES `som`.`model` (`id`),  
CONSTRAINT `g3`  
FOREIGN KEY (`id_area`)  
REFERENCES `som`.`sub_area` (`id`))  
ENGINE = InnoDB
```

Інші відношення використовуються для забезпечення цілісності та повноти функціонування системи.

4.3. Програмна реалізація системи для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу

На основі описаної в параграфах 4.1 та 4.2 архітектури програмного забезпечення реалізовано програмний комплекс для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу.

Оскільки функціонально система поділена між трьома групами користувачів, а саме між дослідником, адміністратором та простим користувачем, то робота із системою розпочинається із авторизації, копія вікна якої представлена на рисунку 4.26.

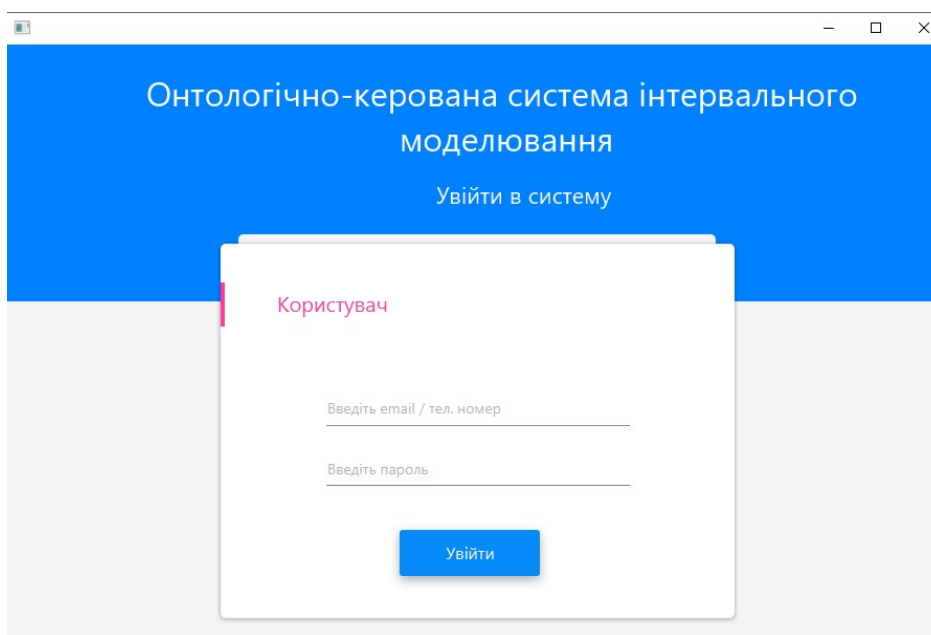


Рисунок 4.26 – Копія вікна авторизації

Після успішної авторизації, користувач попадає на головну сторінку системи (рисунок 4.27). Наявність відповідних функціональних можливостей залежить від групи конкретного авторизованого користувача.

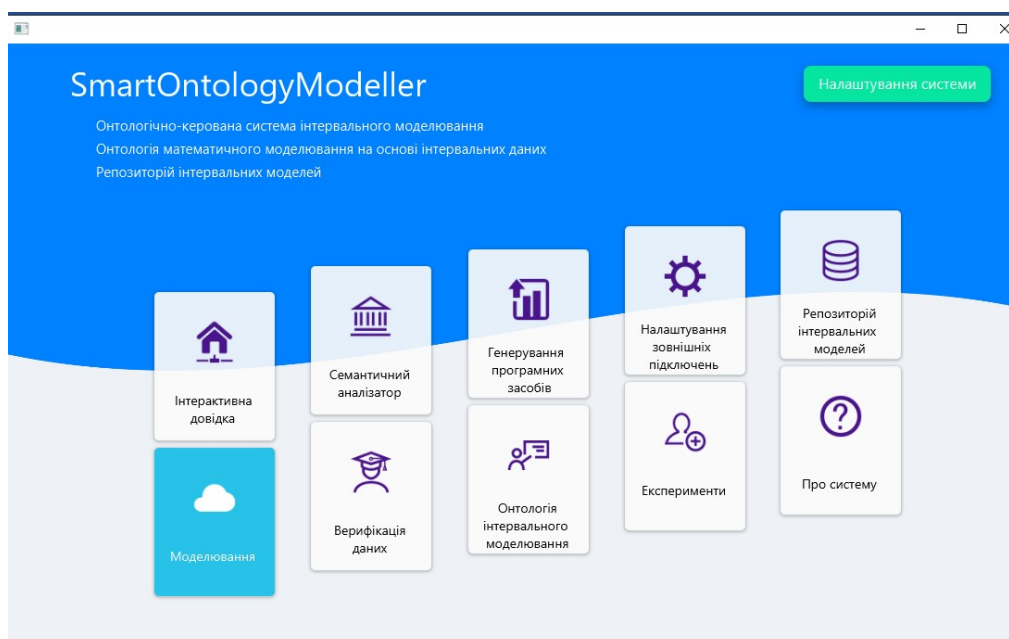


Рисунок 4.27 – Головне вікно програмного комплексу

Як видно із рисунка 4.27, то у користувача, який належить до групи дослідників є можливість скористатися наступними функціональними можливостями, перейти до яких можна при натисненні відповідної іконки, а саме:

«Моделювання» (рисунок 4.28) – можливість вибору структурної чи параметричної ідентифікації, вибір методу ідентифікації при параметричній ідентифікації, моделювання структури при структурній ідентифікації. При формуванні структури моделі у користувача є можливість скористатися репозиторієм інтервальних моделей та переглянути їх формалізоване представлення в онтологічній підсистемі і в подальшому використати цю інформацію для побудови нових моделей.

На основі накопиченої бази експериментальних даних в системі реалізовано можливість здійснити процедуру інтервального моделювання за заданими параметрами, яку програмного реалізовано за допомогою Python інтерпретатора Jython.

В даному середовищі є можливість використовувати як готові програмні бібліотеки, так і генерувати власні з подальшим використанням при генерації інших спеціалізованих інструментальних засобів.

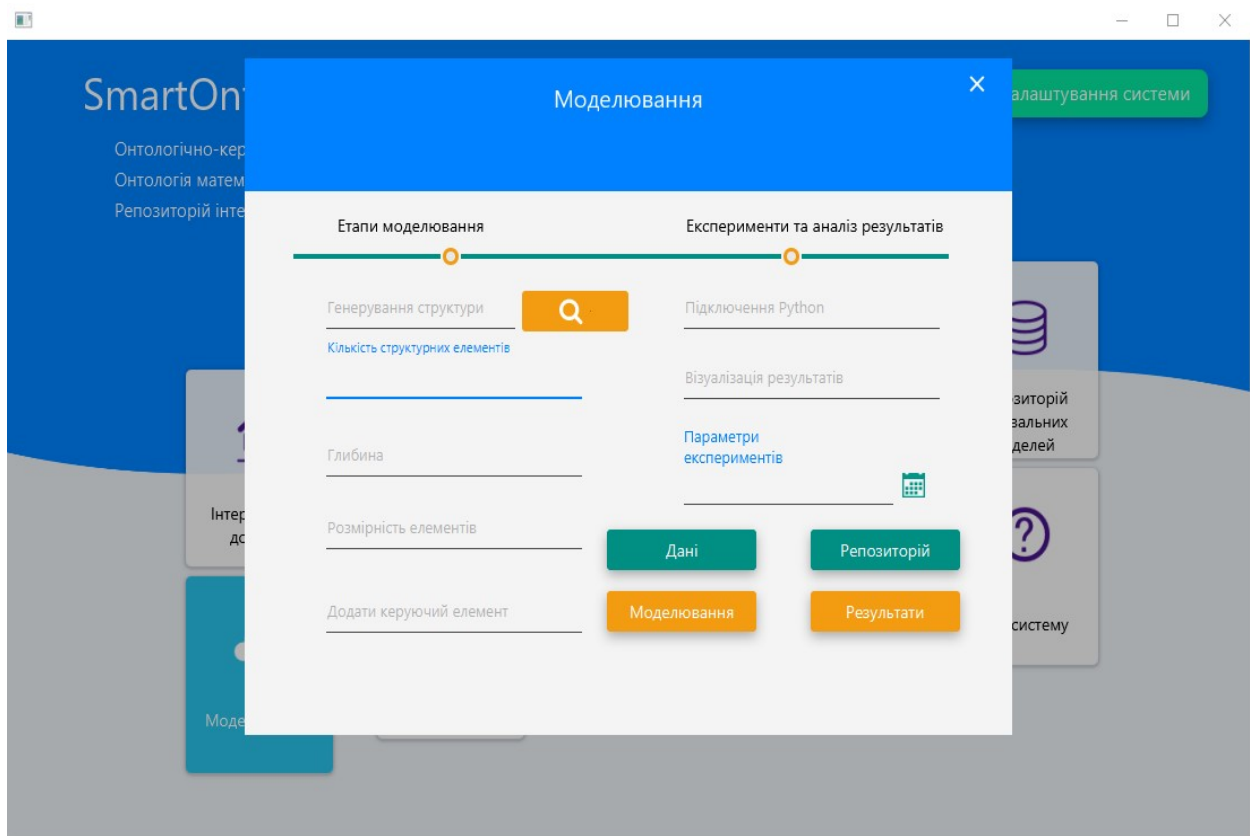


Рисунок 4.28 – Налаштування процедури моделювання інтервального різницевого оператора

«Верифікація даних» – у користувача є можливість здійснити процедуру оцінки достовірності інформації, яка аналізується в процесі забезпечення повноти структури моделі та формалізованого опису об'єкта моделювання.

«Онтологія інтервального моделювання» – у користувача є можливість переглянути онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу, уточнити онтологічний опис, переглянути онтологічний опис предметної області з використанням візуального графового представлення, фрагмент якого представлено на рисунку 4.29.

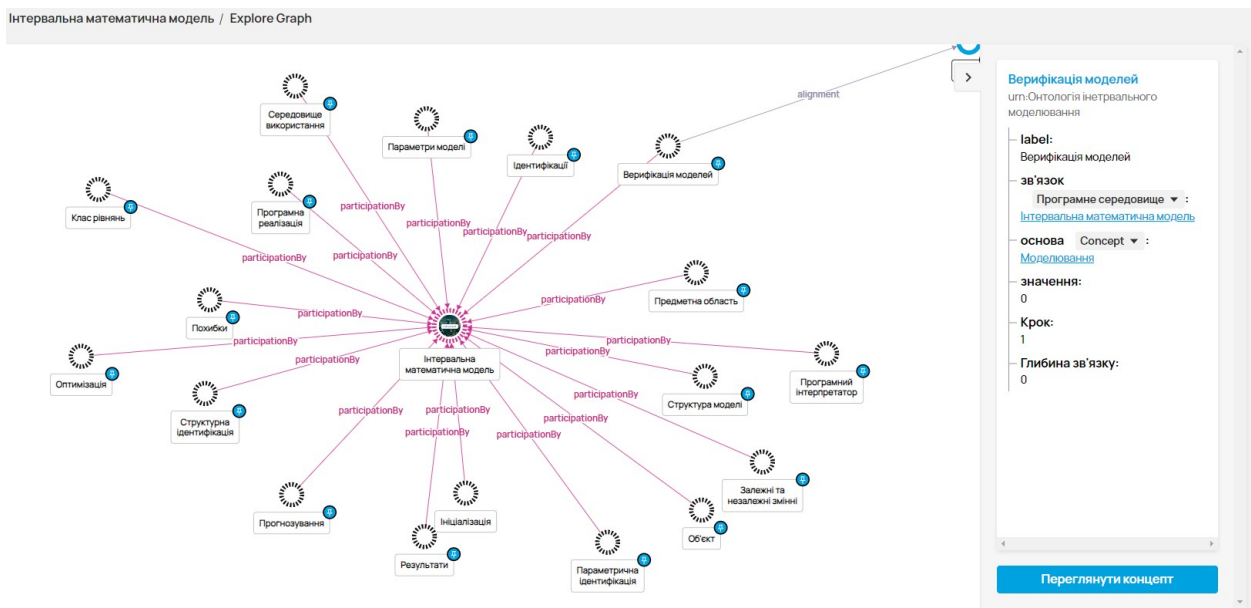


Рисунок 4.29 – Представлення фрагмента онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу у формі онтологічного графа

«Семантичний аналізатор» використовується для накопичення та аналізу даних, які використовуються при побудові інтервальних математичних моделей, їх онтологічного опису та проведення відповідних експериментальних досліджень. Семантичний аналізатор використовується також в підсистемі «Генерування програмних засобів» в якості інструментарію для контролю та верифікації програмної інтерпретації онтологічних описів та відповідних методів маніпулювання даними.

«Генерування програмних засобів» – користувач може згенерувати інструментальний засіб для математичного моделювання в межах вибраної предметної області, заповнивши для цього відповідну форму.

Генерування інструментального засобу здійснюється автоматично на основі програмної інтерпретації семантично-узгоджених онтологічних описів та комбінування відповідних операцій.

Приклад формування запиту на створення інструментального засобу та відповідний результат генерування представлено на рисунку 4.30. Згенерований інструментальний засіб функціонує як окремий, програмно-незалежний від головної системи сервіс і може використовуватися спеціалістами в обраній прикладній предметній області, які одночасно не є фахівцями в галузі математичного моделювання на основі інтервального підходу.

Ця функція є досить зручною з практичної точки зору, оскільки також дозволяє залучати спеціалізованих фахівців до тестування згенерованих засобів.

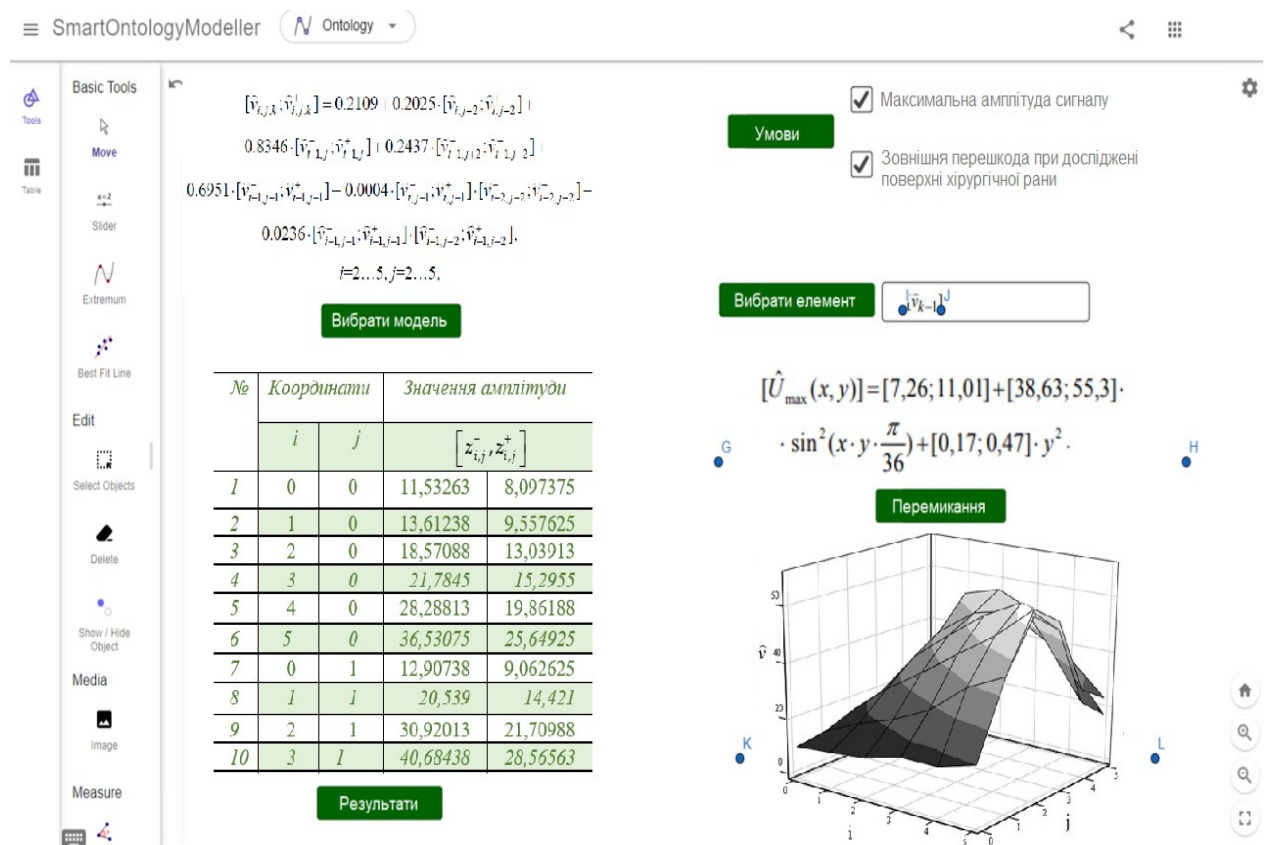


Рисунок 4.30 – Приклад генерації інструментального засобу для моделювання розподілу максимальної амплітуди інформаційних сигналів

«Репозиторій інтервальних моделей» (рисунок 4.31) – дозволяє переглянути базу побудованих інтервальних математичних моделей, на основі вказаних семантичних фільтрів, у користувача є можливість вибрати модель і в подальшому її використати як для проведення експериментальних досліджень, так і в якості основи для генерування відповідних інструментальних засобів для математичного моделювання складних об'єктів різноманітного призначення.

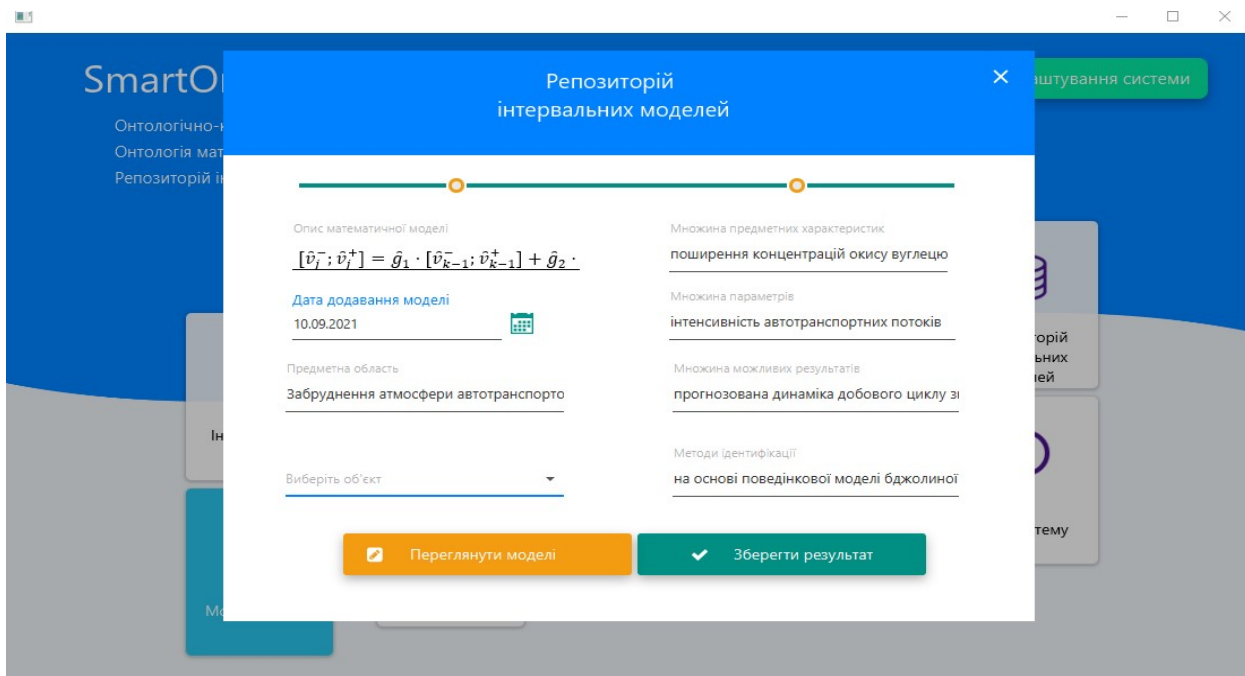


Рисунок 4.31 – Репозиторій інтервальних моделей

«Налаштування зовнішніх підключень» (рисунок 4.32) – у користувача є можливість підключитися до зовнішніх систем, зокрема, до систем автоматизації математичних розрахунків, систем моделювання, систем, дані з яких можуть використовуватися для накопичення бази даних експериментальних досліджень.

У даній підсистемі також є можливість підключити зовнішні програмні інтерпретатори формалізованих математичних описів, які

використовують різноманітні технології програмування та взаємодіють з різними базами даних, включаючи також протоколи обміну даними (MatLab, Python math Module, Math.NET Numerics).

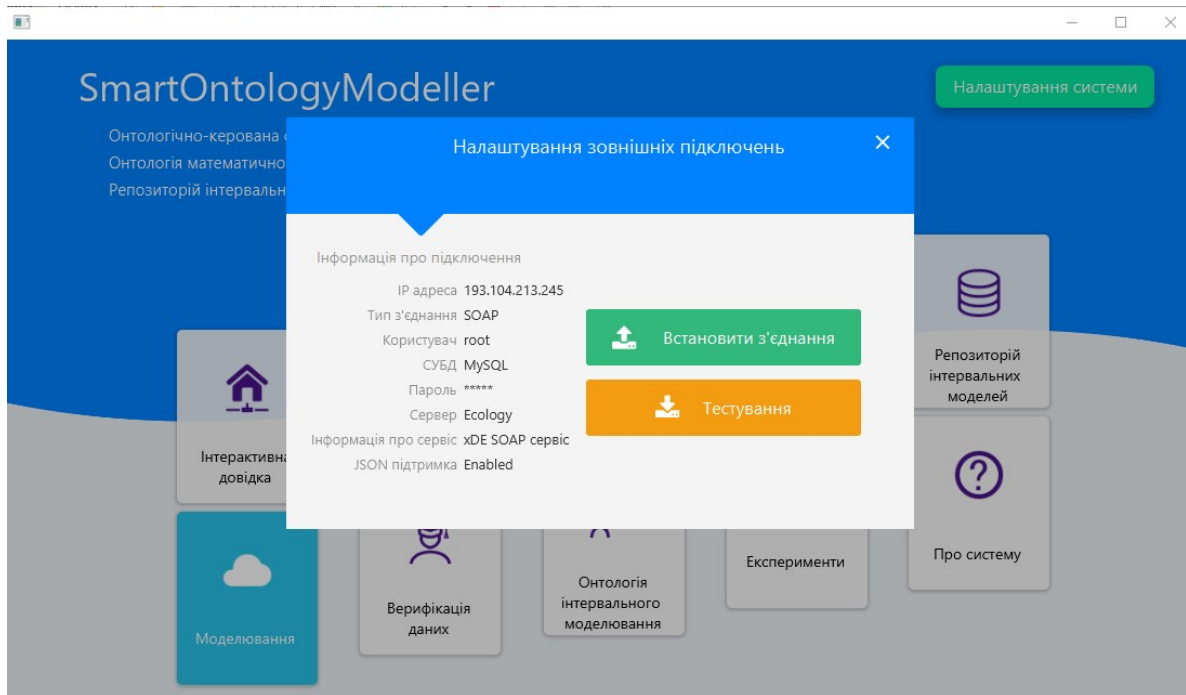


Рисунок 4.32 – Налаштування зовнішніх підключень

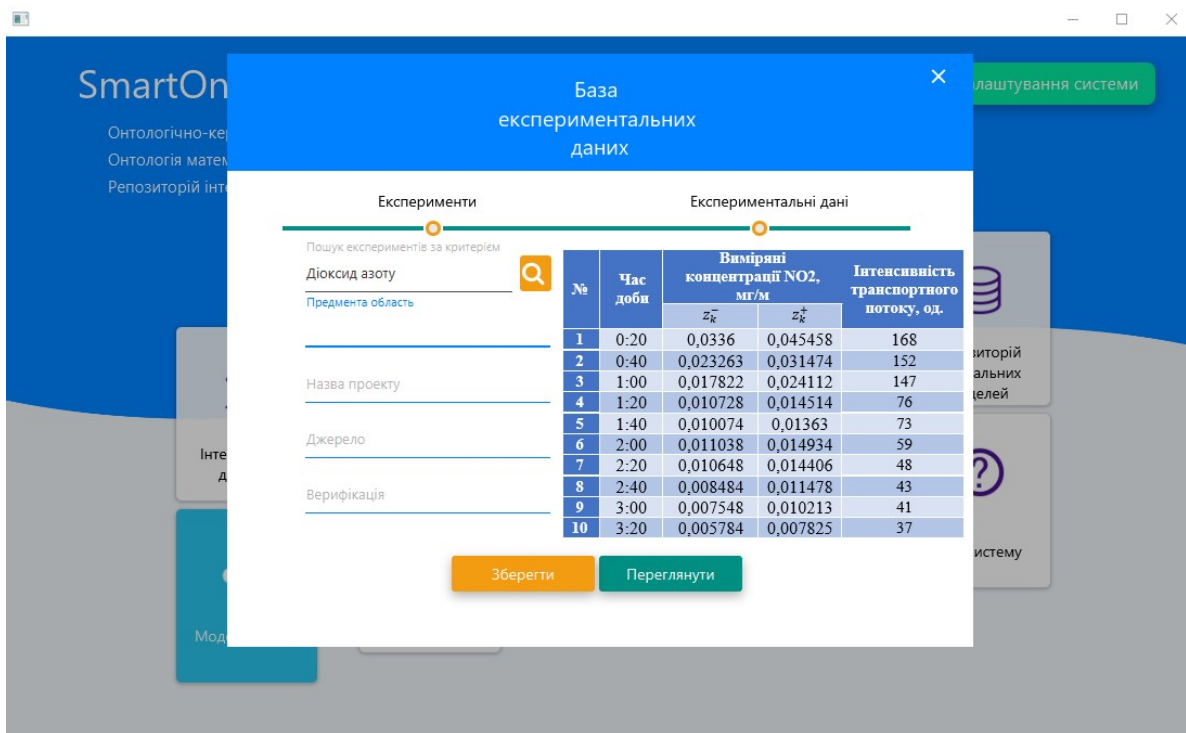


Рисунок 4.33 – База експериментальних даних

«Експерименти» – у користувача є можливість накопичувати власну базу експериментальних досліджень, поповнювати її із зовнішніх інформаційних систем та використовувати в процесі побудови математичних моделей.

«Інтерактивна довідка» – використовується користувачами для отримання інформації про особливості використання програмного комплексу для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходу.

Інтерактивна довідка також включає детальні інструкції з прикладами побудови інтервальних математичних моделей та є обов'язковим інтегрованим модулем в процесі генерації спеціалізованих інструментальних засобів. На рисунку 4.34 представлено копію вікна із можливістю перегляду інформації з інтерактивної довідки.

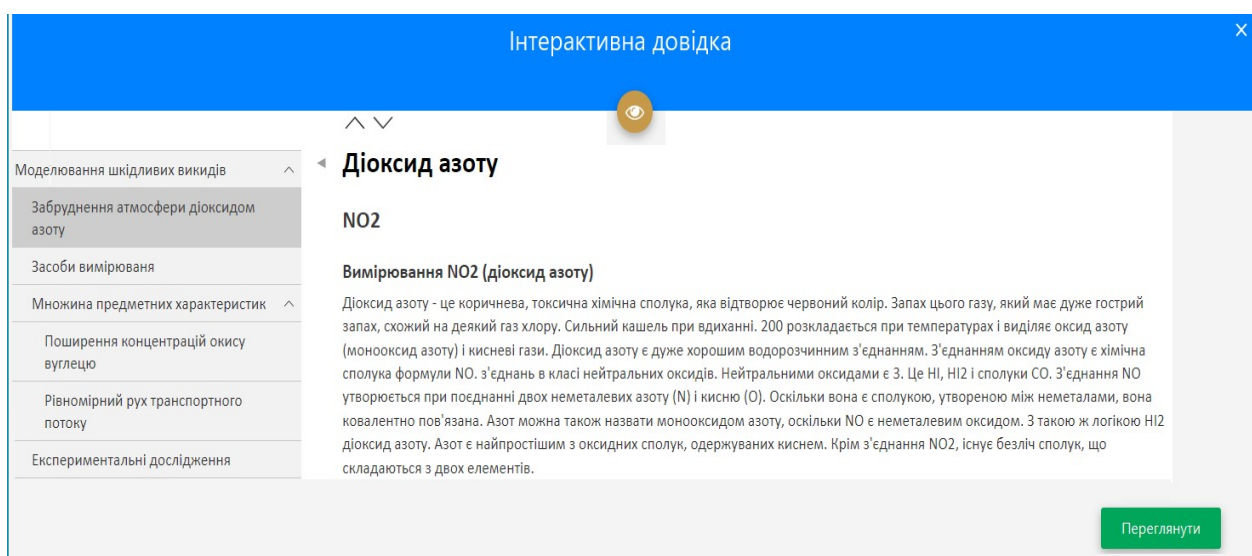


Рисунок 4.34 – Копія вікна «Інтерактивна довідка»

«Про систему» (рисунок 4.35) – є можливість переглянути інформацію про поточну версію системи, відомості про розробників, та можливість здійснити процедуру перевірки наявності оновлень.

Таким чином представлено особливості побудови архітектури програмного забезпечення для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу. Описано технологію створення програмного забезпечення на основі розробленої онтологічної надбудови для математичного моделювання з використанням інтервальних даних для різних об'єктів, а також різних форм реалізації інтерфейсу користувача.

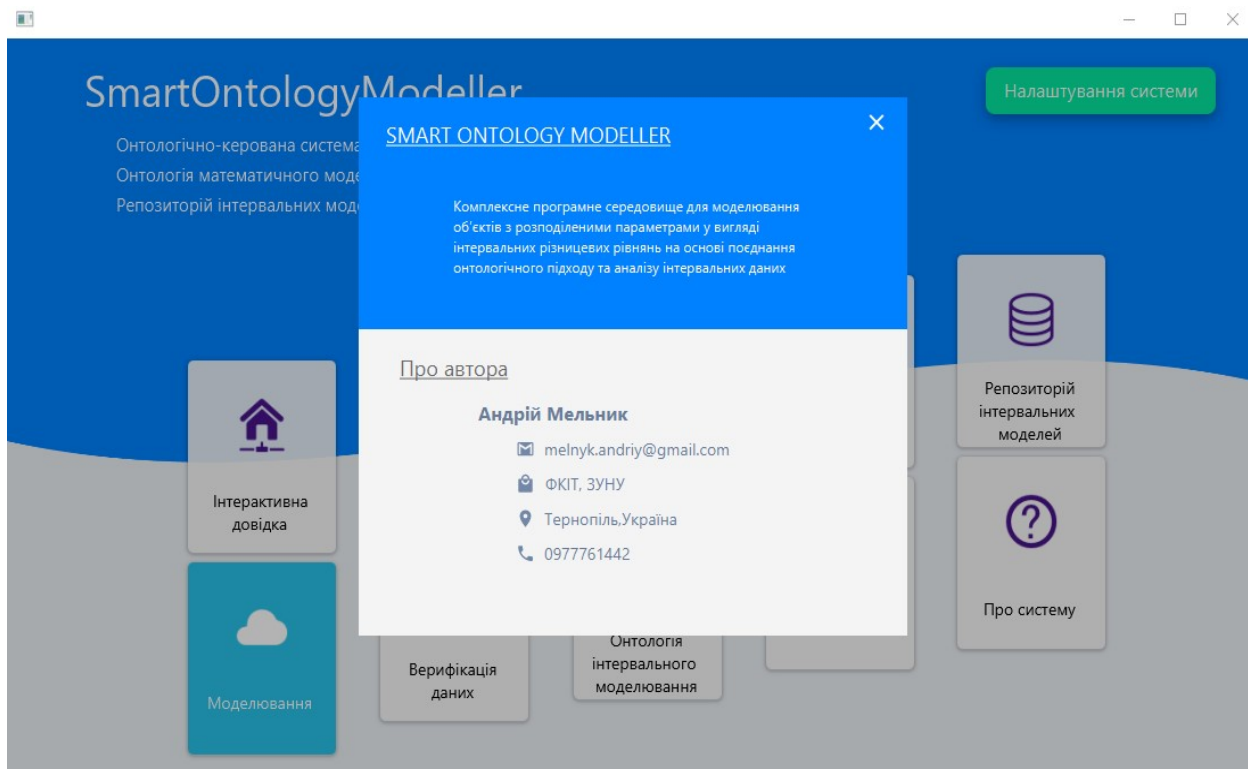


Рисунок 4.35 – Копія вікна «Про систему»

4.4. Онтологія як програмна надбудова до системи для математичного моделювання на основі інтервальних даних

Процеси математичного моделювання складаються з великої кількості процедур, які переважно реалізовані у відповідних інструментах, тобто у вигляді певних програмних систем [157]. Прикладами таких програмних середовищ є Matlab, GNU Octave, Scilab, SageMath. Ці інструменти є багатофункціональними і добре розробленими. Однак практикам часто потрібно використовувати більш спеціалізовані інструменти для побудови математичних моделей, а також адаптувати існуючі інструменти до нестандартних умов, які відсутні у зазначених середовищах використання.

У цьому випадку виникають труднощі у використанні та інтерпретації таких інструментів, оскільки процедури моделювання приховані від дослідника, а це ускладнює їх використання шляхом внесення відповідних програмних змін [157, 160]. За цих умов найбільш доцільним рішенням є розробка онтологічного опису окремих методів математичного моделювання. У ньому детально описані компоненти процесу побудови моделі та її застосування. Потім цей онтологічний опис використовується для розробки відповідного програмного забезпечення. Такий підхід, з одного боку, дозволить інтегрувати створене програмне забезпечення в різні прикладні системи, а з іншого – вносити зміни в існуюче програмне забезпечення [8, 43, 65, 107, 128, 143, 160].

Наявність онтологічних описів процесів моделювання на основі певних методів дає змогу уніфікувати програмне забезпечення для вирішення широкого кола завдань. Це дає можливість, на основі досвіду, створити репозиторій математичних моделей, які можна використовувати для моделювання широкого спектру математично подібних властивостей [42, 160].

Позитивним ефектом такого підходу буде значне спрощення процесу створення інструментів як для організації процесів моделювання, так і їх застосування до прикладних завдань. Потреба в автоматизованих, систематичних і багаторазових математичних моделях як середовища для отримання, накопичення та повторного використання знань цілком виправдана в контексті великої кількості інформації про знання, які формуються, зберігаються та постійно накопичуються.

На основі загального визначеного опису процесу моделювання на основі інтервального аналізу реалізовано онтологічну модель, яку детально описано у третьому розділі монографії, а особливості реалізації представлено у вигляді відповідної схеми (рисунок 4.1). Загальне представлення онтології містить два типи основних об'єктів:

- 1) представлення, які описують основні сутності;
- 2) представлення, які описують відношення між цими сутностями.

Загалом, немає обмежень для визначення відношень між сутностями в онтології. Відношення можуть мати визначену множину значень або бути нескінченними залежно від ситуації. Різні відношення використовуються для з'єднання загального опису при створенні конкретної онтологічної моделі.

Конкретні елементи онтології, зв'язок між якими описано за допомогою відповідних стрілок (властивості об'єкта онтології) між класами домену (верхня стрілка) і класами відповідного діапазону (кінець стрілки), де назва на конкретному рядку зображує тип відношення. Сутності будуть змодельовані як «об'єкти» у відповідних прямокутних. Властивість «is-a» пов'язує поняття з його екземплярами (фізичними інтерпретаціями).

У запропонованому онтологічному представленні клас «Модель» – це основний концептуальний клас, а «Опис», «Функція», «Процес», «Математична інтерпретація», «Репозиторій», «Завдання», «Сервіс», «Механізм», «Обмеження», «Об'єкт», «Протокол», «Дані» – це підкласи класу «Модель». Підкласи класу «Модель» були виокремлені в онтологічному представленні, щоб зробити онтологію простою і зрозумілою як для окремих дослідників, так і для розробників програмних систем.

На рисунку 4.36 представлено схему використання онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних для розробки та використання програмних засобів.

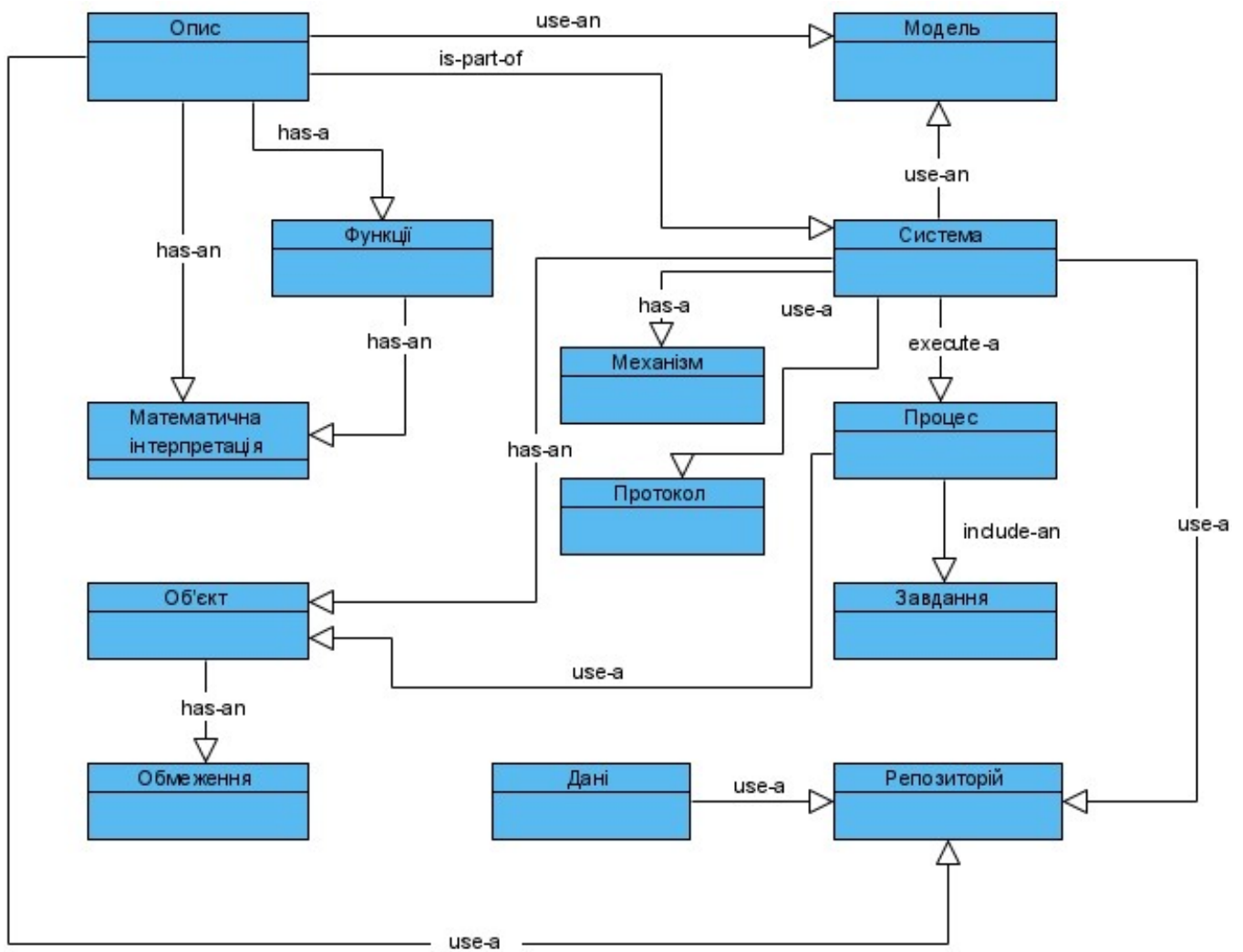


Рисунок 4.36 – Загальна схема використання онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних для розробки та використання програмних засобів

Онтологія предметної області – це онтологія, яка фіксує поняття, відношення та властивості про предметну область. Визначена онтологічна модель буде використана для представлення основних концептів математичного моделювання на основі інтервального аналізу в процесі реалізації програмного інструментарію.

Онтологія надає інформацію для розробників програмного забезпечення та архітекторів для полегшення процесу створення екземплярів архітектури програмної системи.

Вона описує також компоненти програмної архітектури, які допомагають розробникам програмного забезпечення та архітекторам знайти необхідні компоненти архітектури шляхом відстеження зв'язків між елементами онтології та особливостями їх відповідної інтерпретації в конкретній системі.

На рисунку 4.37 представлено основні етапи процесу розробки програмної системи математичного моделювання з використання онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу.

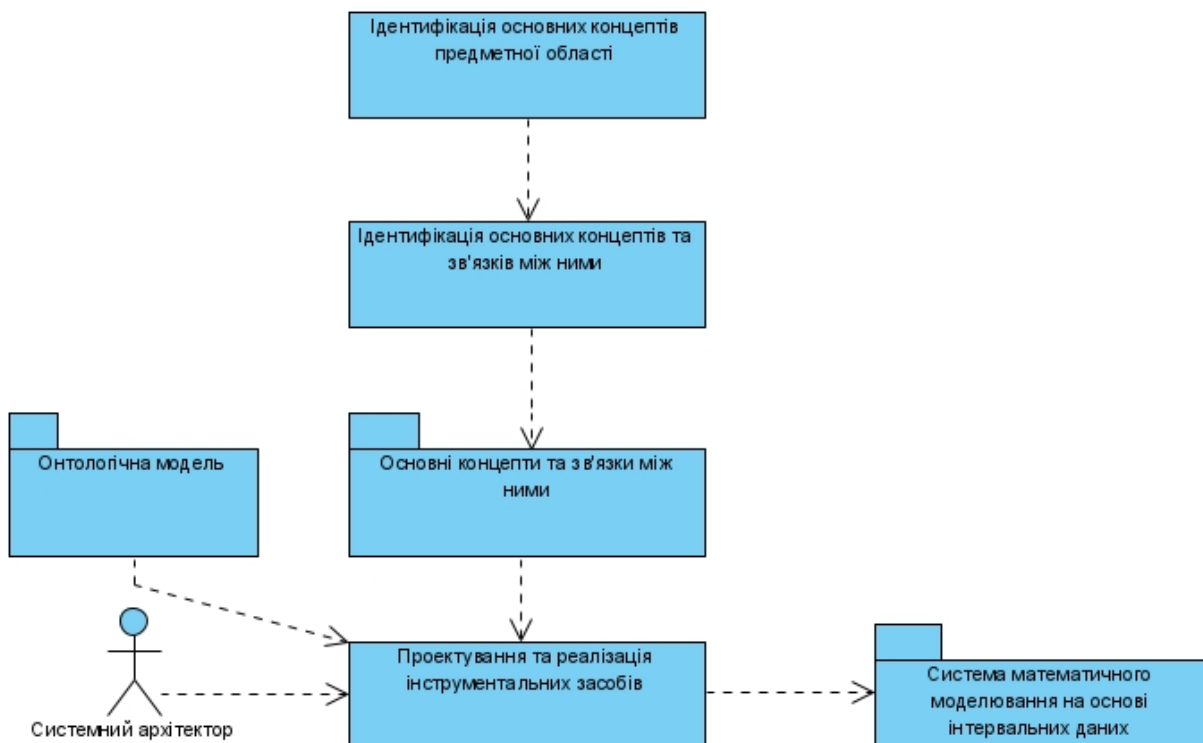


Рисунок 4.37 – Основні етапи процесу розробки програмної системи математичного моделювання з використання онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу

Процес розробки онтокерованої системи включає наступні кроки:

1) Визначення основних концептів предметної області. Першим кроком у процесі розробки програмного забезпечення з використанням конкретної онтологічної моделі для конкретної предметної області. Існують різні методи, які використовуються для отримання знань з джерел. Ці методи поділяються на три типи: ручні, такі як [143], напівавтоматичні, такі як [128] та автоматичні, такі як [98]. Результатом цього кроку є набір основних понять, які використовуються для опису математичного моделювання на основі інтервальних даних.

2) Визначення понять, які використовуються для опису компонентів предметної області.

3) Визначення екземплярів вилучених понять.

4) Визначення зв'язків між поняттями.

5) Визначення атрибутів понять.

6) Визначення обмежень, які описують умови та обґрунтування.

7) Конструкція системи математичного моделювання на основі інтервальних даних з використанням напрацьованої онтологічної моделі.

На останньому кроці детально пояснюється процес побудови системи. Така система є результатом поєднання загальної онтологічної моделі та описів досліджуваної предметної області, які використовуються для опису системи в цілому.

Системний архітектор, який проектує архітектуру, відіграє значну роль у визначенні основних складових. Системний аналітик предметної області має знання та досвід, які використовуються в процесі розробки системи. Однак ці знання та досвід не задокументовані в архітектурі, а вбудовані в її загальну концепцію.

Основна мета онтологічного представлення, як надбудови до програмної системи для моделювання на основі інтервального аналізу представляє собою набір множин, які використовуються для опису компонентів, зв'язків і обмежень в рамках досліджуваної предметної області в організований і структурований спосіб. Таке представлення також формує визначений набір понять та їх описових представлень для архітекторів і розробників програмного забезпечення. Онтологічні представлення допомагають архітекторам і розробникам програмного забезпечення, щоб знайти концепції, відстежуючи взаємозв'язки між ними.

Онтологія математичного моделювання на основі інтервальних даних спрямована на полегшення процесу розробки екземплярів архітектури програмної системи з онтокерованою взаємодією. На рисунку 4.38 представлено схему процесу використання розглянутої онтологічної моделі та її оновлення. Розглянемо детальніше кроки, які описують процес використання онтології.

Крок 1: Визначення користувача системи.

Крок 2: Визначення вимог до системи від користувачів.

Крок 3: Визначення можливої концепції та зв'язку між ними з вимог системи.

Крок 4: Порівняння вилучених понять з основними концепціями онтології.

Якщо концепції онтології відповідають визначеним поняттям, то визначаємо інші концепції, простеживши взаємозв'язки ідентифікованих понять. Для перевірки узгодженості між основними та суміжними поняттями використовується техніка онтологічного міркування [65].

Якщо концепції онтології не перекривають досліджувану предметну область, то виконуємо наступну послідовність кроків:

- визначаємо нове поняття;
- визначаємо екземпляри нового поняття, які будуть представлені як індивіди в онтології;
- визначаємо атрибути нових понять, які будуть представлені як властивості даних в онтології;
- визначаємо обмеження для нових понять;
- оновлюємо загальну онтологічну модель, додавши нові концепції до існуючої з її атрибутами, екземплярами, зв'язками та обмеженнями. Розробник онтології оновлює її, додавши нові концепції та визначивши відношення між ними.

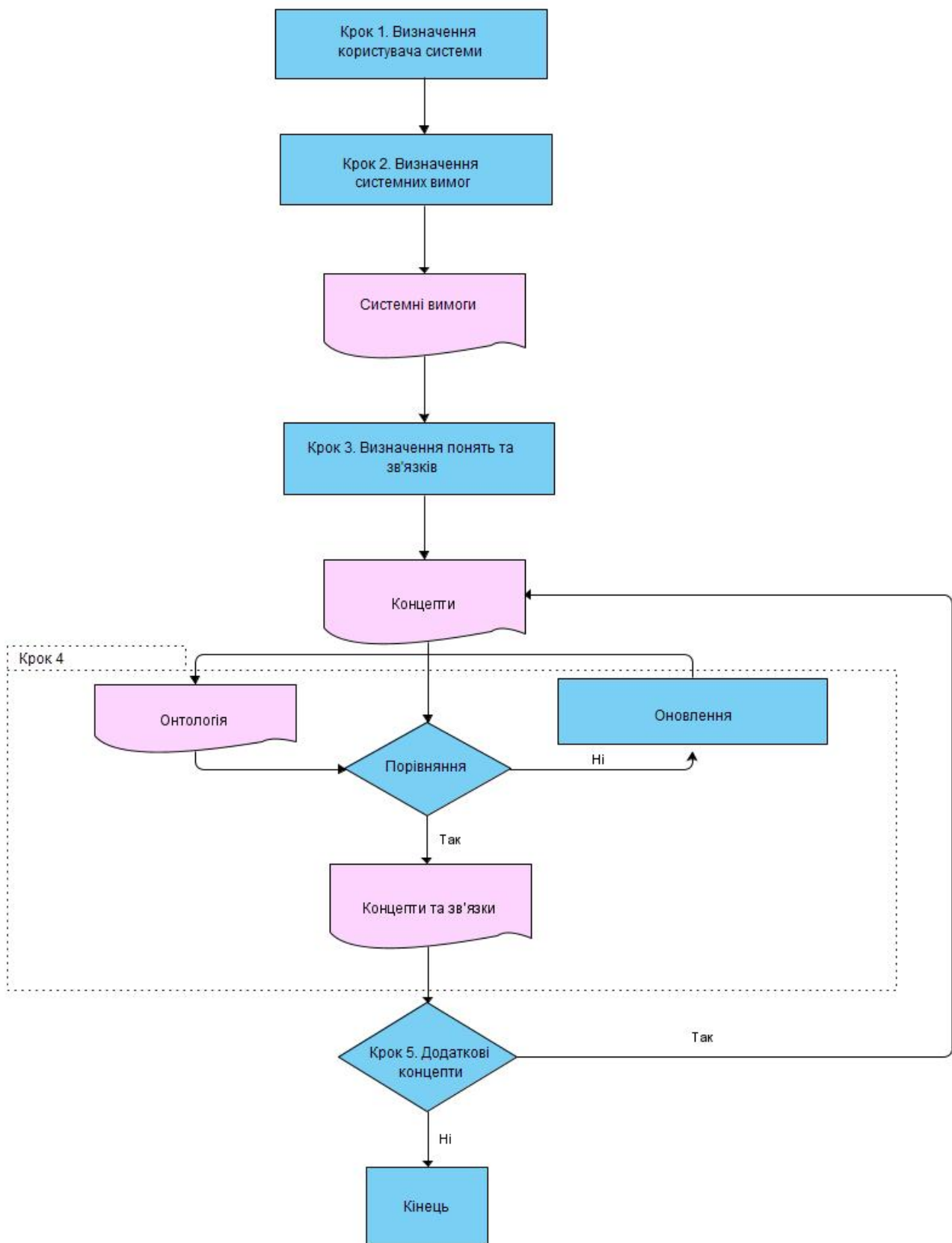


Рисунок 4.38 – Загальна схема використання онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних та її оновлення

Крок 5: Повторюємо крок 4 до того моменту, поки не розглянемо всі поняття, включаючи їх опис та відповідні зв'язки.

Розглянемо приклад, який ілюструє процес імплементації онтології математичного моделювання на основі інтервального аналізу для моделювання динаміки концентрацій шкідливих викидів оксиду вуглецю на певній території міста та існуючого сховища подібних моделей, схему застосування методу вибору математичної моделі для моделювання на основі інтервальних даних і те, як онтологія надає опис основних понять досліджуваної предметної області розробникам системи.

Запропонований процес використання онтологічної моделі був апробований для проектування та реалізації веб-орієнтованої програмної системи для моделювання шкідливих викидів. Дослідник проаналізував предметну область, переглянувши її, щоб виділити основні концепти та зв'язки між ними. Розглянемо цей процес детальніше.

Система містить вісім основних підсистем, кожна з яких має різні функції. Такими підсистемами є інтерфейс користувача, механізм моделювання, механізм візуалізації, збереження даних, мережа, інтерпретатор математичних команд, семантичний аналізатор і репозиторій математичних моделей.

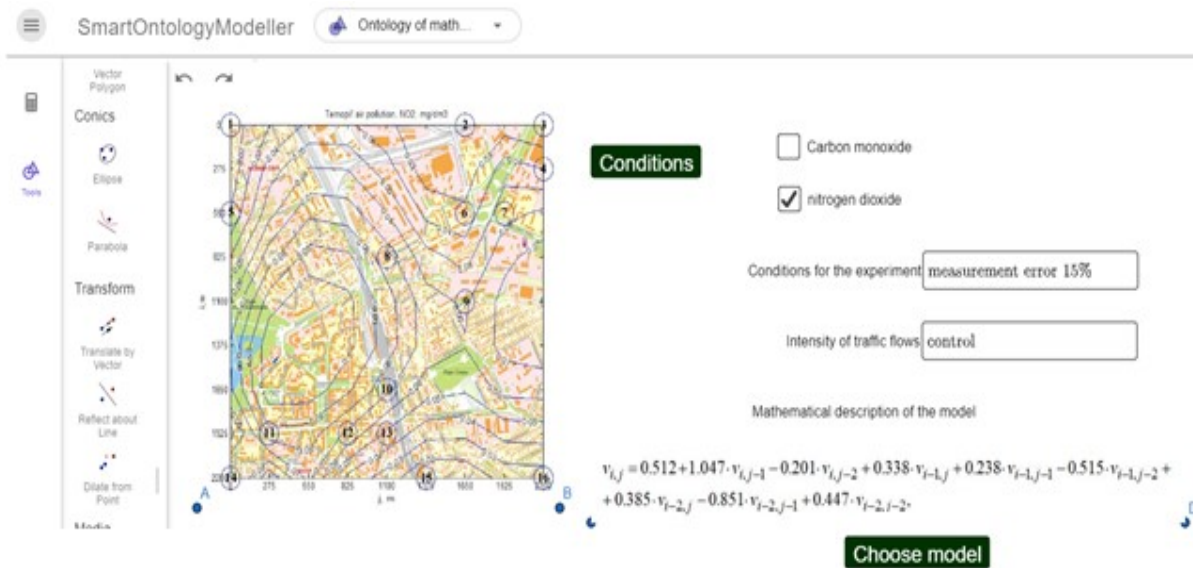


Рисунок 4.39 – Система для моделювання шкідливих викидів оксиду вуглецю на певній території міста

Рисунок 4.39 ілюструє систему для моделювання шкідливих викидів оксиду вуглецю на певній території міста.

Підсистеми використовують різні ресурси:

- Користувачі запускають систему на різному обладнанні, такому як комп'ютери та мобільні пристрої.

- Користувачі використовують різні протоколи передачі даних для доступу до системи моделювання на основі інтервального аналізу.

- Для представлення архітектури системи використовується багатoshаровий архітектурний стиль.

- Система використовує інтерпретатор математичних команд та семантичний аналізатор для вибору математичних моделей з відповідного репозиторію.

Зв'язок між підсистемами:

А. Підсистема інтерфейсу користувача підключається до підсистеми з репозиторієм математичних моделей, підсистеми моделювання, і підсистеми збереження та візуалізації даних.

В. Підсистема з інтерпретатором математичних команд підключається до репозиторію математичних моделей, механізму моделювання та візуалізації даних.

С. Підсистема семантичний аналізатор підключається до мережі та репозиторію математичних моделей і підсистеми візуалізації результатів отриманих в процесів математичного моделювання у формі відповідних графіків, таблиць та діаграм.

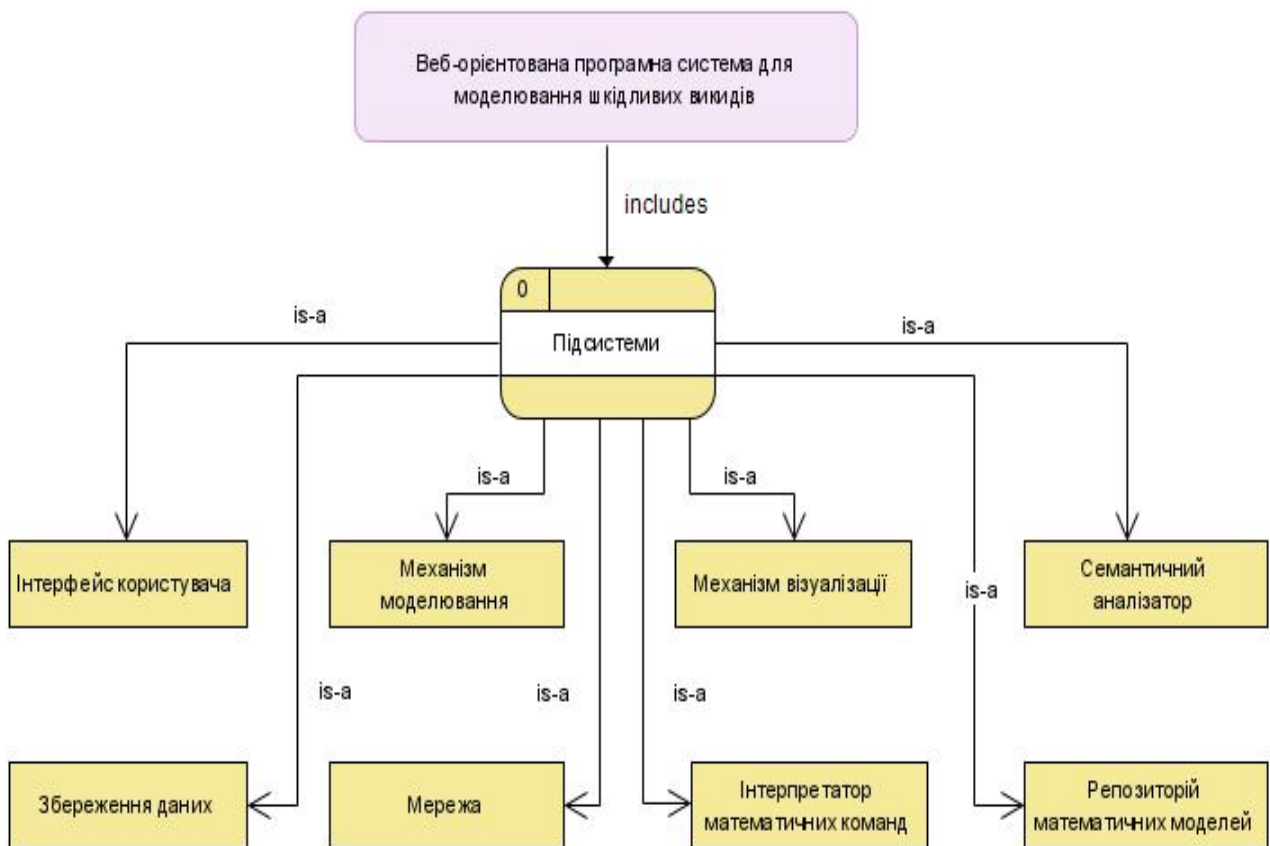


Рисунок 4.40 – Архітектура програмної системи для моделювання шкідливих викидів оксиду вуглецю на певній території міста

Розглянемо детальніше функції підсистем системи для моделювання шкідливих викидів оксиду вуглецю на певній території міста:

А. Функціями підсистеми «Інтерфейс користувача» (рисунок 4.41) є:

1 – Підключення користувача до підсистеми математичного моделювання.

2 – Надає такі функції, як панель інструментів для вибору та налаштування математичних моделей, візуальний прогрес моделювання, візуалізація результатів моделювання, опрацювання та завантаження даних для експериментальних досліджень, налаштування та друк.

В. Функціями підсистеми «Механізм моделювання» є:

1 – Забезпечення інтерфейсу високого рівня до підсистеми механізму моделювання.

2 – Завантаження репозиторію з математичними моделями.

3 – Підтримка процесу налаштування параметрів моделі.

4 – Забезпечення перемикання для перегляду сеансу моделювання.

5 – Реалізація запитів та маніпуляції з налаштуваннями механізму моделювання.

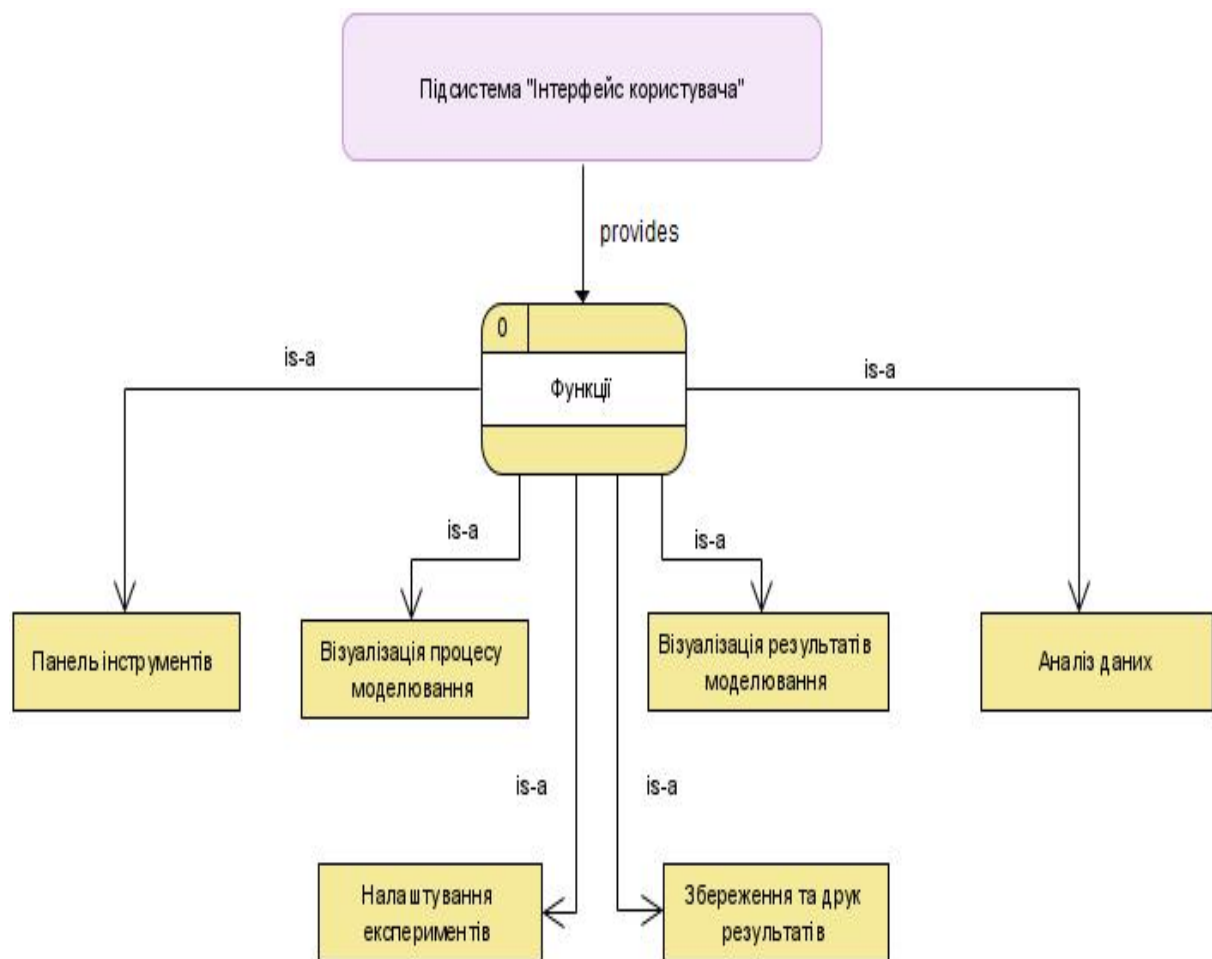


Рисунок 4.41 – Особливості підсистеми інтерфейсу користувача

С. Функціями підсистеми «Механізм візуалізації» є:

1 – Створення візуального представлення вибору параметрів візуалізації процесу та відображення результатів моделювання.

2 – Відображення різноформатних файлів для збереження результатів моделювання.

3 – Розрахунок точного макету результатів моделювання.

Д. Функціями підсистеми «Мережі» є:

1 – Реалізація протоколів передачі файлів, такі як HTTP і FTP.

2 – Опрацювання кешу нещодавно отриманих ресурсів.

Е. Функція підсистеми «Семантичний аналізатор»:

1 – Інтерпретація семантичних інструкцій в програмні команди відповідного засобу.

Ф. Функція підсистеми «Збереження даних»:

1 – Можливість вибору типів файлів для збереження результатів моделювання.

Г. Функціями підсистеми «Репозиторій математичних моделей» є:

1 – Семантично–інтерпретоване відображення множини математичних моделей для вибраної предметної області конкретного об'єкту моделювання.

2 – Вибір моделей.

3 – Інтерпретація моделей в зовнішнє середовище моделювання.

Н. Функція підсистеми «Збереження даних»:

1 – Зберігання різних даних, які пов'язані з сеансом математичного моделювання.

Виходячи із наведеного вище аналізу можна отримати онтологічний концептуальний словник системи математичного моделювання на основі інтервальних даних для моделювання шкідливих викидів оксиду вуглецю, фрагмент якого представлений в таблиці 4.1.

У таблиці 4.2 представлено можливі типи зв'язків між цими об'єктами, що дозволяє встановити відповідні залежності для їх подальшого аналізу та використання.

Таблиця 4.1 – Поняття, які описують об'єкти програмної системи моделювання на основі інтервального аналізу

Словник			
Математичне моделювання	Механізм моделювання	Інтерпретатор математичних команд	Репозиторій математичних моделей
Візуалізація результатів моделювання	Мережа	Семантичний аналізатор	Аналізатор даних
Формат даних	Типи файлів	Інтерпретація семантичних інструкцій	Сеанс моделювання
Збереження даних	Параметри моделі	Методи ідентифікації	Об'єкт моделювання

Таблиця 4.2 – Можливі типи зв'язків між концептами програмної системи моделювання на основі інтервального аналізу

Словник			
Доступ до	Дозволити	Застосувати	Розрахувати
Підключитися до	Показати	Оцінити	Виконати
Має	Реалізує	Включає	Завантажує
Опрацьовує	Виробляє	Надає	Надає функцію для
Представлений як	Зберігає в	Підтримує в	Використовується
Підключений до	Виконати з	Використати з	Зберегти до

Використовуючи дані, які представлені в таблиці 4.1 та 4.2 можна побудувати онтологічний граф залежностей між поняттями для досліджуваної предметної області. Таке використання онтології дозволяє спростити процес використання системи як окремими дослідниками в галузі математичного моделювання, так і розробниками програмного забезпечення, які будуть в подальшому масштабувати та розширювати функціонал програмного комплексу.

Висновки до розділу 4

1. Описано архітектуру програмного комплексу для математичного моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу. За допомогою UML діаграм активностей базових процесів, Use-case діаграми системи, діаграм послідовності, діаграм діяльності, діаграми комунікації, діаграми класів, діаграми компонентів програмного комплексу, діаграма розгортання сформовано основні вимоги до програмного комплексу. Такий підхід дозволив значно спростити процес розробки та використання напрацьованої бази математичних моделей для дослідження складних об'єктів в різних предметних областях.

2. Описано особливості реалізації програмного комплексу, зокрема використано об'єктно-орієнтований підхід до програмування, з 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.

3. Онтологічний підхід програмно імплементовано до формалізації як самих математичних моделей на основі інтервальних даних, так і формалізації особливостей їх використання. Такий підхід дозволяє 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.

РОЗДІЛ 5

ПРИКЛАДИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ

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

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. На основі онтології математичного моделювання на основі інтервальних даних, а також реалізованого програмного комплексу для математичного моделювання на основі інтервального та онтологічного підходів побудовано репозиторій інтервальних

математичних моделей для виявлення зворотного гортанного нерва та наведено приклади генерації відповідних інструментальних засобів.

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 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.

Досліджено ефективність застосування розроблених методів для розв'язування низки досліджуваних прикладних задач.

5.1. Інтервальна модель для візуалізації зворотного гортанного нерва при проведенні операції на щитовидній залозі

Зазначена задача описана у другому розділі. Але на відміну від описаного випадку, в цьому розділі математичну модель представлено у вигляді різницевого рівняння.

Отже, хірургічні втручання на різних органах людини часто вимагають класифікації та розпізнавання типів тканин операційної рани. Найчастіше хірургу доводиться виявляти нервову тканину на тлі м'язової і сполучної, щоб уникнути пошкодження. Пошкодження нервової тканини може бути фатальним для роботи інших органів людини. Однією з таких тканин є зворотний гортанний нерв (ЗГН). Його виявлення та відповідна локалізація проводиться під час операції на шиї або при видаленні пухлини щитовидної залози [30, 37, 44, 50].

Засобом моніторингу процесу даної операції є різноманітні нейромонітори, які відстежують проходження сигналів через ЗГН і у разі зникнення сигналу сигналізують хірурга про наявність ушкодження. Однак такий підхід є неефективним, оскільки констатує факт заподіяння шкоди.

Тому важливо не тільки встановити факт проходження сигналу через нервову тканину, а й класифікувати ділянки цієї тканини, змодельовати і передбачити можливе розташування цієї тканини і

таким чином уникнути пошкодження. Такі методи виявлення, засоби виявлення та відповідні інформаційні технології описані в ряді робіт, зокрема в [30, 50, 52, 152].

Однак класифікація тканин певною мірою дає можливість виявити розташування ЗГН, але не допомагає хірургу передбачити відстань від місця операції до нервової тканини. Технологія вирішення даної задачі наведена в [30, 50, 52, 152].

У цьому випадку технологія заснована на математичних моделях, які представляють поверхню операційного місця як об'єкт з розподіленими параметрами. У кожній точці подразнення операційної рани змінним або імпульсним струмом спостерігаються різні електрофізіологічні властивості тканин. Після серії подразників можна ідентифікувати цю модель – як об'єкт з розподіленими параметрами. Тоді така математична модель буде придатна для прогнозування електрофізіологічних властивостей тканин у будь-якій точці операційної рани.

Останнім часом технологія визначення локалізації ЗГН під час операції на щитовидній залозі використовує інтервальні різницеві рівняння. Підлаштувати їх під конкретного пацієнта легше ніж алгебричні рівняння (другий розділ), оскільки в процесі операції достатньо вибрати одну з раніше побудованих моделей для оперованих пацієнтів і налаштувати різницеву схему для поточного

пацієнта. Для цього хірургу достатньо провести кілька подразнень тканин операційної рани імпульсним струмом силою до 2 мА.

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. Також нехай результати цих стимулів отримали характеристики інформаційного сигналу в інтервальному вигляді [50, 152]. Тоді результати цих подразників представлені наступним чином:

$$[z_{i,j}] = [z_{i,j}^-, z_{i,j}^+], i = 1, \dots, I, j = 1, \dots, J, [z_0(i, j)] \in [z_{i,j}^-, z_{i,j}^+], \quad (5.1)$$

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 тканини операційної рани;

У формулі (5.1) враховуються основні похибки технічних або інших засобів. Модель ідентифікації ЗГН розглядається як дискретне рівняння, тобто різницеве рівняння у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_{i+1,j+1}] &= [\hat{v}_{i+1,j+1}^-; \hat{v}_{i+1,j+1}^+] = \\ &= \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{i,j}]) \cdot \hat{g}, \end{aligned} \quad (5.2)$$

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

де \hat{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 (5.1) гарантування точності математичної моделі в межах точності основного експерименту, ІРР (5.2) буде налаштовано за вказаним критерієм:

$$[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] \subset [z_{i,j}^-; z_{i,j}^+], \quad \forall i = 1, \dots, I, \quad \forall j = 1, \dots, J, \quad (5.3)$$

Підставляючи у формулу (5.3) іншу рекурентну формулу (5.2) замість інтервальних оцінок $[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+]$, отримуємо інтервальну

систему нелінійних алгебраїчних рівнянь із визначеними значеннями інтервалу:

$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_{0,0}^-; \hat{v}_{0,0}^+] \subseteq [z_{0,0}^-; z_{0,0}^+]; \\ \vdots \\ [\hat{v}_{d,d}^-; \hat{v}_{d,d}^+] \subseteq [z_{d,d}^-; z_{d,d}^+]; \\ z_{d+1,d+1}^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{i,0}], \dots \\ \dots, [\hat{v}_{d,d}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g} \leq z_{d+1,d+1}^+; \\ \vdots \\ z_{I,J}^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,j}], \dots, [\hat{v}_{i,0}], \dots \\ \dots, [\hat{v}_{I,J-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{g} \leq z_{I,J}^+; \\ i = d + 1, \dots, I, j = d + 1, \dots, J, k = 0, \dots, K \end{array} \right. \quad (5.4)$$

На відміну від лінійного випадку у такій системі представлені нелінійні параметри. Для її ідентифікації використано метод, заснований на моделі поведінки штучної бджолиної колонії [44, 152].

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, побудовану в [152]. На рисунку 5.1 наведено частину даних, отриманих при хірургічному втручанні на щитовидній залозі.

Номер	Координата	Координата	Інтервальні значення
	i	j	$[z_{i,j}]$
1	0	0	[0,58 ; 0,92]
2	0	1	[0,45 ; 0,54]
3	0	2	[0,39 ; 0,44]
...
24	4	3	[0,025 ; 0,034]
25	4	4	[0,016 ; 0,025]

Рисунок 5.1 – Фрагмент набору значень амплітуди спектральних компонентів

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

$$\begin{aligned}
 [\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] = & -0.0161 + 0.503 \cdot [\hat{v}_{i,j-2}^-; \hat{v}_{i,j-2}^+] + \\
 & + 0.2145 \cdot [\hat{v}_{i-1,j}^-; \hat{v}_{i-1,j}^+] + 0.7969 \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] + \\
 & + 0.6344 \cdot [\hat{v}_{i-1,j-1}^-; \hat{v}_{i-1,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+] \cdot [\hat{v}_{i,j-1}^-; \hat{v}_{i,j-1}^+], \\
 & i = 1 \dots 4, j = 2 \dots 4
 \end{aligned} \quad (5.5)$$

де $[\hat{v}_{i,j}^-; \hat{v}_{i,j}^+] \subset [z_{i,j}^-; z_{i,j}^+] = [z_{i,j} - z_{i,j}, 0,02; z_{i,j} + z_{i,j}, 0,02]$ і $\{i=0, j=0, \dots, 4\}$
 $\{i=0, j=0, \dots, 4\} \vee \{i=0, \dots, 4, j=0, 1\}$ – 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 [37].

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.

На рисунку 5.2 представлено приклад реалізації онтології інтервальної математичної моделі для задачі візуалізації зворотного гортанного нерву під час операції на щитовидній залозі в середовищі SmartOntologyModeller.

Для практичного використання інтервальних моделей із репозиторію було згенеровано відповідний інструментальний засіб, який представлено на рисунку 5.3. Даний інструмент дозволяє перемикає вибором моделі, враховуючи зміни стану середовища, чи умови отримання інтервальних даних.

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 знизити час на побудову самої моделі, що підтвердило зниження обчислювальної складності при побудові інтервальних математичних моделей для даного класу складних об'єктів.

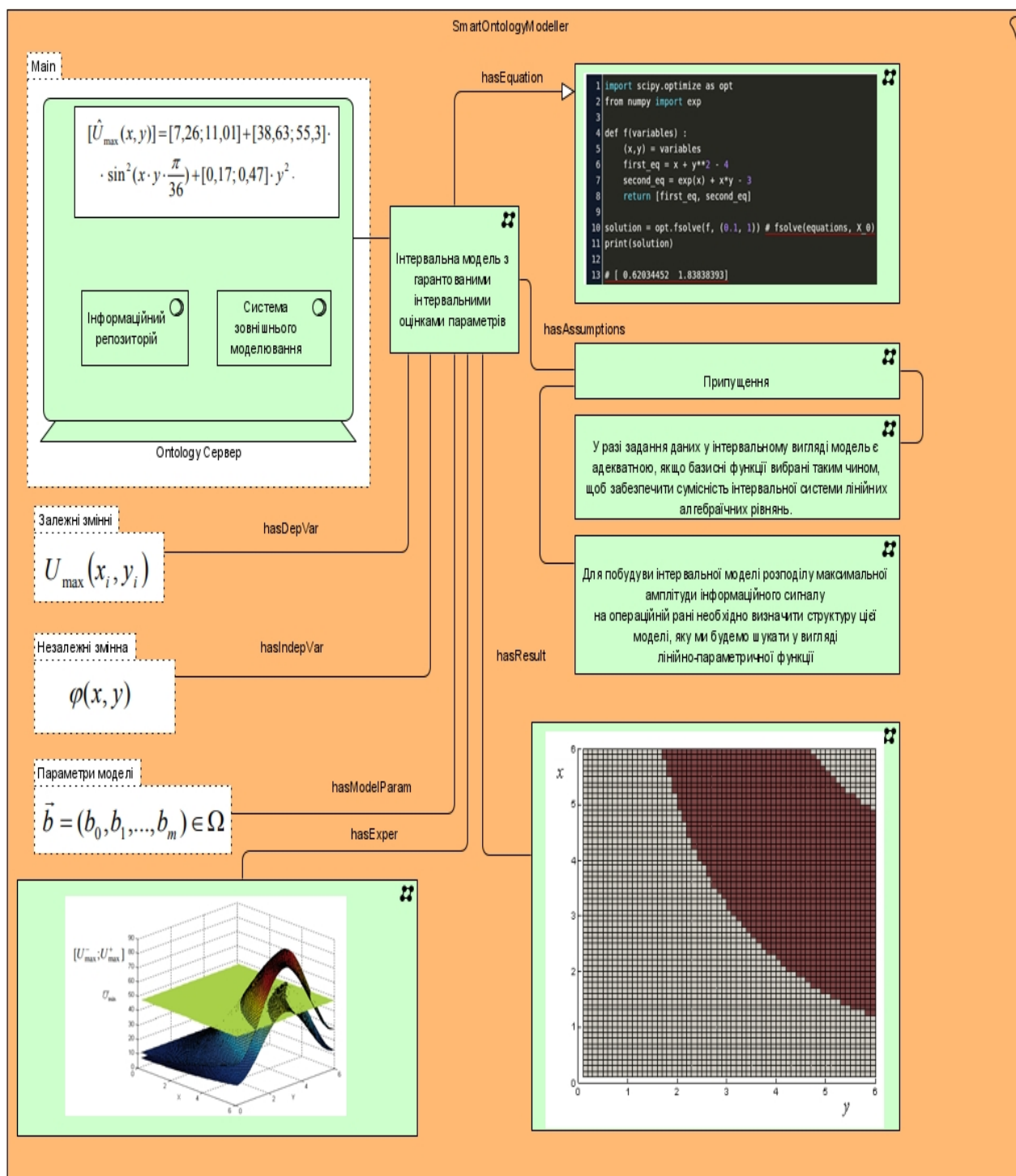


Рисунок 5.2 – Приклад реалізації онтології інтервальної моделі для задачі візуалізації зворотного гортанного нерву в процесі проведення операцій на щитоподібній залозі в середовищі SmartOntologyModeller

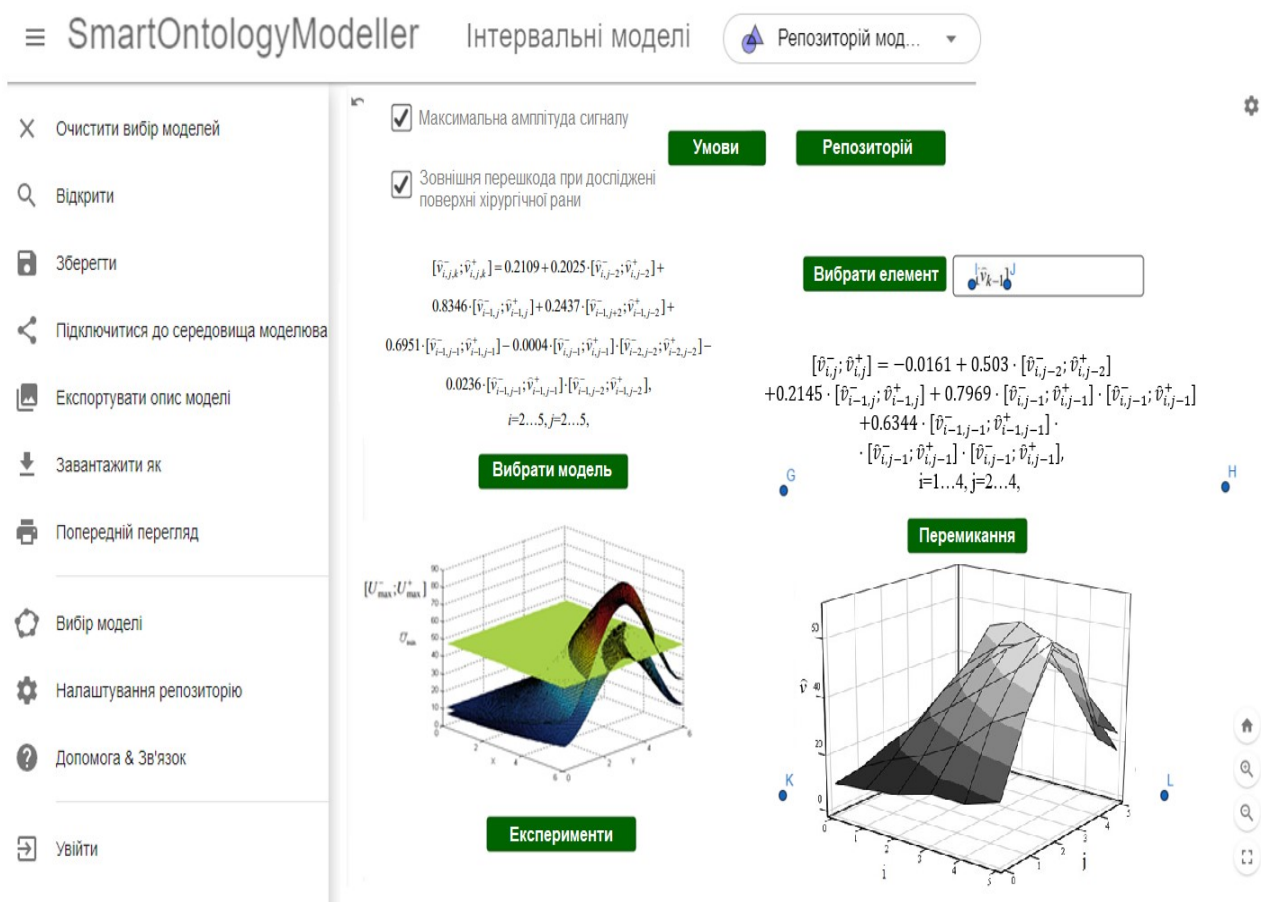


Рисунок 5.3 – Приклад перемикавання інтервальної моделі для задачі візуалізації зворотного гортанного нерва під час операції на щитоподібній залозі в згенерованому інструментальному засобів

5.2 Інтервальна модель динаміки концентрації шкідливих речовин на основі онтологічного підходу

Для моделювання процесів забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами нестационарними джерелами забруднення, наприклад автотранспорту, часто використовують диференціальні рівняння, або ж їх різницеві аналоги. Для структурної ідентифікації різницевих рівнянь використовують

метод побудований на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії [27, 39, 117, 164].

Спочатку зробимо припущення щодо структури математичної моделі та розглянемо математичну модель об'єкта, яка описується наступним різницеvim рівнянням [156, 157, 162]:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-d}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \vec{g}, k = d, \dots, K, \quad (5.6)$$

де v_k – модельована концентрація діоксиду азоту на часових дискретах $k = d, \dots, K$; $\vec{u}_0, \vec{u}_1, \dots, \vec{u}_k$ – вектори вхідних змінних, які задають умови побудови та умови застосування моделі; d – порядок дискретної динамічної моделі; \vec{g} – вектор невідомих параметрів моделі; $\vec{f}^T(\bullet)$ – вектор відомих базисних функцій. Виразом (5.6) подано різницеve рівняння, яке є лінійним за параметрами. В загальному випадку, не порушуючи загальності розгляду, припустимо, що дане рівняння може бути нелінійним.

Результати вимірювань концентрацій діоксиду азоту подаємо у вигляді числових інтервалів можливих їх значень у певній точці та у рівномірно зафіксованих часових дискретах:

$$[z_k^-; z_k^+], k = 0, \dots, K, \quad (5.7)$$

де $[z_k^-; z_k^+]$ – визначають нижню та верхню межу інтервалу, які позначають можливі значення вимірюваних концентрацій, у заданих дискретах часу $k = 0, \dots, K$.

Оскільки точність математичної моделі визначається в рамках точності інтервальних даних, що призводить до наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [z_0^-; z_0^+]; \\ \vdots \\ [\hat{v}_{d-1}^-; \hat{v}_{d-1}^+] \subseteq [z_{d-1}^-; z_{d-1}^+]; \\ z_k^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \cdot \hat{\vec{g}} \leq z_k^+; \\ k = d, \dots, K \end{cases} \quad (5.8)$$

де перша стрічка характеризує початкові умови, а наступні стрічки описують умови узгодження між експериментальними та прогнозованими даними, які далі обчислюються на основі математичної моделі, в якій із системи (5.8) обчислюються відповідні параметри. На основі загального представлення моделі складного об'єкта, який описується різницеvim рівнянням (5.6), цю математичну модель представляємо разом з оціненими параметрами наступним відношенням:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \hat{\vec{g}}, \quad k = d, \dots, K. \quad (5.9)$$

де $[\hat{v}_k]$ – інтервальна оцінка концентрації діоксиду азоту на часових дискретах $k = d, \dots, K$; $\hat{\vec{g}}$ – вектор оцінок параметрів моделі.

При побудові моделі (5.9) та при її використанні усі обчислення здійснюємо відповідно до правил інтервальної арифметики. Такі моделі отримали назву інтервальних дискретних моделей динамічних об'єктів (ІДМДО).

Як бачимо, у випадку параметричної ідентифікації інтервальних моделей динаміки діоксиду азоту, маємо справу з математичною задачею, суть якої зводиться до знаходження розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР).

Метод ідентифікації такої моделі описано у першому розділі.

Проблемою застосування цього методу є складність використання побудованої інтервальної моделі у випадку інших умов середовища.

Наприклад, у праці [53] розглянуто застосування зазначеного методу для побудови моделі поширення забруднень шкідливих викидів автотранспорту із використанням процесу математичного моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів NO₂ (діоксид азоту) на перехресті центральних вулиць м. Тернопіль.

Результати експериментів показали, що побудована модель динаміки концентрацій діоксиду азоту не є універсальною, тобто не може бути використана для моделювання в інших точках міста, або за інших погодніх 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.

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 вищеописаний підхід із використанням нелінійного елемента 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).

В таблиці 5.2 представлено формальний опис математичних моделей на основі інтервальних даних для процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

Таблиця 5.2 – Приклад формалізованого представлення математичних моделей на основі інтервальних даних для процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту

Атрибут	Опис	Значення
<i>Ma</i>	предметна область	шкідливі викиди
		забруднення атмосфери
		викиди автотранспортом
<i>Mi</i>	описи математичної моделі	$[\hat{v}_j^-; \hat{v}_j^+] = \hat{g}_1 \cdot [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] +$ $+ \hat{g}_2 \cdot \left([\hat{v}_{k-2}^-; \hat{v}_{k-2}^+] - [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \right)$
		$[\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subset [52, 25; 57, 75],$ $[\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] \subset [44, 65; 49, 35],$ $\hat{g}_1 = 0, 8897; \hat{g}_2 = -0, 0261.$
<i>Mo</i>	множина предметних характеристик	поширення концентрацій окису вуглецю
		прямолінійна ділянка вулиці
		рівномірний рух транспортного потоку
		постійна потужністю викидів
<i>Attr</i>	множина параметрів	\hat{v}_k^- – концентрація CO в k-й момент часу
		x_k – відстань
		u_k – інтенсивність автотранспортних потоків
		z_k – виміряна концентрація
		$[v_k] = [v_k^-; v_k^+]$ -інтервальні значення концентрації окису вуглецю

<i>Mr</i>	множина можливих результатів	прогнозована динаміка добового циклу зміни концентрацій оксиду вуглецю
		концентрацію оксиду вуглецю в межах похибок спостережень
		комплекс моделей в інтервальному представленні, які описують процеси забруднення атмосфери шкідливими викидами
<i>Mc</i>	множина характеристик перебігу експериментів	похибка вимірювання концентрацій оксиду вуглецю 25%
		добовий цикл концентрації шкідливих викидів автотранспорту
		зміна інтенсивності транспортних потоків
<i>Mmt</i>	множина методів ідентифікації	випадковий пошук з лінійною тактикою
		процедура випадкового пошуку по найкращій спробі
		процедура з використанням направляючого конуса
		ідентифікація з адаптацією розподілу випадкового кроку
		на основі поведінкової моделі бджолиної колонії
<i>Mi</i>	описи математичної моделі	$\hat{v}_k = 0,0149 - 0,5788\hat{v}_{k-2} + 0,7425\hat{v}_{k-3} + \frac{0,046\hat{v}_{k-1}}{\hat{v}_{k-4}}, k = 4, \dots, 18$
		$\hat{v}_k = 0,124 - 0,5764\hat{v}_{k-2} + 0,7078\hat{v}_{k-3} + \frac{0,0473\hat{v}_{k-1}}{\hat{v}_{k-4}} + \frac{0,0159\hat{v}_{k-1}\hat{v}_{k-2}}{\hat{v}_{k-1}}, k = 4, \dots, 18$
		$\hat{v}_k = 0,0226 - 0,6114\hat{v}_{k-2} + 0,7781\hat{v}_{k-3} + \frac{0,037\hat{v}_{k-1}}{\hat{v}_{k-4}} + \frac{0,0282\hat{v}_{k-1}\hat{v}_{k-4}}{\hat{v}_{k-2}}, k = 4, \dots, 18$

<i>Mo</i>	множина предметних характеристик	динаміка концентрацій діоксиду азоту
		рівномірна інтенсивність транспортних потоків
		прямолінійна ділянка вулиці
<i>Attr</i>	множина параметрів	\hat{v}_k^- - концентрація NO ₂ в k-й момент часу
		u_k – інтенсивність автотранспортних потоків
		x_k – відстань
<i>Mr</i>	множина можливих результатів	інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту
		інтервали вимірюваних значень концентрацій діоксиду азоту
		інтервальна модель з простішою структурою
<i>Mc</i>	множина характеристик перебігу експериментів	похибка вимірювання концентрацій діоксиду азоту 15%
		контрольна інтенсивність транспортних потоків
		рівномірний період проведення вимірювань

На рисунку 5.4 представлено приклад реалізації онтології інтервальної математичної моделі для задачі моделювання динаміки концентрації шкідливих речовин в середовищі SmartOntologyModeller.

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.

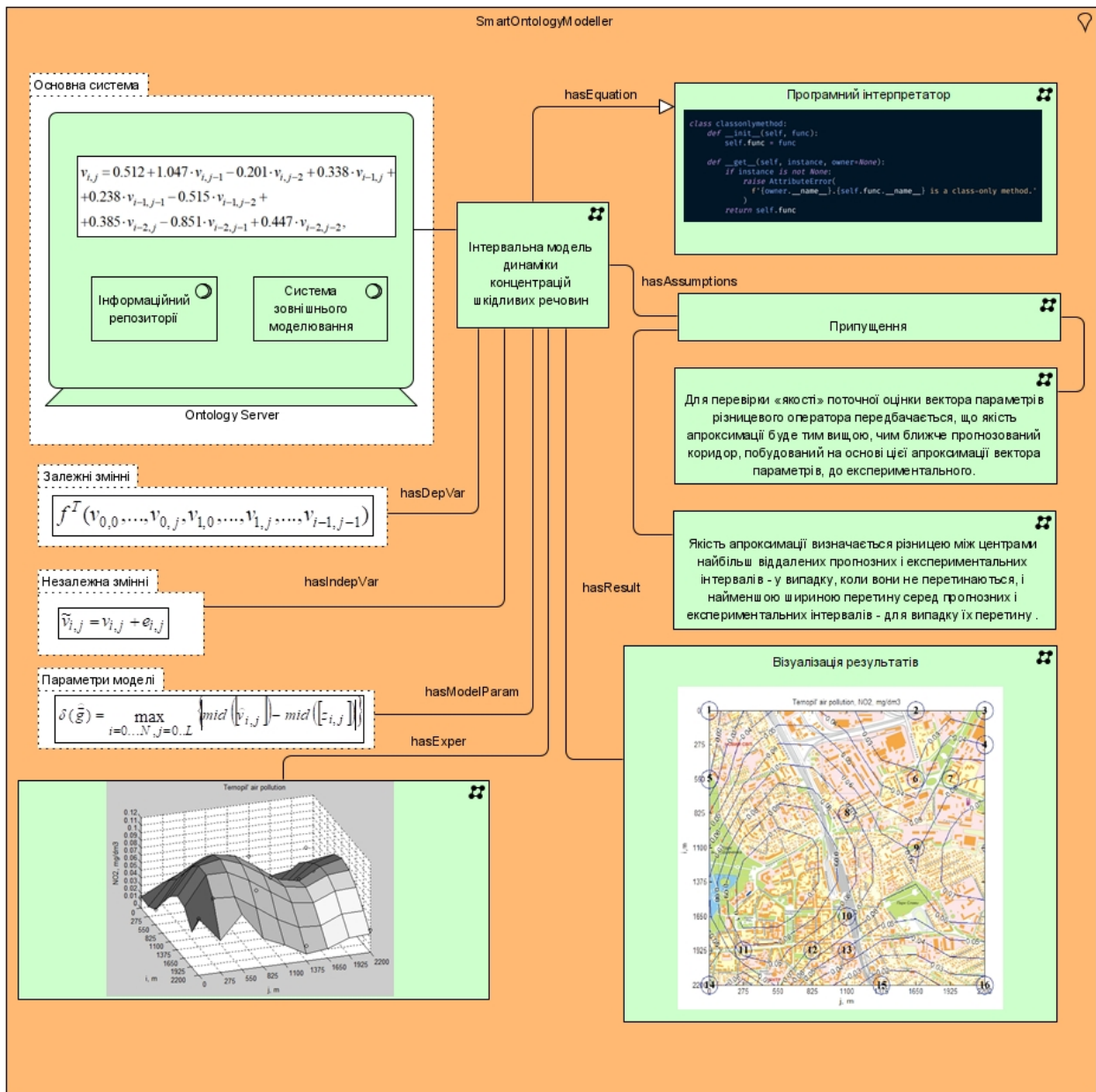


Рисунок 5.4 – Приклад реалізації онтології інтервальної моделі для задачі моделювання динаміки концентрації шкідливих речовин в середовищі SmartOntologyModeller

На рисунку 5.5 наведено приклад перемикування вибором математичної моделі на основі інтервальних даних в залежності від зміни предметних характеристик моделі. Перемикування відбувається за рахунок зміни умов середовища моделювання. Наприклад, зміна управляючої характеристики «концентрація окису вуглецю» на

«концентрація діоксиду азоту» при однакових інших умовах перебігу проведення експериментів.

The screenshot displays the SmartOntologyModeller interface. On the left is a sidebar with navigation options: 'Очистити вибір моделей', 'Відкрити', 'Зберегти', 'Підключитися до середовища моделювання', 'Експортувати опис моделі', 'Завантажити як', 'Попередній перегляд', 'Вибір моделі', 'Налаштування репозиторію', 'Допомога & Зв'язок', and 'Увійти'. The main area shows experimental conditions: 'Умови перебігу експериментів' (Error measurement 15%) and 'Інтенсивність транспорту' (Controlled). A mathematical model is displayed:
$$y_{i,j} = 0.512 + 1.047 \cdot y_{i,j-1} - 0.201 \cdot y_{i,j-2} + 0.338 \cdot y_{i-1,j} + 0.238 \cdot y_{i-1,j-1} - 0.515 \cdot y_{i-1,j-2} + 0.385 \cdot y_{i-2,j} - 0.851 \cdot y_{i-2,j-1} + 0.447 \cdot y_{i-2,j-2}$$
. Below the equation is a 'Вибрати модель' button. To the right, three checkboxes are checked: 'інтервальна модель з простою структурою', 'інтервали вимірюваних значень концентрації діоксиду азоту', and 'інтервали прогнозованих значень концентрації діоксиду азоту'. At the bottom, there is a 'Експерименти' button. The central part of the interface features a 2D map of a city grid and a 3D surface plot titled 'Темп' air pollution' showing concentration levels across the grid.

Рисунок 5.5 – Приклад перемикання вибору математичної моделі в залежності від зміни умов середовища моделювання або умов перебігу відповідного експерименту

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. Як витікає з проведеного аналізу, для усунення цієї проблеми необхідно здійснювати управління вибраним структурним елементом моделі.

5.3. Інтервальна модель портрету користувачів тематичної групи з проблем екології у соціальній мережі

У сучасному світі соціальні мережі стали одним із основних джерел поширення та накопичення інформації. Поширення інформації здійснюється через особисті повідомлення, статті в основному профілі, групі або спільноті [79, 155].

Моделювання інформаційних процесів у соціальних мережах дозволяє досліджувати, виявляти особливості протікання та поширення інформації у визначений момент часу і прогнозований інтервал, виявляти незвичайні або підозрілі дії (поширення фейкової інформації, виявлення недостовірної або неактуальної інформації) [28, 29, 38, 79, 97]. Крім цього, процес моделювання дозволяє проводити дослідження можливих сценаріїв розвитку подій, якщо відсутні наявні дані про поведінку користувачів у різних часових проміжках спостереження [155].

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

$$IP = \langle r, Id, timer, themer, vp, r \rangle \quad (5.10)$$

де r – джерело повідомлення, Id - ідентифікатор повідомлення, $timer$ - час публікації повідомлення, $themer$ – 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 в процесі моделювання динамічно змінюватися. Наприклад, кількість реакцій на повідомлення є прикладом динамічно змінюваних параметрів для різних часових проміжків [36, 155].

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 можна реалізувати модель поширення інформації в соціальній мережі. Дана модель буде дискретною: кожній ітерації відповідає певний момент часу.

Джерелом та отримувачем інформації будуть агенти, які належать як до однакового, так і до різних типів користувачів. Наприклад, конкретна людина є джерелом, коли публікує коментар до повідомлення на сторінці групи, а тоді група є отримувачем (через механізм модерації є можливість також реагувати на повідомлення).

Модель реакції на повідомлення M_{reak} описує для кожної пари (користувач, повідомлення) реакцію користувача на конкретне повідомлення, і відповідно який тип реакції він визначить.

Модель, яка описує процес генерації повідомлення, характеризує інформацію про появу нових повідомлень, наприклад, дату і час створення та відповідні параметри контенту. На основі побудованої моделі можна згенерувати ланцюжок повідомлень тематичної групи. В результаті використання соціальних мереж користувачі залишають певні цифрові сліди (набір активностей, дій, повідомлень), які можна використати в процесі ідентифікації моделі. Необхідно відзначити, що цифрові сліди окремих користувачів дуже часто характеризуються невеликою кількістю подій, тому здійснюємо процедуру агрегування цих даних.

Побудова математична модель повинна відображати динаміку розподілу коментарів до інформаційних повідомлень в соціальній мережі, який би відображав узагальнений портрет користувачів мережі. Таким чином, математична модель матиме вигляд рівняння, яке описує динаміку розподілу коментарів до інформаційних повідомлень.

Як відомо, такі рівняння є диференціальними, або їх дискретними аналогами [156, 157]. В нашому випадку обираємо дискретне різницеве рівняння, а для його ідентифікації використаємо результати спостережень за активностями користувачів деякої соціальної мережі. Також врахуємо, що у процесі моделювання можуть змінюватися показники повідомлень.

Останнє призведе до “розмитості” чи неточності результатів експериментальних досліджень, що можливо врахувати на основі аналізу інтервальних даних [36, 155].

Таким чином, при побудові моделі динаміки розподілу коментарів до інформаційних повідомлень використовуємо такі припущення:

- модель має вигляд дискретного рівняння

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-d}) \cdot \vec{g}, \quad k = d, \dots, K, \quad (5.11)$$

де v_k – розподіл коментарів на часових дискретах $k = d, \dots, K$, d – порядок дискретної моделі (5.11), який еквівалентний порядку диференціального рівняння; \vec{g} – вектор невідомих параметрів моделі; $\vec{f}^T(\bullet)$ – вектор базисних функцій, у загальному випадку нелінійних.

- результати спостережень за реакцією користувачів мережі подамо в інтервальному вигляді:

$$\left[z_k^-; z_k^+ \right], \quad k = 0, \dots, K, \quad (5.12)$$

де $z_k^-; z_k^+$ – відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень розподілу коментарів користувачів на часових дискретах $k = 0, \dots, K$.

- концепцію забезпечення точності математичної моделі в межах точності результатів експерименту сформулюємо таким чином:

$$\left[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+ \right] \subset \left[z_k^-; z_k^+ \right] \quad \forall k = 0, \dots, K, \quad (5.13)$$

Умови (5.13) забезпечують отримання інтервальних оцінок $\left[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+ \right]$ модельованого розподілу коментарів до інформаційних повідомлень в межах інтервалів можливих значень цього розподілу, отриманого експериментально.

Спираючись на вищенаведені припущення, для ідентифікації дискретної моделі (5.11) використовуємо методи аналізу інтервальних даних і зокрема метод параметричної ідентифікації інтервальних дискретних моделей на основі алгоритмів штучної бджолиної колонії, який описано у першому розділі.

Основна мета використання моделі – побудова оптимального розкладу публікацій спеціалізованої групи для максимізації реакцій на повідомлення із врахуванням наявних обмежень, які зумовлені політикою публікацій окремих груп в соціальних мережах.

Практичним результатом дослідження повинно стати реалізація аналітичних систем моніторингу та систем підтримки прийняття рішень для управління соціальною групою на користь різних категорій користувачів.

Вибір актуальних інформаційних ситуацій за даними початку 2021 року для проведення експериментальних досліджень було обумовлено:

- 1) різними масштабами та сценаріями моделювання;
- 2) тестуванням різноманітних характеристик інформаційних повідомлень.

У зв'язку з цим для експериментів було обрано спеціалізовану тематичну групу, яка пов'язана з обговоренням актуальних проблем екології та охорони довкілля і створена та функціонує в соціальній мережі Facebook. Основні характеристики наборів ретроспективних даних, за якими проводилася побудова інтервальної математичної моделі, наведено таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Структура аналізованих даних

<i>Тип даних</i>	<i>Основні поля</i>	<i>Тип даних</i>	<i>Основні поля</i>
Користувачі	- id групи; - id користувача; - дата збору інформації.	Коментарі	- id групи; - id повідомлення; - id користувача; - текст коментаря; - дата реакції.
Інформаційне повідомлення	- id групи; - id поста; - тип повідомлення; - тип джерела отримання повідомлення; - дата публікації; - текст; - число коментарів; - число лайків; - число репостів; - дата збору інформації.	Репости	- id спільноти; - id поста; - id користувача; - дата реакції.
		Лайки	- id спільноти; - id поста; - id користувача; - дата збору інформації.

За допомогою розробленого програмного забезпечення, а також використання засобів інтеграції з Facebook Арі здійснено накопичення даних відповідно до описаної в таблиці 5.3 структури. В якості основних характеристик обрано – часові характеристики появи коментарів до статей із моменту появи відповідного повідомлення та загальну кількість коментарів за спостережуваний період.

На рисунку 5.6 наведено результати експериментальних досліджень для групи Facebook «Environmental Awareness». В якості аналізованого періоду спостереження вибрано 01.1.2021-31.01.2021. Аналізована група є загальнодоступною, налічує понад 28 тисяч учасників із середньою кількістю інформаційних повідомлень на день – 15.

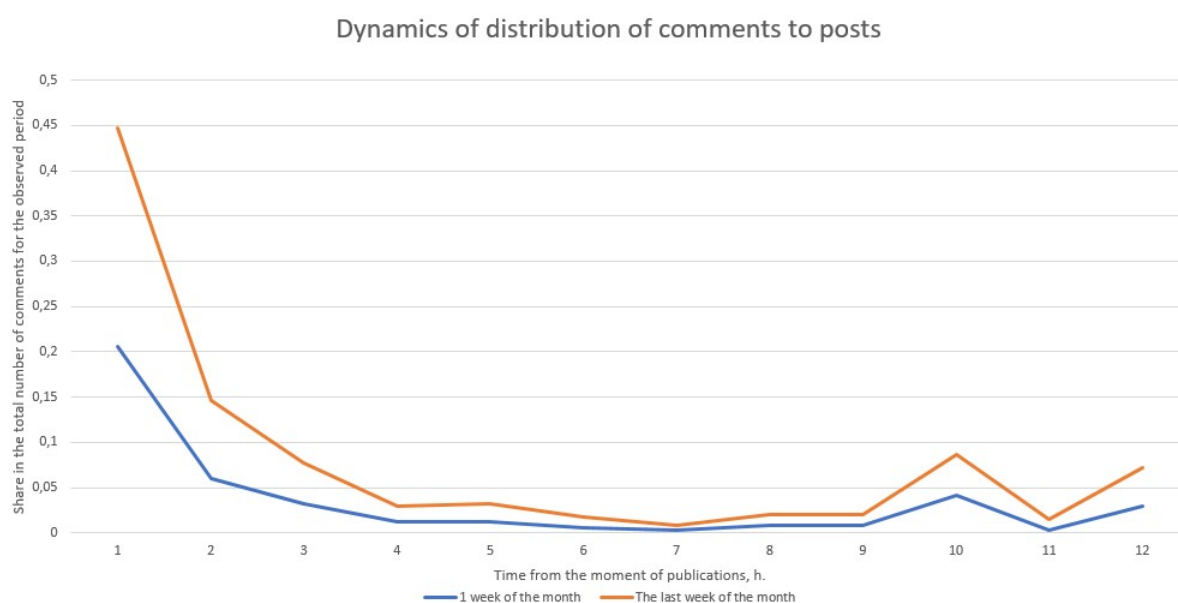


Рисунок 5.6 – Результати експериментальних досліджень

На основі проведеного дослідження визначено інтервали динаміки коментарів до інформаційних повідомлень для кожної години протягом тижня в межах спостережуваного періоду.

Спираючись на результати проведених експериментальних досліджень, наведених у таблиці 5.4, а також на основні припущення щодо побудови дискретної моделі у вигляді (5.11)-(5.13) спочатку задаємо таку структуру моделі

$$v_k = g_1 + g_2 v_{k-1} + g_3 v_{k-2}, \quad k = 2, \dots, 11, \quad (5.14)$$

Для оцінювання коефіцієнтів g_1, g_2, g_3 використовуємо дані таблиці 5.4. При цьому початкові дані задаємо у такому вигляді:

$$[\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] = [0,5(z_0^- + z_0^+) - 0,005(z_0^+ - z_0^-); 0,5(z_0^- + z_0^+) + 0,005(z_0^+ - z_0^-)],$$

$$[\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] = [0,5(z_1^- + z_1^+) - 0,005(z_1^+ - z_1^-); 0,5(z_1^- + z_1^+) + 0,005(z_1^+ - z_1^-)].$$

Результати обчислень показали, що отримана модель є неадекватною в сенсі виконання умови (5.13)

Таблиця 5.4 – Інтервали динаміки коментарів до постів

Час з моменту публікації k	Частка у загальній кількості коментарів за спостережуваний період	
	z_k^-	z_k^+
1	0.205970149	0.241791045
2	0.059701493	0.086567164
3	0.032835821	0.044776119
4	0.011940299	0.017910448
5	0.011940299	0.020895522

6	0.005970149	0.011940299
7	0.002985075	0.005970149
8	0.008955224	0.011940299
9	0.008955224	0.011940299
10	0.041791045	0.044776119
11	0.002985075	0.011940299
12	0.029850746	0.041791045

На рисунку 5.7 наведено скріншот користувацького інтерфейсу програмного забезпечення, що реалізує метод параметричної ідентифікації на основі алгоритму бджолоїної колонії.

i0	[0.22376865671642, 0.22399253731343] 0
i1	[0.073134329, 0.076492538] 0
i2	[0.038786567164179, 0.038825373134328] 0
i3	[0.014917910447761, 0.014932835820896] 0
i4	[0.006135693694758, 0.00643744503465] 0.010131
i5	[0.010573380252853, 0.011432503230713] 0
i6	[0.0068192026671897, 0.007485095849017] 0.002675
i7	[0.019917551309012, 0.021315237273596] 0.010169
i8	[0.012500659815923, 0.013928579409839] 0.002767
i9	[0.031837699143391, 0.034403976430302] 0.010163
i10	[0.015970300213961, 0.018891863020623] 0.009968
i11	[0.044432742954545, 0.049199002492058] 0.010995

Рисунок 5.7 – Скріншот результатів параметричної ідентифікації структури (5.14)

На рисунку 5.7 синім кольором відзначено дискрети, в яких не виконуються умови (5.13), а червоним кольором відзначено дискрету, де розбіжність між модельованими та експериментальними інтервалами найбільша.

Тоді було прийнято рішення ускладнити структуру різницевого рівняння (збільшити кількість елементів) до такого вигляду:

$$v_k = g_1 + g_2 v_{k-1} + g_3 v_{k-2} + g_4 v_{k-3}, \quad k = 3, \dots, 11 \quad (5.15)$$

Для оцінювання коефіцієнтів g_1, g_2, g_3, g_4 використовуємо дані таблиці 5.4. При цьому початкові дані задаємо у такому вигляді:

$$[\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] = [0,5(z_0^- + z_0^+) - 0,005(z_0^+ - z_0^-); 0,5(z_0^- + z_0^+) + 0,005(z_0^+ - z_0^-)],$$

$$[\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] = [0,5(z_1^- + z_1^+) - 0,005(z_1^+ - z_1^-); 0,5(z_1^- + z_1^+) + 0,005(z_1^+ - z_1^-)].$$

$$[\hat{v}_2^-; \hat{v}_2^+] = [0,5(z_2^- + z_2^+) - 0,005(z_2^+ - z_2^-); 0,5(z_2^- + z_2^+) + 0,005(z_2^+ - z_2^-)].$$

Результати обчислень наведено на рисунку 5.8. Як бачимо, модель у вигляді структури (5.15) виявилася також неадекватною, хоча розбіжність між модельованими та експериментальними даними зменшилася. В результаті прийняли рішення ще ускладнити структуру моделі до такого вигляду

$$v_k = g_1 + g_2 v_{k-1} + g_3 v_{k-2} + g_4 v_{k-3} + g_5 v_{k-4}, \quad k = 4, \dots, 11 \quad (5.16)$$

При цьому початкові дані задаємо у такому вигляді:

$$[\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] = [0,5(z_0^- + z_0^+) - 0,005(z_0^+ - z_0^-); 0,5(z_0^- + z_0^+) + 0,005(z_0^+ - z_0^-)],$$

$$[\hat{v}_1^-; \hat{v}_1^+] = [0,5(z_1^- + z_1^+) - 0,005(z_1^+ - z_1^-); 0,5(z_1^- + z_1^+) + 0,005(z_1^+ - z_1^-)].$$

$$[\hat{v}_2^-; \hat{v}_2^+] = [0,5(z_2^- + z_2^+) - 0,005(z_2^+ - z_2^-); 0,5(z_2^- + z_2^+) + 0,005(z_2^+ - z_2^-)].$$

$$[\hat{v}_3^-; \hat{v}_3^+] = [0,5(z_3^- + z_3^+) - 0,005(z_3^+ - z_3^-); 0,5(z_3^- + z_3^+) + 0,005(z_3^+ - z_3^-)].$$

i0	[0.50083838475499, 0.50133947368421] 0
i1	[0.14520866606171, 0.14535394736842] 0
i2	[0.077366016333938, 0.077443421052632] 0
i3	[0.02956778584392, 0.029597368421053] 0
i4	[0.012953220881176, 0.013167972040791] 0.019154
i5	[0.022351204368054, 0.022489315743005] 0.004997
i6	[0.016765835979552, 0.017106807183771] 0.008225
i7	[0.041116681597835, 0.041440936932955] 0.020408
i8	[0.027569200441121, 0.028171663440853] 0.006999
i9	[0.063059985975333, 0.063745402676003] 0.021715
i10	[0.03135206752967, 0.032457531173017] 0.01793
i11	[0.085842771569355, 0.087226755311082] 0.01521

Рисунок 5.8 – Скріншот результатів параметричної ідентифікації структури (5.15)

Результати зіставлення модельованих результатів із експериментальними наведено на рисунку 5.9. Як бачимо отримана модель 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 (5.13) і в цьому сенсі є адекватною.

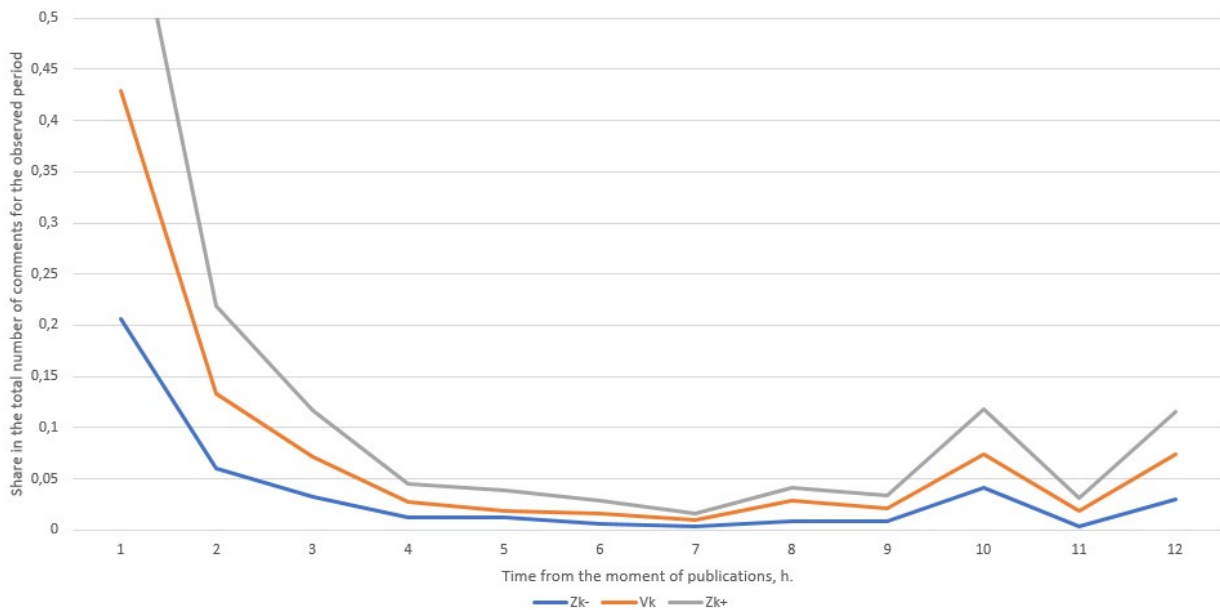


Рисунок 5.9 – Скріншот результатів параметричної ідентифікації структури (5.16)

Отримана модель відображає портрет користувачів вказаної соціальної мережі. Використання моделі дає можливість побудувати оптимальний розклад публікацій спеціалізованої групи для максимізації кількості реакцій на повідомлення у вказаному інтервалі часу з моменту публікації.

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.

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.

Висновки до розділу 5

1. Розглянуто задачі структурної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів для різних задач: екологічний моніторинг, медицина, управління публікаційною активністю користувачів спеціалізованої групи. Для розв'язування вказаних задач використовувався розроблений програмний комплекс для моделювання на основі інтервального аналізу та онтологічного підходу.

2. Набули подальшого розвитку інтервальні моделі для візуалізації зворотного гортанного нерва при проведенні операції на щитовидній залозі, які, на відміну від існуючих, за рахунок повторного використання напрацьованих моделей із відповідного

репозиторію, що, відповідно, зменшує витрати часу на операцію на підготовчому етапі, коли хірург виявляє зворотній гортанний нерв.

3. Набули подальшого розвитку інтервальні моделі динаміки концентрації шкідливих речовин, які, на відміну від існуючих, за рахунок застосування методу вибору математичної моделі з репозиторію в рамках онтологічного підходу для моделювання на основі інтервальних даних забезпечив спрощення процедури їх побудови та можливість повторного використання для управління зазначеним процесом в системах комп'ютерного моделювання.

4. 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 політикою публікацій окремих груп в соціальних мережах.

5. 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.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Abraham A., Jatoth RK., Rajasekhar A. Hybrid differential artificial bee colony algorithm. *J. Comput. Theor. Nanosci.* 2012. Vol. 9(2). P.249–257.
2. Abstract book of the First World Congress of Neural Monitoring in Thyroid and Parathyroid Surgery. Krakow, Poland. 2015. 161 p.
3. Aït-Ameur Y., Ait-Sadoune I., Hacid K., Mohand Oussaid L. Formal modelling of ontologies within Event-B. *First International Workshop on Handling IMPlicit and EXplicit knowledge in formal system development.* Nov. 2017. Xi'an, China. (hal-01636944).
4. Akay B., Karaboga D. A survey on the applications of artificial bee colony in signal, image, and video processing. *Signal Image Video Process.* 2015. Vol. 9(4). P. 967–990.
5. Alefeld G., Mayer G. Interval analysis: theory and applications. *Journal of Computational and Applied Mathematics.* 2000. Vol.121. P. 421-464.
6. Ali M.M., Yang R., Zhang B., Furini F., Rai R., Otte J. N., Smith B. Enriching the functionally graded materials (FGM) ontology for digital manufacturing. *International Journal of Production Research.* 2020. P. 1-18.
7. Anastasakis L., Neil Mort N. The development of self-organization techniques in modelling: a review of the group method of data handling (GMDH)”. ACSE Research Report. 2001. 39 p.

8. 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.

9. Atmosphere monitoring service. Available online: <https://atmosphere.copernicus.eu/> (accessed on 20 July 2022).

10. Badillo-Márquez, Alina Evelyn, Alberto Alfonso Aguilar-Lasserre, Marco Augusto Miranda-Ackerman, Oscar Osvaldo Sandoval-González, Daniel Villanueva-Vásquez, Rubén Posada-Gómez. An Agent-Based Model-Driven Decision Support System for Assessment of Agricultural Vulnerability of Sugarcane Facing Climatic Change. *Mathematics*. 2021. Vol.9, Issue 3061. P. 1–32.

11. Bechkit W.B., Rivano H. On the deployment of wireless sensor networks for air quality mapping: optimization models and algorithms. *IEEE/ACM Trans. on Networking*. 2019. Vol. 27 (4). P.1629-1642.

12. Belfadel A., Amdouni E., Laval J., Cherifi C., Moalla N. Ontology-based software capability container for RESTful APIs. *9th IEEE International Conference on Intelligent Systems (IS 2018)*. Sep. 2018. Madeira, Portugal. P. 466-473.

13. Bertalanffy L. *General System Theory: Foundations / Ludwig Bertalanffy*. – New York: George Braziller: Development, Applications. – 296 p.

14. Boukraâ, D., Boussaïd, O., Bentayeb, F. OLAP Operators for Complex Object. *Advances in Databases and Information Systems*. 2010. P. 103–116.

15. Burek P. Towards a modern ontology development environment. *Procedia Computer Science*. 2020. P. 176.
16. Cao J., He Y-L., Zhu QX. An ontology-based procedure knowledge framework for the process industry. *Can J Chem Eng*. 2021. Vol. 99. P. 530– 542.
17. Ceri S., Fraternali P., Matera M. Conceptual modeling of data-intensive web applications. *IEEE Internet Computing*. 2002. Vol.6(4). P. 20–30
18. Cerreta M., Panaro S., Poli G. A Spatial Decision Support System for Multifunctional Landscape Assessment: A Transformative Resilience Perspective for Vulnerable Inland Areas. *Sustainability* 13, 2021, P. 1-22.
19. Chimalakonda S., Nori K.V. An ontology based modeling framework for design of educational technologies. *Smart Learn. Environ*. 2020. Vol. 7. 28 p.
20. Chiosa, Roberto, Marco Savino Piscitelli, Alfonso Capozzoli. A Data Analytics-Based Energy Information System (EIS) Tool to Perform Meter-Level Anomaly Detection and Diagnosis in Buildings. *Energies*. 2021. Vol.14, Issue 237. P. 1–18.
21. Christou I.T, Darrell W.L., De Long K., Martin W. Evolutionary algorithms. Springer-Verlag, New York. 2021. 602 p.
22. Cimiano P., Völker J. Text2Onto – a Framework for ontology learning and data-driven change discovery. *Proceedings of the 10th International Conference on Applications of Natural Language to Information Systems (NLDB'2005)*. 2005. P. 227-238.

23. Conati C., Carenini G., Hoque E., Steichen B., Toker D. Evaluating the Impact of User Characteristics and Different Layouts on an Interactive Visualization for Decision Making. *Eurographics Conference on Visualization*. Vol. 33(3). P. 371-380.

24. Debellis M. A Practical guide to building OWL ontologies using Protégé 5.5 and Plugins. 2021.

25. Dolzhenkov V. Software tools for ontology development. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. 2020. Vol.9. P.935-941.

26. Dubey R. The impact of big data on world-class sustainable manufacturing, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol.84(1-4). P. 631-645.

27. Dyvak M. Parameters identification method of interval discrete dynamic models of air pollution based on artificial bee colony algorithm. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. 2020. P. 130-135.

28. Dyvak M., Kovbasisty 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.

29. Dyvak M., Kovbasisty 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.

30. Dyvak M., Kozak O., Pukas A. Interval model for identification of laryngeal nerves. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2010. Vol. 86, no. 1. P. 139-140.
31. Dyvak M., Manzhula V., Dyvak T. Identification of Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems using Multidimensional Optimization. *Computational Problems of Electrical Engineering*. Vol. 12, No. 2, 2022. pp. 5-13.
32. Dyvak M., Manzhula V., Pukas A., Dyvak T., Manzhula V.V. Application of Global Optimization Toolbox for Identification of Parameters of Interval Nonlinear Models of Static Systems. *Conference Proceedings 2023 IEEE 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*. – 2023. – pp. 2/60-2/63.
33. Dyvak M., Manzhula V., Dyvak T. The Method of Structural Identification of Interval Nonlinear Models with the Selection of Structural Elements based on the Gradient of the Objective Function. *13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies*. – *Proceedings*, 2023. – pp. 52-57.
34. 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.
35. 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.

36. 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.

37. 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.

38. Dyvak M., Melnyk A., Kovbasisty 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.

39. 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.

40. 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.

41. 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.

42. 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.

43. 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.

44. Dyvak M., Porplytsya N. Formation and identification of a model for recurrent laryngeal nerve localization during the surgery on neck organs. *Advances in Intelligent Systems and Computing III. CSIT 2018*, Cham: Springer. 2019. Vol.871. P. 391-404.

45. Dyvak M., Porplytsya N., Borivets I. and Shynkaryk M. Improving the computational implementation of the parametric identification method for interval discrete dynamic models. *2017 12th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 2017. P. 533-536.

46. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y. Modified method of structural identification of interval discrete models of atmospheric pollution by harmful emissions from motor vehicles. In: Shakhovska N., Medykovskyy M.O. (eds) *Advances in Intelligent Systems and Computing IV. CSIT 2019*. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1080. Springer, Cham.

47. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Kasatkina N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*: Proceedings of the 2017 14th International Conference. Lviv, Ukraine. 21–25 February 2017. P. 50–54.

48. 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.

49. Dyvak M., Pukas A. Criterion of design of experiments for tasks of decision support interval model creation. *2005 IEEE Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications*: Proceedings. Sofia, Bulgaria. 5–7 September 2005. P. 495–497.

50. 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.

51. 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.
52. 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.
53. Dyvak M., Roth A., Pasichnyk R., Tymchyshyn V., Huliyeв N., Maslyiak Y. Monitoring and mathematical modeling of soil and groundwater contamination by harmful emissions of nitrogen dioxide from motor vehicles. *Sustainability*. 2021. Vol. 13, 2768. P.1–15.
54. Dyvak M., Spivak I., Melnyk A., Manzhula V., Dyvak T., Rot A., Hernes M., “Modeling Based on the Analysis of Interval Data of Atmospheric Air Pollution Processes with Nitrogen Dioxide due to the Spread of Vehicle Exhaust Gases”, *Sustainability*, 15(3):2163, 2023.
55. Faiz R., Edirisinghe E. Decision making for predictive maintenance in asset information management. *Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge and Management*. 2009. Vol.4. P. 23-36.
56. Falbo R., Natali A., Mian P., Bertollo G., Ruy F. B. ODE: ontology-based software development environment. *Computer Science*. 2003. P.1124-1135.

57. Farlow S. The GMDH algorithm of Ivakhnenko. *American Statistician – AMER STATIST.* 1981. Vol.35. P. 210–215.
58. Ganji M.D., Rahmanzadeh A. Chapter 6 – Mathematical modeling and simulation. In *Smart Nanocontainers*; Nguyen-Tri, P., Do, T.-O., Nguyen, T.A., Eds.; Micro and Nano Technologies. Elsevier: Amsterdam, Netherlands. 2020. P. 89–102.
59. Global Optimization Toolbox, <https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html>.
60. Gorgorió N., Albarracín L., Ärlebäck J., Laine A., Newton R., Villarreal A. Fundamental mathematical knowledge: progressing its specification. Linköping: Linköping University Electronic Press; 2019. (LiTH-MAT-R). URL: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-157096>.
61. Gray P. Group decision support systems. *Decision Support Systems.* Sep. 1987. Vol. 3. Issue 3. P.233-242
62. Grenon P., Smith B. Foundations of an ontology of philosophy. *Synthese.* 2011. Vol. 182. P. 185-204.
63. Hill H., Blunk M., Charalambous C., Lewis J., Phelps G., Sleep L., Ball D. Mathematical knowledge for teaching and the mathematical quality of instruction: An exploratory study. *Cognition and Instruction.* 2008. Vol. 26 (4). P. 430-511.
64. Husáková M., Bureš V. Formal ontologies in information systems development: a systematic review. *Information.* 2020. Vol. 11, no. 2. P. 66.

65. Itziar U., Nieto M., García M., Otaegui O. Design and implementation of an ontology for semantic labeling and testing: automotive global ontology (AGO). *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 17. 7782.
66. Ivakhnenko A. Polynomial theory of complex systems. *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*. 1971. Vol. 4. P. 364-378.
67. Ivakhnenko A. The group method of data handling in long-range forecasting. *Technological Forecasting and Social Change*. 1978. Vol.12. P. 213-227.
68. Ivakhnenko A., Ivakhnenko G. The review of problems solvable by algorithms of the group method of data handling (GMDH). *Pattern Recognition and Image Analysis*. 1995. Vol.5 (4). P. 527–535.
69. Ivakhnenko A., Lapa V. Cybernetics and forecasting techniques. *Modern Analytic and Computational Methods in Science and Mathematics*. 1967. V.8 ed. American Elsevier.
70. Ivakhnenko O. Recent developments of self-organizing modeling in prediction and analysis of stock market. *Microelectronics Reliability journal*. 1997. Vol. 37. P. 1053–1072.
71. Ivanov A. Mathematical models for basic functioning processes of an information web portal. *Sist. Sredstva Inform.* 2010. Vol. 20. P. 106–132.
72. Jinzhi L., Ma J., Zheng X., Wang G., Kiritsis D. Design ontology supporting model-based systems-engineering formalisms. *Journal of Latex Class Files*. Vol. 14. No. 8, August 2015.

73. Juneau J. Java 9 Recipes: A Problem-solution approach 2017. 3rd. ed. Apress, USA.

74. 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.

75. Katoch S., Chauhan SS., Kumar V. A review on genetic algorithms: past, present, and future. *Multimed Tools Appl*. 2021. Vol. 80, P.8091–8126.

76. Kedrin Y., Dyvak M., Pukas A., Voytyuk I., Maslyiak Y., Papa O. Features of artificial bee colony based algorithm realization for parametric identification method of the interval discrete dynamic models. *2020 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT)*. Deggendorf Germany. 2020. P. 239–245.

77. Kelley W.G., Peterson A.C. Difference equations: an introduction with applications. Academic press. 2001.

78. Kohn T., Rossum G., Bucher II G., Talin, Levkivskyi I. Dynamic pattern matching with Python. *16th ACM SIGPLAN International Symposium on Dynamic Languages (DLS 2020)*. Proceedings of the Symposium. Association for Computing Machinery. New York, NY, USA. 2020. P. 85–98.

79. Kovbasisty 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.

80. Krepych S., Spivak, I. Model of human weight correction based on interval data analysis. *International Journal of Computing*. 2020. Vol. 19(1). P. 128-136.

81. Kuik, S.; Diong, L. Building Model-Driven Decision Support System in Product Redesign Plan. *Designs* 2019, P. 1-13.

82. Kulik B. A logic programming system based on cortege algebra. *Journal of Computer & System Sciences International*. 1995. P. 159-170.

83. Kulik B., Fridman A. N-Tuple algebra as a generalized theory of relations. 2021.

84. Kumar A., Negi G., Pant S., Ram M., Dimri S.C., Availability-Cost Optimization of Butter Oil Processing System by Using Nature Inspired Optimization Algorithms, *Reliab. Theory Appl.*, SI 2, 188–200, 2021.

85. Kumar P., Kavita Dr. Data Warehouse Concept and Its Usage. *University Research Resource Journal Jayoti Vidyapeeth Women’s University*. 2019. Vol. 2, Issue P. 08-14.

86. Lange C. Ontologies and languages for representing mathematical knowledge on the Semantic Web. *Semant. Web* 4. 2013. Vol. 2, P. 119–158.

87. Lange C., Kohlhase M. A Semantic Wiki for mathematical knowledge management. *Emerging Technologies for Semantic Work Environments: Techniques, Methods, and Applications*. Edited by Rech, Jörg and Björn Decker, and Eric Ras. Hershey, PA: IGI Global. 2008. P. 47-68.

88. Lemass B. *Structured Conceptual Design: The New Frontier*. Sydney: Pearson Prentice Hall. 2004. 134 p.

89. 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.

90. Leydesdorff L. Synergy in Knowledge-Based Innovation Systems at National and Regional Levels: The Triple-Helix Model and the Fourth Industrial Revolution. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*. 2018. P. 1-13.

91. Lytvyn V., Vysotska V., Shatskykh V., Kohut I., Petruchenko O., Dzyubyk L., Bobrivets V., Panasyuk V., Sachenko S., Komar M. Design of a recommendation system based on collaborative filtering and machine learning considering personal needs of the user. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol.4 (2 (100)). P.6-28.

92. Madala H., Ivakhnenko A. *Inductive learning algorithms for complex systems modeling*. Boca Raton: CRC Press. 1994.

93. Mahjourian, R. An Architectural Style for Data-Driven Systems. *High Confidence Software Reuse in Large Systems*. 2008. Vol.5030. P. 14–25.

94. Mathematical knowledge management: *2nd International Conference MKM 2003*, Bertorino, Italy: Proceedings. Asperti, A.; Buchberger, B.; Davenport, James H. Berlin: Springer, 2003. (Lecture Notes in Computer Science; Vol. 2594).

95. 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.

96. McNeil M.W. Matching possible mitigations to cyber threats: a document-driven decision support systems approach. *Masters Theses & Doctoral Dissertations*. 2019. 330p.

97. Melnyk A., Huhul O., Shevchuk R., Shcherbiak I., Martsenyuk Y., Kovbasisty 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.

98. Melnyk A., Pasichnyk R. System of semantic classes for test's generation. *2010 International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. 2010. P. 206-206.

99. 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.

100. Milanese M., Norton J., Piet-Lahanier H., Walter E. Bounded approaches to system identification. New-York, London: Plenum Press. 1996. 357 p.

101. Mitran D. Decision support systems to create a competitive advantage. *Internal Auditing & Risk Management*. 2019. Vol. 55(3). P.76–82.

102. Mohemad R., Hamdan A.R., Othman Z.A., Noor N.M.M. Decision Support Systems (dss) in Construction Tendering Processes. *International Journal of Computer Science Issues*. Apr. 2010. Vol. 7(2). P.35–45.

103. Moore R.E. Interval analysis. Englewood Cliffs: Prentice Hall. 1966. 145 p.

104. Moore R.E. Methods and applications of interval analysis. Philadelphia: SIAM. 1979. 190 p.

105. Moore R.E. Reliability in computing: the role of interval methods in scientific computing. Elsevier. 2014.

106. Moreno Torres B., Völker C., Nagel S.M., Hanke T., Kruschwitz S. An ontology-based approach to enable data-driven research in the field of NDT in civil engineering. *Remote Sens*. 2021. Vol. 13, 2426.

107. Musen M. The protégé project. *AI Matters*. 2015. Vol. 1, P. 4-12.
108. Nambiar, Athira, Divyansh Mundra. An Overview of Data Warehouse and Data Lake in Modern Enterprise Data Management. *Big Data and Cognitive Computing*. 2022. Vol.6(4). P. 132.
109. Ocheretnyuk N., Dyvak M., Dyvak T., Voytyuk I. Structure identification of interval difference operator for control the production process of drywall. *12th Int. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2013. P. 262-264.
110. Ocheretnyuk N., Voytyuk I., Dyvak M., Martsenyuk Y. Features of structure identification the macromodels for nonstationary fields of air pollutions from vehicles. *International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. 2012. P. 444.
111. 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.
112. Patel J. Relational databases and SQL language. 2020.
113. Petrowski A. and Ben-Hamida S. Evolutionary algorithms (computer engineering: metaheuristics book 9). 1st edition. Wiley-ISTE, 2017. 305 p.

114. Pigazzi R., Confalonieri C., Rossoni M., Gariboldi E., Colombo G. Ontologies as a tool for design and material engineers. *ASME 2020 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2020. Volume 6: Design, Systems, and Complexity. Virtual, Online.

115. Pileggi, Salvatore F., Amor . Addressing Semantic Geographic Information Systems. *Future Internet*. 2013. Vol.5(4). P. 585-590.

116. Polyanin A, Zaitsev V. Handbook of ordinary differential equations: exact solutions, methods and problems. CRC Press, 2017. 1496 p.

117. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I., Voytyuk I. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony. *13th Int. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. 2015. P. 196-199.

118. Power D. J., Phillips-Wren G. The impact of Social Media and Web 2.0 on Decision Making. *Journal of Decision Systems*. 2011. Vol 20(3). P.249-261.

119. Power D., Sharda R. Model-driven decision support systems: Concepts and research directions. *Decision Support Systems*, Vol. 43, Issue 3, 2007. P. 1044-1061.

120. Power D.J. Web-based and model-driven decision support systems: concepts and issues. *AMCIS 2000 Proceedings*. 2010. P.387.

121. Quinn M.J., Malishevsky A., Seelam N., Zhao Y. Preliminary results from a parallel MATLAB compiler. *The First Merged International Parallel Processing Symposium and Symposium on Parallel and Distributed Processing*. Orlando. 1998. P. 81-87.
122. Rastrigin L.A. Adaptation of complex systems. Zinatne: Riga, Latvia. 1981. 375 p.
123. Rittle-Johnson B. Developing mathematics knowledge. *Child Development Perspectives*. 2017. Vol. 11, Iss. 3. P. 184-190.
124. Rohn J. Input-output model with interval data. *Econometrica*. 1980. Vol. 48. P. 767-769.
125. Roldan-Molina G.R., Mendez J.R., Yevseyeva I., Basto-Fernandes V. Ontology fixing by using software engineering technology. *Appl. Sci*. 2020. Vol.10. 6328.
126. Rossum G. Python reference manual. Technical Report. CWI (Centre for Mathematics and Computer Science). NLD. 1995.
127. Saenz D. Advanced Java programming (Java SE 7). Virtual Training Company. 2013.
128. Sattar A., Salwana E., Surin M., Ahmad M., Mahmood A. Comparative analysis of methodologies for domain ontology development: a systematic review. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*. 2020. Vol. 11(5).
129. Schneider T., Šimkus M. Ontologies and data management: a brief survey. *Künstl Intell*, 2020. Vol. 34. P. 329–353.

130. Schweppe F.C. Recursive state estimation: unknown but bounded error and system inputs. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1968. Vol 1. P. 22–28.

131. Shary S.P. Algebraic approach to the interval linear static identification, tolerance, and control problems, or one more application of Kaucher Arithmetic. *Reliable Computing*. 1996. 2(1). P. 3-33.

132. Shary S.P. Solving the linear interval tolerance problem. *Mathematics and Computer in Simulation*. 1995. Vol. 39. P. 53-85.

133. Silva Y., Almeida I., Queiroz M. SQL: from traditional databases to big data. *47th ACM Technical Symposium on Computing Science Education*. Proceedings of the Conference. Association for Computing Machinery: New York, NY, USA. 2016. P. 413–418.

134. Slowik A. Swarm Intelligence Algorithms: modification and applications. 1st edition. CRC Press. 2020. 378 p.

135. Stepashko V., Moroz O. Hybrid searching GMDH-GA algorithm for solving inductive modeling task. *First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP'2016)*. Proceedings of the Conference. 2016. P.350-355.

136. Suresh P., Hsu S.-H., Akkisetty P., Reklaitis G., Venkatasubramanian V. OntoMODEL: ontological mathematical modeling knowledge management in pharmaceutical product development, 1: Conceptual framework. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2010. Vol. 49. P. 7768-7781.

137. Suresh P., Joglekar G., Hsu SH., Akkisetty P., Hailemariam L., Jain A., Reklaitis G., Venkatasubramanian V. Onto MODEL:

Ontological mathematical modeling knowledge management. *Computer-aided chemical engineering*. 2008. Vol. 25. P. 985-990.

138. Suresh S.S, Naidu M.M. , Asha Kiran. S. An XML Based Knowledge-Driven Decision Support System For Design Pattern Selection. *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 2012. Vol. 1(3) P. 1-13.

139. Susla M., Pasichnyk R., Melnyk A., Pasichnyk N., Vasylyuk 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.

140. Tardío, Roberto, Alejandro Maté, Juan Trujillo. A New Big Data Benchmark for OLAP Cube Design Using Data Pre-Aggregation Techniques. *Applied Sciences*. 2020. Vol.10, Issue 8674. P. 1–18.

141. Ting I., Wu H. Web Mining Techniques for On-Line Social Networks Analysis: An Overview. *Web Mining Applications in E-commerce and E-services*. Vol.172. P.169–179.

142. Trokanas N., Cecelja F. Ontology evaluation for reuse in the domain of Process Systems Engineering. *Comput. Chem. Eng.* 2016. Vol. 85. P. 177-187.

143. Tu SW., Eriksson H., Gennari JH., Shahar Y., Musen MA. Ontology-based configuration of problem-solving methods and generation of knowledge-acquisition tools: application of PROTEGE-II to protocol-based decision support. *Artif. Intell. Med.* 1995. Vol. 7(3). P. 257-289.

144. Turban E., Aronson J. Decision Support Systems and Intelligent Systems. New Delhi, India: Prentice Hall. 2001. 936 p.

145. Urmanchev V.I. Difference equations. Kyiv. 2018. 44 p.

146. Wendelberg L. An ontological framework to facilitate early detection of 'radicalization' (OFEDR) – A Three World Perspective. *J. Imaging*. 2021. Vol. 7, P. 60.

147. Yang L., Cormican K., Yu M. Ontology learning for systems engineering body of knowledge. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2021. Vol. 17. P. 1039-1047.

148. Ye J., Skiena S. MediaRank: computational ranking of online news sources. 2019. P. 2469-2477.

149. Yehia S., Abudayyeh O., Fazal I., Randolph D. A decision support system for concrete bridge deck maintenance. *Advances in Engineering Software*. Mar. 2008. Vol. 39(3). P. 202-210.

150. Zoeteman A. A life cycle costing based approach to design and maintenance of railway infrastructure. *Journal on Transport and Infrastructure Research*. 2001. Vol. 4(1). P. 391-413.

151. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія. Тернопіль: Економ. думка ТНЕУ. 2011. 215 с.

152. Дивак М.П., Манжула В.І. Інтервальна нелінійна модель розподілу амплітуди інформаційного сигналу в задачі виявлення та локалізації зворотного гортанного нерва в процесі хірургічних операцій. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2022. – № 1. – С. 65-75.

153. 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.

154. 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.

155. 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.

156. Дивак М.П., Порплиця Н.П., Дивак Т.М. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних: монографія. Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ. 2018. 220 с.

157. 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.

158. Колодчак О.М. Інтелектуальний аналіз даних. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Комп'ютерні системи та мережі*. 2013. № 773. С. 49-58.

159. 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.

160. 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.

161. 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.

162. 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.

163. Мокін Б.І., Мокін В.Б., Мокін О.Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем: Навчальний посібник. Вінниця: Вінницький національний технічний університет. 2010. 263 с.

164. Порплиця Н.П., Дивак М. П. Реалізація методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі алгоритму поведінки бджолоїної колонії. *Вісник*

Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2015. Вип. 4(93). С. 34-40.

165. Степашко В.С. Елементи теорії індуктивного моделювання. Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія. Кол. авторів. Київ: Наукова думка. 2010. С. 481-496.

166. Степашко В.С., Єфіменко С.М., Савченко Є.А. Комп'ютерний експеримент в індуктивному моделюванні. Київ: Наукова думка. 2014. 222 с.

167. Томашевський В.М. Моделювання систем. К: Видавнича група ВНУ. 2005. 352 с.

Наукове видання

**Дивак М.П., Мельник А.М., Манжула В.І.,
Співак І.Я., Порплиця Н.П.**

**ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНІ СИСТЕМИ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
ІНТЕРВАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ СКЛАДНИХ
ДИНАМІЧНИХ ТА СТАТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Монографія

Підписано до друку 27.03.2024 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Друк офсетний. Зам. № 24-279
Умов.-друк. арк. 13,7. Обл.-вид. арк. 15,7.
Тираж 300 прим.

Видавець Західноукраїнський національний університет
вул. Львівська, 11, м. Тернопіль 46009

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців ДК № 7284 від 18.03.2021 р.

Віддруковано ФО-П Шпак В. Б.
Свідоцтво про державну реєстрацію В02 № 924434 від 11.12.2006 р.
м. Тернопіль, бульвар Просвіти, 6/4. тел. 097 299 38 99.
E-mail: tooums@ukr.net

*Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до державного
реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 7599 від 10.02.2022 р.*