

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-70-2-2>

УДК 004.94

Андрій МЕЛЬНИК

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-7799-9877>

Микола ДИВАК

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-9049-4993>

Володимир МАНЖУЛА

Західноукраїнський національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5222-8443>

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЙ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ НА ОСНОВІ ПОЄДНАННЯ МЕТОДІВ ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТА ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ

Проблема побудови математичної моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту на різних ділянках міста з використанням методів інтервального аналізу та онтологічного підходу розглянута в цій статті. Досліджено особливості побудови таких моделей на основі періодичного вимірювання концентрацій шкідливих речовин та відповідної процедури ідентифікації на основі отриманих вимірювань.

В роботі запропоновано поєднання онтологічний підхід, як інструмент управління, який дозволяє значно спростити систематичні стандартизовані методи зберігання моделей, процес їх побудови та відповідного використання в практичних ситуаціях.

Процедура застосування онтологічної моделі дозволяє формалізувати процес отримання, зберігання та використання відповідних знань та підходить для більш інтелектуалізованих систем, такі як визначення завідомо хибних розв'язків на основі моделі, оптимізація процесу прийняття рішень на основі знань та моделювання відповідної технологічної схеми.

У цій роботі також описані особливості побудови відповідної онтологічної моделі, закономірність вибору нелінійної моделі. В результаті проведених експериментальних досліджень підтверджено ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: математичне моделювання, інтервальный аналіз, управління знаннями, онтологічний підхід.

Andriy MELNYK, Mykola DYVAK, Volodymyr MANZHULA

West Ukrainian National University

MODELING OF DYNAMICS OF CONCENTRATIONS OF HARMFUL EMISSIONS OF MOTOR TRANSPORT ON THE BASIS OF A COMBINATION OF METHODS OF THE INTERVAL ANALYSIS AND THE ONTOLOGICAL APPROACH

The problem of building a mathematical model of the dynamics of concentrations of harmful emissions from vehicles in different parts of the city using the methods of interval analysis and ontological approach is considered in this article. The peculiarities of construction of such models on the basis of periodic measurement of concentrations of harmful substances and the corresponding identification procedure on the basis of the received measurements are investigated.

The paper proposes a combination of ontological approach as a management tool, which significantly simplifies the systematic standardized methods of storing models, the process of their construction and appropriate use in practical situations.

The ontological modeling procedure formalizes the process of obtaining, storing, and using relevant knowledge and is suitable for more intelligent systems, such as identifying knowingly erroneous solutions based on a model, optimizing a knowledge-based decision-making process, and modeling an appropriate flow chart.

This paper also describes the features of the construction of the corresponding ontological model, the regularity of the choice of the nonlinear model. As a result of experimental studies, the effectiveness of the proposed approach was confirmed.

Keywords: mathematical modeling, interval analysis, knowledge management, ontological approach.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Об'єкти з розподіленими параметрами є найскладнішими з точки зору ідентифікації їх моделей. До такого класу об'єктів слід віднести просторовий розподіл забруднень шкідливими речовинами внаслідок інтенсивних викидів забруднюючих речовин точковими, чи просторово розподіленими джерелами з подальшою дифузією цих речовин в атмосферу, водні ресурси чи ґрунти [1-3]. Спектр задач, пов'язаний із необхідністю моделювання об'єктів з розподіленими параметрами далеко не обмежується зазначеними випадками. Подібні задачі, окрім згаданих екології та медицини виникають при управлінні технологічними процесами, при дослідженні адсорбційних та абсорбційних властивостей пористих структур, тощо [4]. Спрощеним варіантом моделей таких об'єктів є моделі динаміки. Переважно, моделювання цих об'єктів та процесів використовують диференціальні рівняння в частинних похідних та з похідними з часовою змінною. Для забезпечення високої точності та адекватності таких моделей необхідно урахувати специфіку

фізичних процесів чи збільшувати кількість впливових чинників, а також ускладнювати та деталізувати відображення їх взаємодії.

Альтернативним підходом до вищезазначеного, є індуктивний підхід, коли досліджуючи реальний об'єкт, накопичують результати спостережень, а потім на основі цих результатів «синтезують» математичну модель з окремих, наперед заданих елементів [5]. У результаті, отримують математичну модель у вигляді різницевої схеми, з коефіцієнтами-параметрами схеми, які не мають фізичного змісту. Зазначений підхід ще у кінці сімдесяти років минулого століття був запропонований академіком О.Г. Івахненком [6]. Такі моделі називають дискретними, бо вони побудовані на сітці дискретних результатів спостережень. Процес ідентифікації математичної моделі передбачає дві фази: структурну та параметричну. Важливо зазначити, що задачу параметричної ідентифікації математичної моделі багаторазово розв'язують на етапах розв'язування задачі структурної ідентифікації, що формує основну обчислювальну складність останньої.

Розв'язком задачі структурної ідентифікації є загальний вигляд дискретної математичної моделі. Складові елементи моделі визначені вектором базисних функцій, вектором параметрів, наборами векторів вхідних змінних (управлінь), а також порядком різницевої схеми. Обчислювальна задача структурної ідентифікації належить до класу NP-складних. Причому, її складність суттєво зростає, коли результати спостережень є неточними. У працях О. Івахненка та його послідовників розглянуто випадки, коли дані спостережень призводять до стохастичної постановки задачі, тобто похибки в даних є випадковими [5,6]. Разом, з тим такий спосіб представлення результатів спостережень, є дещо спрощеним, оскільки, переважно, похибки вимірювань є обмеженими. А у випадку необхідності забезпечення заданої точності моделі доцільно розглядати результати спостережень в інтервальному вигляді [1-4,7]. Своєю чергою це спричинює неможливість використання багатьох відомих методів як параметричної так і структурної ідентифікації, наприклад методів групового урахування аргументів (МГУА) [5,6].

У випадку використання інтервальних даних, обидві задачі параметричної та структурної ідентифікації дискретних моделей стають NP-складними задачами дискретної нелінійної оптимізації [4,7]. Для такого класу задач запропоновано ряд еволюційних обчислювальних методів. Проте, у праці [7] запропоновано використання еволюційного методу структурної ідентифікації дискретних моделей, який ґрунтується на поведінкових моделях штучної бджолиної колонії. Математичні механізми функціонування штучної бджолиної колонії запропоновано у працях Дєрвіса Карабоґи [8]. Надзвичайно висока обчислювальна складність реалізації цих методів суттєво стримує їх застосування для структурної ідентифікації дискретних моделей складних об'єктів. При цьому дослідження показали, що складові проблеми обчислювальної складності полягають у налаштуванні параметрів обчислювального алгоритму. Це є зокрема: виборі початкової множини структурних елементів моделі (різницевої схеми); виборі початкових структур моделей-претендентів, від яких залежить складність пошуку оптимальної структури; налаштуванні процедур виходу із локальних екстремумів оптимізаційної задачі структурної ідентифікації.

Разом з тим, на даний момент існує певний досвід застосування зазначених обчислювальних схем. Більше того розроблена онтологія математичного моделювання на основі інтервальних даних [9] та створено депозитарії інтервальних дискретних моделей для широкого класу об'єктів, які керуються певними онтологічними надбудовами. Вище зазначене створює можливості для удосконалення як теоретичних основ так і обчислювальної реалізації еволюційного методу структурної ідентифікації дискретних моделей складних динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами.

Постановка проблеми

Для моделювання процесів забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами нестационарними джерелами забруднення, наприклад автотранспорту, часто використовують диференціальні рівняння, або ж їх різницеві аналоги [10-13]. Для структурної ідентифікації різницевих рівнянь використовують метод побудований на основі поведінкових моделей бджолиної колонії [7].

Тепер розглянемо задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей динамічних об'єктів. Спочатку зробимо припущення щодо структури математичної моделі. Отже, розглянемо математичну модель об'єкта у вигляді такого різницевого рівняння:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-d}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \vec{g}, k = d, \dots, K \quad (1)$$

де v_k – модельована концентрація діоксиду азоту на часовій дискреті $k = d, \dots, K$; $\vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k$ – 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 (1) подано лінійне за параметрами різницеве рівняння. В цілому, не порушуючи

загальності розгляду, можемо припустити, що рівняння може бути і нелінійним. Результати вимірювань концентрацій діоксиду азоту подаємо у вигляді числових інтервалів можливих їх значень у певній точці та у рівномірно зафіксованих часових дискретах:

$$[z_k^-; z_k^+], \quad k = 0, \dots, K, \quad (2)$$

де z_k^- , z_k^+ - відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірюваних концентрацій, у часових дискретах $k = 0, \dots, K$.

Виконання вимог забезпечення точності математичної моделі в межах точності інтервальних даних призводить до такої інтервальної системи:

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [z_0^-; z_0^+], \dots, \\ \dots [\hat{v}_{d-1}^-; \hat{v}_{d-1}^+] \subseteq [z_{d-1}^-; z_{d-1}^+]; \\ z_k^- \leq \tilde{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-], \tilde{u}_0, \dots, \\ \dots, \tilde{u}_k) \cdot \hat{g} \leq z_k^+, k = d, \dots, K. \end{cases} \quad (3)$$

у якій перша стрічка – початкові умови, а наступні – умови узгодження експериментальних даних та прогнозованих, які будемо обчислювати на основі математичної моделі, параметри якої потрібно обчислити із системи (3). Спираючись на загальне представлення моделі об'єкта у вигляді різницевого рівняння (1), зазначену математичну модель, коли вже обчислено оцінки параметрів, подаємо таким виразом:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_k] &= [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \tilde{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-], \dots, \\ &\dots [\hat{v}_{k-1}^-], \tilde{u}_0, \dots, \tilde{u}_{d-1}, \tilde{u}_k) \cdot \hat{g}, \quad k = d, \dots, K. \end{aligned} \quad (4)$$

де $[\hat{v}_k]$ – інтервальна оцінка концентрації діоксиду азоту на часових дискретах $k = d, \dots, K$; \hat{g} – вектор оцінок параметрів моделі.

Усі обчислення, як при побудові моделі (4), так і при її застосуванні проводимо із застосуванням інтервальної арифметики. Тому такі моделі називаємо інтервальними дискретними моделями динамічних об'єктів (ІДМДО). Як бачимо, у випадку параметричної ідентифікації інтервальних моделей динаміки діоксиду азоту, маємо справу з математичною задачею, суть якої полягає у розв'язуванні або знаходженні хоча б одного розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР).

Сумісність ІСНАР (3) означає належність інтервалів значень прогнозованої концентрації діоксиду азоту $[\hat{v}_k]$ на часових дискретах $k = 0, \dots, K$ до інтервалів $[z_k^-; z_k^+]$, отриманих експериментально у тих же самих дискретах, тобто, коли виконуються такі умови:

$$[\hat{v}_k] \subseteq [z_k^-; z_k^+], k = 0, \dots, K \quad (5)$$

Отже, ітераційна процедура для методу оцінювання розв'язку ІСНАР (3) повинна ґрунтуватися на дослідженні на кожній ітерації «якості» оцінки параметрів математичної моделі, представленої різницеvim рівнянням (4). Якість оцінки параметрів на кожній l-тій ітерації задаємо величиною $\delta(\hat{g}_l)$ у вигляді різниці центрів найбільш віддалених між собою, модельованого, на основі різницевої схеми (4), та експериментального інтервалів $[z_k^-; z_k^+]$ для кожної дискрети – у випадку, коли ці інтервали не перетинаються.

У випадку перетину цих інтервалів, функцію $\delta(\hat{g}_l)$ визначатимемо найменшою шириною перетину серед прогнозних та експериментальних інтервалів. Вираз для функції $\delta(\hat{g}_l)$, для вище зазначених обох випадків, представимо у такому вигляді, відповідно:

$$\delta(\hat{g}) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \left| \text{mid}([\hat{v}_k]) - \text{mid}([z_k^-; z_k^+]) \right| \right\}, \text{ якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] = \emptyset, \exists k = 0, \dots, K \quad (6)$$

$$\delta(\hat{g}) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \text{wid}([\hat{v}_k]) - \text{wid}([\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+]) \right\},$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] \neq \emptyset, \forall k = 0, \dots, K$ (7)

Зауважимо, ІСНАР (3) є складною, оскільки кожне рівняння формується рекурентно. Тому, у випадку розробки ІДМДО, задача буде полягати в обчисленні тільки одного розв'язку ІСНАР (3).

Варто зауважити, що умови (5) завершення ітераційної процедури, своєю чергою, забезпечують виконання такої умови:

$$\delta(\hat{g}_l) = 0 \quad (8)$$

Для використання формул (6) та (7) в обчислювальних процедурах з метою обчислення значень функції $\delta(\hat{g}_l)$, перепишемо їх у розгорнутому вигляді:

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \begin{aligned} &\text{mid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, \\ &\dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}) - \\ &-\text{mid}([z_k^-; z_k^+]) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] = \emptyset, \exists k = 0, \dots, K$

$$\delta([\hat{g}_l^-; \hat{g}_l^+]) = \max_{i=1, \dots, N} \left\{ \begin{aligned} &\text{wid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, \\ &\dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}) - \\ &-\text{wid}(\vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \\ &\dots, \vec{u}_{d-1}, \vec{u}_k) \cdot \hat{g}) \cap [z_k^-; z_k^+] \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

якщо $[\hat{v}_k] \cap [z_k^-; z_k^+] \neq \emptyset, \forall k = 0, \dots, K$.

Важливим питанням залишається, як оптимальним чином організувати ітераційну процедуру обчислення послідовності інтервальних оцінок компонент векторів параметрів $\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_l, \dots$. Очевидно, що для забезпечення збіжності ітераційної процедури, необхідно забезпечити таку послідовність оцінювання значень функції $\delta(\hat{g}_1), \delta(\hat{g}_2), \dots, \delta(\hat{g}_l), \dots$, обчислених за виразом (9), або (10), яка призводить до виконання таких умов:

$$\delta(\hat{g}_1) > \delta(\hat{g}_2) > \dots > \delta(\hat{g}_l) > \dots > \delta(\hat{g}_{l=L} \subset \Omega), \quad (11)$$

де Ω - у даному випадку позначає область розв'язків ІСНАР (12).

Отже, задачу параметричної ідентифікації інтервальних моделей динамічного об'єкта, сформуємо у вигляді оптимізаційної задачі:

$$\delta(\hat{g}_l) \xrightarrow{\hat{g}_l} \min, \hat{g}_{jl} \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}],$$

$j = 1, \dots, m, l = 1, \dots, S$ (12)

де значення функції мети $\delta(\hat{g}_l)$ обчислюватимемо за формулою (9), чи (10).

Еволюційний обчислювальний метод структурної ідентифікації ІДМ складних об'єктів

АБК – це евристичний алгоритм, що ґрунтується на принципах ройового інтелекту. Вперше основні засади АБК (Artificial Bee Colony algorithm) були сформульовані турецьким вченим Карабогою Д. у 2005 році для розв'язування оптимізаційної задачі із складною функцією мети багатьох змінних [8]. Основна ідея АБК полягає у моделюванні поведінки колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару).

Як відомо, метод ґрунтується на реалізації чотирьох фаз діяльності колонії медоносних бджіл, які ітераційно повторюються до тих пір поки не буде досягнуто умову $\delta(\hat{g}_i^s) = 0$

На фазі ініціалізації задають основні параметри методу: LIMIT; S; $[I_{\min}; I_{\max}]$; mcn = 0 – поточний номер ітерації; MCN – загальну кількість ітерацій та множину структурних елементів F, а також випадковим чином формують початкову множину Λ_0 (з потужністю S) структур λ_s із набору структурних елементів F. Саме на цій фазі визначається складність реалізації обчислювальної схеми.

На фазі робочих бджіл використовують оператор $P(\wedge_{mcn}, F)$, який перетворює структури інтервальної моделі. На поточній ітерації реалізації методу структурної ідентифікації, цей оператор $P(\wedge_{mcn}, F)$ формує, на основі кожної з поточних структур λ_s математичної моделі, по одній «новій» структурі λ'_s , яка є близькою до поточної.

На цій фазі визначаємо кількість R_s структур, які будуть згенеровані на основі кожної λ'_s структури із множини Δ_{mcn}^1 . Зазначений показник R_s обчислюють за наступними процедурами.

Спочатку обчислюють ймовірність $P_s(\lambda_s^1)$ синтезу на основі поточної структури S новосформованих:

$$P_s(\lambda_s^1) = \frac{1}{\delta(\lambda_s^1) \cdot \sum_{s=1}^S \frac{1}{\delta(\lambda_s^1)}}, s = 1 \dots S-1. \quad (13)$$

Далі знаходять цілі значення кількості «нових» структур моделей, які потрібно сформувати на основі кожної поточної (відомої) структури за такою формулою:

$$R_s = \text{ToInt}(P_{s-1}(\lambda_{s-1}^1) \cdot S), s = 2 \dots S, R_1 = 0. \quad (14)$$

Далі, на цій фазі також використовують оператор $P_\delta(\wedge_{mcn}, F)$, який здійснює перетворення поточної структури у певну кількість R_s структур. При цьому, загальна кількість структур розподілених між поточними структурами, дорівнює S. Таким чином, $P_\delta(\wedge_{mcn}, F)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 з множини структур $\lambda_s^1 \in \Delta_{mcn}^1$ першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму $mcn = 0$, у множини структур λ'_s , $s = 1 \dots S$.

На фазі бджіл дослідників визначаємо кількість R_s структур, які будуть згенеровані на основі кожної λ_s^1 структури із множини Δ_{mcn}^1 .

Вихід із локальних мінімумів функції мети здійснюємо на фазі бджіл розвідників. Для цього для кожної поточної структури λ_s вводимо лічильник Limits, який збільшуємо на «1» кожного разу, якщо під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася», та обнуляємо - в іншому випадку. Порівняння значення цього лічильника з деякою, уведеною на фазі ініціалізації, константою LIMIT дає можливість прийняти рішення про те, чи поточна структура себе вичерпала. Якщо лічильник $Limit_s$ досягає значення LIMIT, то більше не доцільно модифікувати цю поточну структуру. Це означає знаходження в локальному мінімумі функції. Тоді, використовуємо оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, який випадковим чином генерує «нову» структуру λ_s^2 з множини F всіх структурних елементів випадковим чином, так як на фазі ініціалізації, тільки для однієї структури. Отже, таких структур буде тільки декілька відсотків від значення S (усіх робочих бджіл).

Аналіз вище наведеної обчислювальної схеми показує, що саме на фазі ініціалізації визначається її складність. Вона визначається правильністю та повнотою формування множини структурних елементів F, діапазоном $[I_{\min}; I_{\max}]$ можливої кількості структурних елементів різницевої схеми, встановленою кількістю ітерацій LIMIT для виходу із локальних мінімумів, а також заданою початковою множиною Λ_0 (з потужністю S) структур λ_s із набору структурних елементів F, яку, як відомо, формують випадковим

чином. Спираючись на той факт, що на даний момент існує онтологія математичного моделювання на основі інтервальних даних [9] та створено репозиторій інтервальних дискретних моделей для широкого класу об'єктів, які керуються певними онтологічними надбудовами, у даній праці запропоновано удосконалити метод структурної ідентифікації ІДМ динамічних об'єктів та об'єктів з розподіленими параметрами. Для цього повністю модифіковано фазу ініціалізації. Спочатку розглянемо особливості онтологічного опису об'єктів моделювання на основі ІДМ [13-15].

Поєднання еволюційного методу з онтологічним підходом

Виходячи із вищенаведеного аналізу властивостей ІДМ та методу його побудови, можемо вважати, що основними елементами цієї моделі є конкретний набір структурних елементів

$$F^S = \{f_1^S(\vec{V}), f_2^S(\vec{V}), \dots, f_{m_s}^S(\vec{V})\} \subset F, \text{ який обирають із } F = \{f_1(\vec{V}), f_2(\vec{V}), \dots, f_m(\vec{V})\} \text{ множини}$$

потенційних структурних елементів моделі, попередньо визначивши їх кількість $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$. Також для формування моделі у вигляді ІДМ необхідно встановити значення параметрів моделі $\hat{g}_{jl}^S \in [g_{jl}^{low}; g_{jl}^{up}]$, $j=1, \dots, m$. Для цього використовуємо процедури, які описано вище. Таким чином, формально такого типу математичні моделі описують набором із множин:

$$M_i^S = \langle V_0^S, F^S, G^S \rangle, \quad (15)$$

де

$V_0^S = \{[\hat{v}_{0,0,0,0}^-; \hat{v}_{0,0,0,0}^+] \subseteq [z_{0,0,0,0}^-; z_{0,0,0,0}^+], \dots, [\hat{v}_{d-1,d-1,d-1}^-; \hat{v}_{d-1,d-1,d-1}^+] \subseteq [z_{d-1,d-1,d-1}^-; z_{d-1,d-1,d-1}^+]\}$ -множина початкових умов; $G^S = \{\hat{g}_j^S, j=1, \dots, m\}$ - множина оцінок параметрів.

На стадії ініціалізації визначаємо обмеження на саму структуру моделі, а саме: набір структурних елементів $F = \{f_1(\vec{V}), f_2(\vec{V}), \dots, f_m(\vec{V})\}$, обмеження на значення елементів множини G^S у вигляді $\hat{g}_j^S \in [g_j^{low}; g_j^{up}]$, $j=1, \dots, m$, а також обмеження на кількість елементів в в структурі будь-якої ІДМ $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$.

За умови наявності репозиторію моделей, ці описи необхідно розширити до такого набору:

$$M_m^S = \langle V_0^S, F^S, G^S, F, I_{\min}, I_{\max}, G_{\min}, G_{\max}, \Lambda_0, M_a, M_o, M_c, A_{par} \rangle, \quad (16)$$

де $G_{\min} = \{g_j^{low}, j=1, \dots, m\}$, $G_{\max} = \{g_j^{up}, j=1, \dots, m\}$; Λ_0 - початкова множина структур; M_a - сфера математичного моделювання; M_o - набір об'єктів, для яких може бути використана модель; M_c - набір характеристик експерименту; A_{par} - параметри алгоритму структурної ідентифікації.

Як вище зазначено, параметри алгоритму ідентифікації є такими:

$$A_{par} = \{Limit, S, MCN\} \quad (17)$$

Сферу математичного моделювання M_a описуємо таким кортежем

$$Ma = \langle IdMa, NmMa \rangle, \quad (18)$$

де **IdMa** – ідентифікаторі предметної області; **NmMa** – предметна область.

Набір об'єктів M_o , для яких може бути використана модель задаємо таким кортежем:

$$Mo = \langle IdMo, NmMo, IdMa, V_0^S, F^S, G^S, F, I_{\min}, I_{\max}, G_{\min}, G_{\max}, \Lambda_0 \rangle \quad (19)$$

де *IdMo* – ідентифікатор об'єкта моделювання; *NmMo* це інформація, яка описує структуру об'єкта використання моделі.

Набір характеристик експерименту M_C матиме таку структуру:

$$M_C = \langle IdMc, MA, Dsc, IdMa, NA, IdMo, M_m^S \rangle \quad (20)$$

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

Спираючись на вище описане представлення предметної області для побудови ІДМ, з урахуванням існуючого депозитарію моделей, процес ідентифікації моделі буде залежати від предметної області, об'єкта та умов отримання результатів експерименту. Замість фази ініціалізації в алгоритмі бджолиної колонії встановлюємо вище зазначені характеристики M_a, M_o, M_c , після чого визначаємо умови виконання процесу ідентифікації. Для пошуку прийнятних умов для побудови моделі використовуємо поняття семантичної близькості [14,15]. При виявленні семантично близьких сфер моделювання, об'єктів чи умов отримання експерименту на фазі ініціалізації вище описаного методу розглядається один із можливих варіантів розв'язування задачі.

Варіант1. Задання початкових умов для ІДМ семантично близької задачі, знайденої в репозиторії. Якщо результат задовільний, тобто знайдена в репозиторії ІДМ має достатні прогностичні властивості для інших початкових даних, - завершення процедури ідентифікації. В протилежному випадку перехід до варіанту 2.

Варіант 2. Задання початкових умов та параметрів обчислювального алгоритму для структури ІДМ семантично близької задачі, знайденої в репозиторії та ідентифікація параметрів ІДМ. Якщо результат задовільний, тобто отримана модель з іншими значеннями параметрів та зі структурою ідентичною для знайденої в репозиторії ІДМ має достатні прогностичні властивості, - завершення процедури ідентифікації. В протилежному випадку перехід до варіанту 3.

Варіант 3. Задання початкових умов та параметрів обчислювального алгоритму, набору структурних елементів ІДМ семантично близької задачі, знайденої в репозиторії та структурна ідентифікація ІДМ згідно до обчислювальної схеми наступних трьох фаз.

Як бачимо, у випадку третього варіанту буде найвища обчислювальна складність реалізації еволюційних обчислень.

Експериментальні дослідження та оцінка ефективності

Розглянемо приклад застосування запропонованого підходу до моделювання об'єкта з розподіленими параметрами, яким є розподіл концентрації діоксиду азоту, який спричинено шкідливими викидами у вихлопних газах автотранспорту в заданій центральній ділянці міста Тернополя на автотранспортному кільці, до якого примикають вулиці С. Крушельницької, Збаразької, Бродівської та Галицької. Для отримання експериментальних даних використали комплекс вимірювання концентрації діоксиду азоту на базі модуля Sniffer4D Hyper-local Air Quality Analyzer з встановленим сенсором вимірювання діоксиду азоту та із телеметричним субмодулем для передачі даних на базову станцію у вигляді персонального комп'ютера із інстальованим стандартним програмним забезпеченням Sniffer4D Mapper. Сам модуль було встановлено на борту мобільної системи - квадрокоптера DJI M100. Вимірювання проводили з 13.00 до 13.10 на висоті $h=1,5$ метра від дорожнього полотна на ділянці розміром 32,43м на 32,43м (1051.883 Square Meter) (із дискретизацією заданої ділянки по 20 точок для кожної координати. Варто зазначити, що цей час характеризується відносно помірним трафіком руху автотранспорту.

Характеристики умов проведення вимірювань були такі: середні координати квадратної ділянки (в глобальній системі координат за навігаційною системою аеромобільного комплексу): Longitude (довгота): 25.5997; Latitude (широта): 49.5597; середня температура повітря у точках вимірювання: -2,6 C; відносна вологість повітря 72,4 %; атмосферний тиск: 97473 Pa; вітер північного напрямку, швидкість вітру 3 м/с.

Результати експерименту у вигляді виміряних концентрацій діоксиду азоту $z_{i,j,h,k}$, $i = 0...,19$, $j = 0...,19$, $h = const$, $k = const$ наведено на рисунку 1. Для отримання інтервалів можливих значень розподілу концентрацій діоксиду азоту $[z_{i,j,h,k}^-; z_{i,j,h,k}^+]$ $i = 0...,19$, $j = 0...,19$, $h = const$, $k = const$ за формулою (1), враховано відносну похибку вимірювань 15%.

ij	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	20,2	20,7	20,2	19,7	20,7	19,7	19,7	21,2	20,2	19,7	21,2	19,7	19,3	19,7	19,7	20,7	20,2	20,2	20,7	21,2
1	20,7	21,2	22,1	22,6	23,5	24,4	25,9	26,3	26,3	27,3	27,7	27,7	27,7	29,1	28,7	28,7	29,1	28,7	29,6	29,1
2	28,7	29,1	28,7	28,2	29,1	29,6	28,7	29,1	28,7	28,7	29,1	28,7	28,2	28,7	27,7	27,3	28,2	27,7	27,7	27,7
3	27,7	28,2	27,3	27,3	28,7	27,7	27,7	28,2	28,2	27,7	27,7	27,7	27,3	28,2	27,3	27,3	28,2	27,3	26,8	27,3
4	26,8	27,3	28,2	29,1	30,6	30,6	30,6	32	32,4	32,4	34,3	34,8	35,3	36,2	35,3	35,3	36,2	36,2	37,1	37,6
5	38,1	39	39	40,4	40,9	41,4	41,8	42,8	42,8	42,8	43,7	44,2	44,2	44,7	44,7	44,2	44,7	45,1	44,2	45,1
6	43,3	42,8	43,7	42,8	41,8	42,8	41,8	41,4	41,8	40,4	41,4	41,8	40,9	41,8	42,3	42,3	44,7	46,1	47,5	
7	48,4	49,8	50,8	50,8	51,2	52,2	52,2	52,2	53,6	53,6	53,6	53,6	53,1	54,1	53,1	52,7	54,1	53,1	52,7	53,1
8	53,1	53,1	52,7	52,2	52,2	52,2	51,7	51,7	52,2	52,2	52,2	52,7	51,7	51,2	50,8	49,8	50,3	49,4	48,4	49,4
9	48,4	47,5	48	48,9	48,9	48,9	48,4	48,9	49,8	49,4	49,8	50,3	50,3	51,2	52,2	51,7	51,7	52,7	54,1	55,9
10	55,9	56,9	59,7	60,2	61,1	64,9	66,3	68,6	71,3	72,9	76,2	79	79	79,9	82,7	82,7	83,2	84,6	84,2	84,2
11	84,2	84,2	85,1	84,2	83,7	84,6	83,7	83,2	83,7	82,7	82,3	82,3	81,3	80,9	79,9	79,5	79,5	78,5	78	
12	78,5	77,6	77,6	75,7	75,2	74,8	74,3	74,3	73,3	72,9	73,3	71,9	71,5	70,1	68,6	68,2	68,6	65,8	64,9	
13	64,9	63,9	63	63	62,1	61,1	60,6	60,6	61,6	60,6	59,7	60,2	60,2	59,2	60,2	59,7	59,2	59,2	58,8	58,8
14	59,2	58,8	58,3	58,3	57,4	57,4	56,9	56,4	55	54,5	54,5	54,5	53,1	52,2	52,7	52,2	50,3	50,8	50,8	48,9
15	48,9	48,4	47,5	47,5	46,5	46,1	46,5	45,6	46,1	47,5	47	46,1	46,5	45,1	46,1	45,1	44,2	45,1	44,2	43,7
16	43,7	43,7	42,3	41,8	41,4	40,9	40,9	40,4	40,4	40	39,5	38,6	39,5	39	38,6	38,6	38,1	39,5	38,6	37,6
17	39	39	38,6	38,1	39	38,1	38,1	38,6	39	40	39	38,6	39,5	39	39	39	39,5	39	39	38,6
18	39	40	39,5	39,5	40	40	40	40,9	40,4	40	40,9	40,9	41,4	41,8	41,8	42,8	42,3	41,8	42,3	42,8
19	42,8	44,2	45,1	45,6	48	48,4	48,9	51,2	51,2	51,2	52,7	52,2	51,7	51,7	51,7	52,2	51,7	51,7	52,7	52,2

Рис. 1. Результати вимірювання $Z_{i,j,k}$ концентрацій діоксиду азоту NO2 в $10^{-6} \frac{г}{м^3}$ на заданих дискретах

Для побудови IDM, що прогнозує розподіл концентрацій діоксиду азоту на вказаній ділянці необхідно розв'язати задачу структурної ідентифікації цієї моделі. Зважаючи на той факт, що у нашому розпорядженні є репозитарій IDM спробуємо спростити процес структурної ідентифікації за вище описаним методом. Для цього, спочатку розглянемо запит до побудованої семантичної мережі, яка розроблена для управління наявним репозитарієм IDM.

Відгуком мережі є семантичний опис «найближчої» до необхідної IDM:

$M_m^S = \langle V_0^S, F^S, G^S, F, I_{\min}, I_{\max}, G_{\min}, G_{\max}, \Lambda_0, M_a, M_o, M_c, A_{par} \rangle$, зокрема, сама модель є у такому вигляді:

$$[\hat{v}_{ijhk}] = 0,7952 + 0,3128[\hat{v}_{i,j-1hk}] - 0,1935[\hat{v}_{i-1,jhk}] + 0,17[\hat{v}_{i-1,j-1hk}] + 0,7149[\hat{v}_{i,j-2hk}] + 0,0171[\hat{v}_{i,j-3hk}]$$

Тепер реалізуємо процедури ідентифікації моделі на основі запропонованого підходу. Спочатку розглядаємо варіант 1. Задаємо початкові умови на основі даних рисунку 1 для IDM, тобто семантично близької задачі, знайденої в репозиторії:

$$[\hat{v}_{ijhk}] = [z_{i,j,h,k} - z_{i,j,h,k} * 0,005; z_{i,j,h,k} + z_{i,j,h,k} * 0,005], i = 0, j = 0, \dots, 2, h = const, k = const \quad (21)$$

В результаті проведених обчислень виявляється, що знайдена в репозиторії модель є адекватною для вищеописаного випадку. Результати обчислень наведено на рис. 2. Як бачимо прогнозовані значення знаходяться в межах експериментальних, тобто обмежувальні умови виконуються.

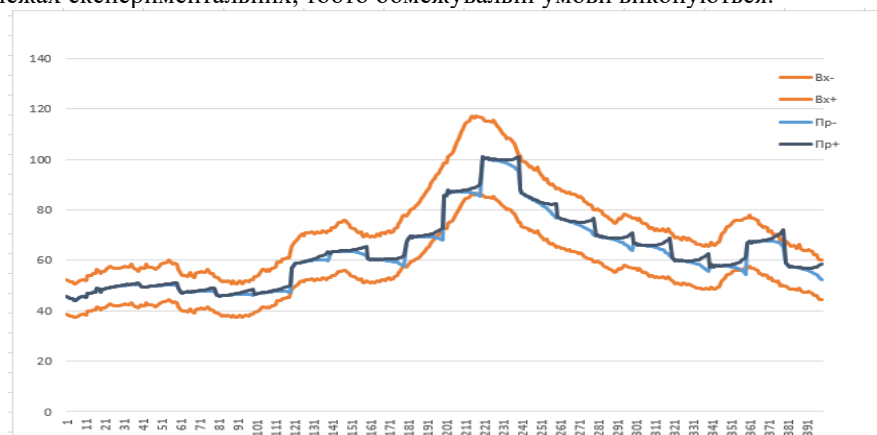


Рис. 2. Результати прогнозування на основі отриманої в репозиторії моделі і їх зіставлення з експериментальними даними

Таким чином на цьому процедуру ідентифікації завершуємо. Можемо констатувати, що для структурної ідентифікації такої моделі використано у близько 1000 раз менше часу, аніж для подібної моделі, яка знаходилася в репозиторії, що підтверджує високу ефективність запропонованого методу. Варто також зазначити, що семантична подібність між отриманою і знайденою ІДМ в репозитарії є дуже висока, тому і ефективність методу є також дуже висока. В подальших дослідженнях необхідно провести оцінку ефективності запропонованого методу структурної ідентифікації у випадках низької семантичної подібності.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Незважаючи на сучасний прогрес у більшості сфер використання та контролю процесу математичного моделювання, контроль знань у цій галузі є дуже перспективним напрямом науково-практичних досліджень.

В рамках даної роботи запропоновано підхід до побудови математичних та комп'ютерних моделей із застосуванням та поєднанням методів аналізу інтервальних даних та методів онтологічного аналізу з метою підвищення прогностичних характеристик моделей. Проведено ряд експериментальних досліджень, здійснено оцінку ефективності запропонованих підходів на прикладі побудови моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту.

У подальших дослідженнях планується масштабування розробленого програмного середовища для моделювання об'єктів із розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевих рівнянь на основі поєднання онтологічного підходу та аналізу інтервальних даних.

Література

1. Дивак, М. П. Ідентифікація дискретних моделей систем з розподіленими параметрами на основі аналізу інтервальних даних [Текст] : монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль: Економічна думка ТНЕУ, 2018. – 220 с.
2. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. - Т. : Економ. думка ТНЕУ, 2011. - 215 с.
3. Дивак М. П. Прикладні задачі структурної та параметричної ідентифікації інтервальних моделей складних об'єктів [Електронний ресурс] : монографія / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Н. П. Парплиця, А. М. Мельник. - Тернопіль : Університетська думка, 2021. - 212 с.
4. Dyvak M, Rot A, Pasichnyk R, Tymchyshyn V, Huliiev N, Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability. 2021; 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>
5. Ivakhnenko, G. Ivakhnenko, "The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling (GMDH)," Pattern Recognition and Image Analysis, 5 (4), pp. 527–535, 1995.
6. A. Ivakhnenko, V. Lapa, "Cybernetics and Forecasting Techniques," Modern Analytic and Computational Methods in Science and Mathematics, v.8 ed. American Elsevier, 1967.
7. 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. In Proceedings of the 2017 14th International Conference, The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017; pp. 50–54.
8. D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization," Technical Report—TR06; Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005
9. Mykola Dyvak, Andriy Melnyk, Artur Rot, Marcin Hernes, Andriy Pukas, "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022
10. Matviychuk, V.K.; Khar, I.O. Monograph. In Atmospheric Air Pollution; National Academy of Management: Kyiv, Ukraine, 2013; 272p.
11. De Corato, U. Towards New Soil Management Strategies for Improving Soil Quality and Ecosystem Services in Sustainable Agriculture: Editorial Overview. Sustainability 2020, 12, 9398.
12. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. Soil Syst. 2018, 2, 40.
13. Smit, R.; Kingston, P. Measuring On-Road Vehicle Emissions with Multiple Instruments Including Remote Sensing. Atmosphere 2019, 10, 516.
14. SW. Tu, H. Eriksson, JH. Gennari, Y. Shahar, MA. Musen, "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., 7(3), pp. 257-89, 1995, doi: 10.1016/0933-3657(95)00006-r. PMID: 7581625.
15. A. Sattar, E. Salwana, M. Surin, M. Ahmad, M. Ahmad, A. Mahmood, "Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review," International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(5), 2020.

References

1. Dyvak, M. P. Identifikatsiia dyskretnykh modelei system z rozpodilenymy parametramy na osnovi analizu intervalnykh danykh [Tekst] : monohrafiia / M. P. Dyvak, N. P. Porplytsia, T. M. Dyvak. – Ternopil: Ekonomichna dumka TNEU, 2018. – 220 s.
2. Dyvak M. P. Zadachi matematychnoho modeliuvannia statychnykh system z intervalnymy danyymi : monohrafiia / M. P. Dyvak. - T. : Ekonom. dumka TNEU, 2011. - 215 c.
3. Dyvak M. P. Prykladni zadachi strukturnoi ta parametrychnoi identyfikatsii intervalnykh modelei skladnykh ob'ektiv [Elektronnyi resurs] : monohrafiia / M. P. Dyvak, A. V. Pukas, N. P. Parplytsia, A. M. Melnyk. - Ternopil : Universytetska dumka, 2021. - 212 s.
4. Dyvak M, Rot A, Pasichnyk R, Tymchyshyn V, Huliiev N, Maslyiak Y. Monitoring and Mathematical Modeling of Soil and Groundwater Contamination by Harmful Emissions of Nitrogen Dioxide from Motor Vehicles. Sustainability. 2021; 13(5):2768. <https://doi.org/10.3390/su13052768>
5. Ivakhnenko, G. Ivakhnenko, "The Review of Problems Solvable by Algorithms of the Group Method of Data Handling (GMDH)," Pattern Recognition and Image Analysis, 5 (4), pp. 527–535, 1995.
6. A. Ivakhnenko, V. Lapa, "Cybernetics and Forecasting Techniques," Modern Analytic and Computational Methods in Science and Mathematics, v.8 ed. American Elsevier, 1967.
7. Dyvak, M.; Porplytsia, N.; Maslyiak, Y.; Kasatkina, N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control. In Proceedings of the 2017 14th International Conference, The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017; pp. 50–54.
8. D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization," Technical Report—TR06; Erciyes University: Kayseri, Turkey, 2005
9. Mykola Dyvak, Andriy Melnyk, Artur Rot, Marcin Hernes, Andriy Pukas, "Ontology of mathematical modelling based on interval data", Complexity, vol. 2022, Article ID 8062969, 24 pages, 2022
10. Matviychuk, V.K.; Khar, I.O. Monograph. In Atmospheric Air Pollution; National Academy of Management: Kyiv, Ukraine, 2013; 272p.
11. De Corato, U. Towards New Soil Management Strategies for Improving Soil Quality and Ecosystem Services in Sustainable Agriculture: Editorial Overview. Sustainability 2020, 12, 9398.
12. Moranda, A.; Cianci, R.; Paladino, O. Analytical Solutions of One-Dimensional Contaminant Transport in Soils with Source Production-Decay. Soil Syst. 2018, 2, 40.
13. Smit, R.; Kingston, P. Measuring On-Road Vehicle Emissions with Multiple Instruments Including Remote Sensing. Atmosphere 2019, 10, 516.
14. SW. Tu, H. Eriksson, JH. Gennari, Y. Shahar, MA. Musen, "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., 7(3), pp. 257-89, 1995, doi: 10.1016/0933-3657(95)00006-r. PMID: 7581625.
15. A. Sattar, E. Salwana, M. Surin, M. Ahmad, M. Ahmad, A. Mahmood, "Comparative Analysis of Methodologies for Domain Ontology Development: A Systematic Review," International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA), 11(5), 2020, <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2020.011051>