

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**Масляк Юрій Богданович**

УДК 519.24

**ІНТЕРВАЛЬНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ  
ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ ТА МЕТОДИ ЇХ  
ІДЕНТИФІКАЦІЇ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата  
технічних наук

Львів – 2019

Дисертація на правах рукопису.

Роботу виконано в Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,  
Заслужений діяч науки і техніки України  
**Дивак Микола Петрович,**  
Тернопільський національний економічний університет,  
декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Лупенко Сергій Анатолійович,**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана  
Пулюя Міністерства освіти і науки України, м. Тернопіль,  
професор кафедри комп'ютерних систем та мереж;


доктор технічних наук, професор **Гребеннік Ігор Валерійович,**  
Харківський національний університет радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України, м. Харків, завідувач кафедри  
системотехніки.

Захист відбудеться 13 грудня 2019р. о 16:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, 226 ауд. головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розіслано 12 листопада 2019р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
доктор технічних наук, професор



Р.А. Бунь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з актуальних проблем людства на сьогодні є забруднення атмосферного повітря. Основним джерелом забруднень у переважній більшості міст є автотранспорт. З огляду на істотні затрати часових та матеріальних ресурсів на моніторинг стану атмосферного повітря, для відображення та прогнозування концентрацій шкідливих викидів автотранспортних засобів доцільно використовувати математичне та комп'ютерне моделювання.

З точки зору теорії систем автомобільний транспорт, як джерело забруднень, слід розглядати як об'єкт з розподіленими параметрами, а для задач екологічного моніторингу важливим є моделювання динаміки забруднень атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. В цьому випадку використовують звичайні диференціальні рівняння. Найбільш ефективні методи для моделювання зазначених процесів наведено у працях таких українських та зарубіжних вчених: Р.А. Бунь, О.В. Громова, Р. Zannetti. Разом з тим, у математичних моделях, які наведено у працях зазначених вчених, необхідно враховувати значну кількість чинників. Зокрема, неоднорідність середовища поширення шкідливих викидів, різні фізичні процеси, такі як провітрюваність, вертикальні та горизонтальні теплові потоки повітря тощо. Це призводить до суттєвого ускладнення математичних моделей. Іншим підходом до математичного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту є індуктивний підхід. У цьому випадку, на основі даних спостережень, будують різницеві рівняння, які є аналогами диференціальних рівнянь. Для побудови цих дискретних рівнянь необхідно розв'язувати задачі їх структурної та параметричної ідентифікації. Найбільш ефективні методи розв'язування цих задач наведено у працях таких українських та зарубіжних вчених: В.С. Степашко, О.Г. Івахненко, Д. Гроп, Я.З. Ципкін, R. Haber, H. Akaike, L. Ljung, J.P. Norton, E. Vicino, D. Pollard. Проте, зазначені методи орієнтовані на випадки точного представлення результатів спостережень і не враховують невизначеності у вигляді похибок, значення яких часто є обмеженими. В цих випадках доцільно використовувати методи аналізу інтервальних даних, тобто даних з обмеженими за значенням похибками. У результаті отримуємо інтервальні дискретні динамічні моделі (ІДДМ), які описують динаміку забруднень.

Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації ІДДМ застосовують методи та алгоритми, які ґрунтуються на основі самоорганізації мультиагентних систем, зокрема, метод, який базується на поведінковій моделі бджолоїної колонії (ПМБК). Разом з тим, існуючий метод та обчислювальна схема його реалізації відзначається рядом недоліків, основним із яких є висока обчислювальна складність, причини якої досліджено слабо. Метод також дуже чутливий до якості та повноти сформованої початкової множини структурних елементів, на основі яких будують структуру ІДДМ. При вичерпанні можливостей поточних структур (вичерпання джерел нектару) щодо знаходження адекватної моделі, відомі обчислювальні схеми призводять до зациклювання. Зазначені недоліки спонукають до дослідження часових характеристик методу структурної ідентифікації ІДДМ, який ґрунтується на

поведінковій моделі бджолоїної колонії, та до його удосконалення.

З іншого боку, аналіз методів структурної ідентифікації ІДДМ у формі різницевих рівнянь показує, що ці методи є складними для реалізації користувачем, містять складні процедури параметричної ідентифікації і вимагають їх інтеграції в інформаційній технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

Виходячи із вище зазначеного, актуальною є науково-прикладна задача розвитку методів структурної ідентифікації ІДДМ у вигляді різницевих рівнянь, а також засобів їх реалізації, інтегрованих в єдине середовище для математичного та комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в умовах використання інтервальних даних, отриманих за допомогою сенсорів для вимірювання концентрацій шкідливих викидів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконувалася згідно з тематичним планом науково-дослідних робіт кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету протягом 2015 – 2018 років. Основні результати дисертаційного дослідження отримано в межах виконання таких тем: держбюджетна науково-технічна (експериментальна) розробка молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507); держбюджетне прикладне дослідження «Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах шії» (державний реєстраційний номер 0117U000410).

Вищезгадані роботи виконувалися за безпосередньої участі автора, який був виконавцем і розробив інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та методи їх ідентифікації.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є розвиток інструментарію, методів та засобів комп'ютерного моделювання динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту на основі різницевих рівнянь в умовах використання інтервальних даних.

Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено такі завдання:

- проаналізувати особливості існуючих математичних моделей та методів моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту;

- провести аналіз існуючих методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей у вигляді різницевих рівнянь для моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту;

- дослідити часові характеристики методу структурної ідентифікації ІДДМ, який ґрунтується на поведінковій моделі бджолоїної колонії, та удосконалити його з метою зниження обчислювальної складності;

- розробити інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в умовах використання інтервальних даних, отриманих за допомогою сенсорів;

- розробити ряд нових ІДДМ у вигляді різницевих рівнянь для моделювання динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту;

- провести апробацію розробленої інформаційної технології та математичних моделей для розв'язування задач моніторингу забруднень атмосфери автотранспортом на прикладі м. Тернополя.

*Об'єкт дослідження* – процеси забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та моделювання їх динаміки.

*Предмет дослідження* – інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та методи і засоби їх ідентифікації.

**Методи дослідження.** Для розробки інформаційної технології комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту використано системний підхід, методи теорії ідентифікації та кластерного аналізу. Удосконалення методу структурної ідентифікації ІДДМ здійснювалося із застосуванням методів аналізу інтервальних даних, кластерного аналізу, методів стохастичного програмування та теорії самоорганізації систем, зокрема, поведінкової моделі бджолиної колонії, а також методів оцінювання обчислювальної складності. Для побудови низки ІДДМ процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту використано методи теорії ідентифікації та інтервального аналізу. Для створення програмного забезпечення використано об'єктно-орієнтований підхід.

**Наукова новизна одержаних результатів.** У межах дисертаційної роботи:

- вперше створено інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує методи та засоби параметричної і структурної ідентифікації з процедурами автоматизованого формування набору структурних елементів різницевих рівнянь на основі кластерного аналізу інтервальних даних, і забезпечує результати моделювання цих процесів з гарантованою точністю;

- удосконалено метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолиної колонії, який, на відміну від існуючого, містить процедури автоматизованого формування набору структурних елементів, які ґрунтуються на методі субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних, що забезпечує підвищення якості формування початкової множини структурних елементів і, тим самим, – зниження обчислювальної складності реалізації методу;

- набули подальшого розвитку інтервальні дискретні моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту, які, на відміну від існуючих, забезпечують гарантовану точність та придатні для налаштування у залежності від умов середовища їх застосування.

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі розробленої інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту створено програмно-апаратну систему для моніторингу шкідливих викидів

автотранспорту. Основними компонентами архітектури створеної системи є мобільні та стаціонарні пункти для вимірювання концентрацій шкідливих викидів, укомплектовані газовими сенсорами та засобами передачі даних – GSM модулями. Центральним елементом архітектури є станція моніторингу, у якій реалізовано програмне забезпечення (ПЗ) для побудови комп'ютерних моделей динаміки шкідливих викидів автотранспорту, програмні засоби моделювання цих процесів та візуалізації результатів моделювання. Розроблена інформаційна технологія, система моніторингу та ІДДМ процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту впроваджені в державній установі «Тернопільський обласний лабораторний центр Міністерства охорони здоров'я України», що забезпечило підвищення якості моніторингу довкілля. Результати застосування засвідчено актом про їх впровадження.

Низка результатів дисертаційної роботи впроваджена в навчальний процес Тернопільського національного економічного університету при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю «Інженерія програмного забезпечення», що засвідчено довідкою.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автором: [1] – розроблено ІДДМ денного циклу оксиду вуглецю; [2] – проаналізовано обчислювальну схему реалізації методу параметричної ідентифікації ІДДМ; [3] – проаналізовано проблеми методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолиної колонії; [4] – запропоновано та обґрунтовано архітектуру системи екологічного моніторингу; [6] – проаналізовано вплив додаткових чинників ІДДМ на ускладнення процедури ідентифікації; [7] – запропоновано модифікацію методу структурної ідентифікації на основі поведінкової моделі бджолиної колонії; [8] – запропоновано модифікований метод кластерного аналізу на основі алгоритму субтрактивної кластеризації з модифікованою процедурою обрання радіусу кластера; [9] – запропоновано та обґрунтовано елементи інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та архітектуру програмної системи; [10] – удосконалено схему реалізації методу структурної ідентифікації; [11] – розроблено інформаційну технологію для моделювання процесів забруднення атмосфери автотранспортом; [12] – запропоновано модифікований метод субтрактивної кластеризації; [15] – розроблено ІДДМ забруднення атмосфери автотранспортом; [16] – модифіковано метод кластерного та інтервального аналізу в умовах неоднорідної вибірки даних; [17] – встановлено взаємозв'язок між інтенсивністю автотранспортних потоків та рівнем концентрацій шкідливих викидів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях та семінарах:

13-й та 14-й міжнародних конференціях “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” TCSET (Львів–Славське, 2016, 2018.); 12-й та 13-й міжнародних науково-технічних конференціях “Computer Science and Information Technologies” CSIT (Львів, 2017, 2018); 14-й та 15-й міжнародних конференціях “The Experience of

Designing and Application of CAD Systems” CADSM (Львів–Поляна, 2017, 2019); 18-й міжнародній конференції “Computational Problems of Electrical Engineering” CPEE (Кутна Гора, Чеська Республіка, 2017); 14-й міжнародній конференції “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH (Львів–Поляна, 2018); 1-й науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль, 2011); 4-й, 6-й Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів та 7-й Всеукраїнській конференції з міжнародною участю “Advanced Computer Information Technology” ACIT (Тернопіль, 2014, 2016, 2017); міжнародній конференції “Advanced Computer Information Technology” ACIT (Чеське Будейовице, Чеська Республіка, 2018); наукових семінарах кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2015-2019 рр.).

**Публікації.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 17 наукових праць із загальним обсягом 106 сторінок, з них 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 1 з яких входить до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, та 3 статті у фахових наукових виданнях України, 1 з яких входить до міжнародної наукометричної бази Web of Science, та 12 публікацій у матеріалах конференцій, 8 з яких входять до міжнародної наукометричної бази Scopus.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 122 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи складає 173 сторінки друкованого тексту, з них 128 сторінок основного тексту. Робота містить 30 рисунків і 10 таблиць.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність проблеми, сформульовано мету та основні задачі дослідження, визначено методи дослідження, сформульовано наукову новизну та практичну цінність дисертаційного дослідження, зазначено дані про особистий внесок автора, апробацію результатів роботи та публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз математичних моделей процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та методів їх ідентифікації.

Для зменшення негативного впливу автотранспорту на довкілля необхідно розробити систему моніторингу, основою якої є математичні моделі динаміки концентрацій забруднень внаслідок шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту. Серед існуючих моделей розсіювання забруднюючих речовин в атмосферному повітрі виділяють три найбільш поширених типи: емпірично-статистичні (модель Гаусса та ін.); статистичні (регресійні та ін.); моделі турбулентної дифузії (моделі математичної фізики). Застосування моделей першого типу для моделювання сукупного забруднення автотранспорту є проблемним, оскільки транспорт є розподіленим джерелом забруднення з невідомими для дослідника параметрами. До того ж, у цих моделях необхідно враховувати велику кількість чинників, які мають миттєву дію, що неможливо зафіксувати вимірювальними приладами і, відповідно, перевірити. Недоліком другого виду (статистичних) моделей є великі значення

похибок при довгострокових прогнозах внаслідок значних відхилень всередині вибірки даних та нестаціонарності процесу. Подібними недоліками, як у моделях першого виду, характеризуються моделі турбулентної дифузії. Окрім цього, іншим недоліком розглянутого типу моделей, є складність урахування інтенсивності джерел концентрацій для такого розподіленого об'єкта, яким є автотранспорт. Варто також зазначити, що моделі турбулентної дифузії є диференціальними рівняннями в частинних похідних або їх різницеві аналоги. За цих умов, доцільно отримати різницеве рівняння з невідомими на початку структурою та параметрами, та налаштувати їх з використанням вибірки даних. При цьому, дані експерименту доцільно представляти у вигляді інтервалів:

$$[z_k^-; z_k^+], k = 1, \dots, K, \quad (1)$$

де  $z_k^-, z_k^+$  – нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірної концентрації шкідливих речовин у момент часу  $k = 1, \dots, K$ , відповідно, які можна визначити при відомій відносній похибці вимірювань.

Математичну модель динаміки забруднення у точці представлимо у вигляді такого лінійного за параметрами різницевого рівняння:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-d}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \vec{g}, k = d, \dots, K, \quad (2)$$

де  $\vec{f}^T(\bullet)$  – вектор базисних функцій;  $v_k$  – значення модельованої характеристики в момент (період) часу  $k = d, \dots, K$ ;  $\vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$  – відомий вектор вхідних змінних з порядковим номером  $p = 1, \dots, P$ ;  $d$  – порядок різницевого рівняння;  $\vec{g}$  – невідомий вектор параметрів різницевого рівняння.

Нехай вектор оцінок  $\widehat{\vec{g}}$  параметрів  $\vec{g}$  у різницевому рівнянні (2) отримано на основі аналізу інтервальних даних. Підставляючи його замість вектора їх істинних значень  $\vec{g}$  у вираз (2) разом із заданими початковими інтервальними значеннями кожного елемента із набору  $[\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}]$  та заданими векторами вхідних змінних  $\vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$ , отримаємо інтервальну оцінку модельованої характеристики  $[\hat{v}_k]$  у моменти часу  $k=d, \dots, K$ :

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \vec{g}, k = d, \dots, K, \quad (3)$$

де  $[\hat{v}_k]$  – інтервальні оцінки модельованої характеристики на всіх часових дискретах  $k=d, \dots, K$ .

Враховуючи, що усі обчислення у виразі (3) здійснюються із використанням інтервальної арифметики, це різницеве рівняння будемо називати інтервальною дискретною динамічною моделлю (ІДДМ). Умови отримання інтервальних оцінок модельованої характеристики процесу в межах похибок вимірювань, тобто в межах числових інтервалів, отриманих експериментально, сформулюємо у такому вигляді:

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subset [z_k^-; z_k^+], \forall k = 1, \dots, K. \quad (4)$$

Звідси отримаємо таку інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР):



$$\left\{ \begin{array}{l} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [z_0^-; z_0^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \subseteq [z_{k-1}^-; z_{k-1}^+]; \\ [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-; \hat{v}_{k-d}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}; \\ z_k^- \leq \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-; \hat{v}_{k-d}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g} \leq z_k^+; \\ k = d, \dots, K. \end{array} \right. \quad (5)$$

Таким чином, задача ідентифікації параметрів ІДДМ (3) за умов (4) є задачею оцінювання розв'язків ІСНАР у вигляді (5).

Для розкриття суті постановки задачі структурної ідентифікації ІДДМ, використаємо такі позначення:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\}, \quad (6)$$

де  $\lambda_s$  – набір елементів поточної структури ІДДМ;  $\vec{f}^s = \{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet); \dots; f_{m_s}^s(\bullet)\} \subset F$  – набір структурних елементів, що задає поточну  $s$ -ту структуру ІДДМ.

Введемо позначення:  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$  – кількість елементів у поточній структурі  $\lambda_s$ ;  $F$  – множина усіх структурних елементів,  $F = \{f_1(\bullet); \dots; f_l(\bullet); \dots; f_L(\bullet)\}$ , де  $|F| = L$  – потужність множини  $F$ ;  $\vec{g}^s = \{g_1^s; g_2^s; \dots; g_{m_s}^s\}$  – вектор невідомих значень параметрів поточної структури.

Розв'язок задачі структурної ідентифікації полягає в отриманні такого набору елементів  $\lambda_0$ , щоб для них можна було сформулювати структуру ІДДМ

$$[v_k(\lambda_0)] = [f_1^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_1^0 + [f_2^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_2^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_{m_0}^0, \quad (7)$$

для якої виконувалися б умови (4).

Для оцінки якості поточної структури ІДДМ використовують значення показника  $\delta(\lambda_s)$ , який кількісно виражає наближеність поточної структури до задовільної у сенсі забезпечення умов (4). Показник  $\delta(\lambda_s)$  називатимемо функцією мети оптимізаційної задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

Значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$  для поточної структури ІДДМ  $\lambda_s$  обчислюють з таких виразів:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=d, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}^s) - \text{mid}([z_k]) \right| \right\}, \quad (8)$$

$$\text{якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k] = \emptyset \quad \exists k = d, \dots, K;$$

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=d, \dots, K} \left\{ \text{wid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}^s) - \right. \quad (9)$$

$$\left. - \text{wid}([\vec{f}_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}^s] \cap [z_k]) \right\},$$

$$\text{якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k] \neq \emptyset \quad \forall k = d, \dots, K.$$

Отже, задачу структурної ідентифікації ІДДМ формально запишемо у вигляді задачі знаходження мінімуму функції мети  $\delta(\lambda_s)$ :

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \vec{f}_s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \vec{f}_s(\bullet) \in F. \quad (10)$$

Для розв'язування задачі (10) проаналізовано спектр методів: редукції структури математичної моделі; «нарощування» структури; метод групового урахування аргументів (МГУА); генетичні алгоритми та метод, який базується

на поведінковій моделі бджолоїної колонії.

У підсумку проведеного аналізу усіх методів структурної ідентифікації встановлено, що ці методи є складними для реалізації користувачем, містять складні процедури параметричної ідентифікації і вимагають створення інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, яка б інтегрувала як методи та засоби отримання даних, їх попереднього аналізу, так і методи та засоби структурної та параметричної ідентифікації для побудови адекватних ІДДМ процесів забруднення атмосфери.

У завершальній частині розділу здійснено постановку завдань дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** дисертації розкриває суть удосконаленого методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії.

Розглянемо структуру організації обчислень у цьому методі, виходячи із часової складності реалізації її компонент. Для цього виокремимо основні обчислювальні процедури, результатом яких є оптимальна структура ІДДМ. На рис. 1 наведено отриману узагальнену структурну схему організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ. Як бачимо зі схеми, реалізація методу структурної ідентифікації вимагає багаторазового виконання ряду циклів з метою синтезу поточних структур ІДДМ  $\lambda_s$ , які, своєю чергою, є комбінацією у певний спосіб обраних структурних елементів  $f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s \in F$ . Останні мають множники  $g_i^s$ , які є параметрами ІДДМ і обчислюються у результаті розв'язування задачі параметричної ідентифікації.

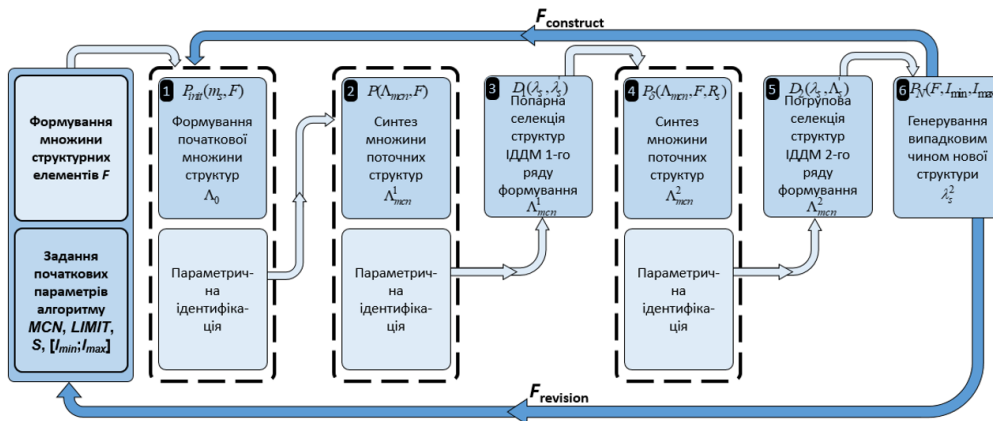


Рисунок 1 – Структурна схема організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ

Далі, для кожної структури обчислюємо значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , яке визначає якість поточної структури, і порівнюємо «якість» поточних структур, щоб визначити «найкращі». У випадку знаходження оптимальної структури, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , зупиняємо обчислювальну процедуру. У протилежному випадку продовжуємо процедури комбінування компонент «найкращих» структур. Як бачимо, спочатку формуємо множину структурних елементів  $F$  та задаємо значення параметрів алгоритму:  $MCN$ ,  $LIMIT$ ,  $S$ ,  $[I_{min}; I_{max}]$ .

Після кожного формування набору структур необхідно для кожної поточної структури проводити процедуру параметричної ідентифікації ІДДМ, тобто обчислювати значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . Отже, обчислювальна складність методу структурної ідентифікації ІДДМ в основному визначається двома процедурами: формування набору структур та параметричною ідентифікацією цих новостворених структур. Із рис. 1 бачимо, що для формування набору структур використовують три різних оператори: оператор  $P_{init}(m_s, F)$  – для формування початкової множини структур  $\Lambda_{mcn}$  випадковим чином комбінуючи структурні елементи із множини  $F$  за умови  $MCN=0$  та заданої кількості  $m_s$  структурних елементів із встановленого діапазону; оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$  – для синтезу множини поточних структур другого ряду формування, який перетворює структури-предки у вигляді різницевих рівнянь у набір інших структур, кількість яких обчислюємо показником  $R_s$  для кожної «структури-предка», і третій оператор  $P_N(F, I_{min}, I_{max})$  – для генерування випадковим чином «нових» структур ІДДМ  $\lambda_s$  з множини всіх структурних елементів при умові, що усі структури, для яких  $Limit_s \geq LIMIT$ , вважаються «вичерпаними» (цей оператор у контексті бджолиної колонії означає пошук нового джерела нектару).

Далі у цьому розділі проведено детальний аналіз складності обчислювальної реалізації вище зазначених операторів та процедур. Для цього отримано співвідношення для необхідної кількості виконання операцій додавання та множення.

У результаті проведених досліджень зроблено висновок: до зростання часової складності призводить наявність у процедурі структурної ідентифікації можливих обчислень по двох зовнішніх циклах, позначених на схемі, відповідно,  $F_{construct}$  та  $F_{revision}$ . Кожен з них вимагає найбільшої кількості реалізацій методу параметричної ідентифікації. Перша петля  $F_{construct}$  пов'язана із потребою вибору нових структурних елементів із множини  $F$ , коли інші структури «вичерпані», а друга петля  $F_{revision}$  передбачає оновлення початкового набору структурних елементів.

Таким чином, обґрунтовано, що визначальною щодо обчислюваної складності реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолиної колонії є якість формування початкової множини структурних елементів, яку в існуючому методі здійснювали емпірично. Тому, запропоновано цю процедуру автоматизувати на основі попереднього кластерного аналізу вибірки інтервальних даних.

Як відомо, невизначеність та неточність даних призводить до потреби їх інтервального представлення. Наприклад, інтервальне представлення результатів спостережень у задачі побудови ІДДМ концентрацій шкідливих викидів автотранспорту пов'язане із двома групами чинників: похибок вимірювань, граничні межі яких визначаються характеристиками вимірювальних пристроїв, та похибок, пов'язаних із неврахуванням дії різних, у тому числі, і випадкових чинників. Такими важливими чинниками для цього класу задач є різні характеристики точки, для якої будуємо динамічну модель, наприклад: природна вентиляція; наявність вертикальних та горизонтальних потоків

повітря тощо. Припустимо, що дія цих чинників є адитивною, тобто справедливою є залежність:

$$[\hat{v}_k(\lambda_s)] = \sum_{i=1}^m f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s + G(\lambda_s), \quad (12)$$

де  $G(\lambda_s)$  – функція у структурі різницевого рівняння, пов'язана із неврахованими чинниками.

Наявність невідомої функції  $G(\lambda_s)$  у структурі різницевого рівняння (12) суттєво ускладнює задачу структурної ідентифікації, оскільки підвищує неоднозначність зв'язку між вихідною характеристикою  $[\hat{v}_k(\lambda_s)]$  та вхідними (врахованими) чинниками. Одним із способів урахування цієї невизначеності може бути розширення інтервалів у вибірці інтервальних даних, що обов'язково призведе до втрати у точності моделі. Інший підхід полягає в усуненні невизначеності, пов'язаної з адитивною компонентою  $G(\lambda_s)$  у процесі попередньої обробки інтервальних даних, застосовуючи такі перетворення:

$$\frac{\partial v_k(\lambda_s)}{\partial u_{p,k}} = \frac{\partial(\sum_{i=1}^m f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s)}{\partial u_{p,k}} + \frac{\partial G(\lambda_s)}{\partial u_{p,k}}. \quad (13)$$

Припускаючи, що незалежність між  $G(\lambda_s)$  та компонентами вектора вхідних чинників  $u_{1,k}, \dots, u_{p,k}$  відсутня, отримаємо нуль у другому доданку (13).

Для дискретної вибірки даних процедура (13) наближено може бути виконана у такий спосіб:

$$\frac{\partial v_k(\lambda_s)}{\partial u_{p,k}} \approx \frac{z_k - z_{k-1}}{u_{p,k} - u_{p,k-1}}, k = 1, \dots, K, \quad (14)$$

де  $z_k, z_{k-1}, k = 1, \dots, K$  – центри інтервалів вимірної вихідної характеристики.

За необхідності, процедуру (14) повторюємо до тих пір, коли буде усунено неоднозначність зв'язку між вихідною характеристикою та вхідними змінними. При цьому, застосування методу субтрактивної кластиризації дає можливість після кожного перетворення вхідних даних перевірити, чи усунено неоднозначність. Зазначені міркування покладено в основу методу та алгоритму формування початкової множини структурних елементів для побудови ІДДМ концентрацій шкідливих викидів автотранспорту.

Нехай задано набір вхідних даних для проведення структурної ідентифікації:

$$[z_k^-; z_k^+], u_{p,k}, p=1, \dots, P, k=1, \dots, K. \quad (15)$$

Як основу для кластеризації вхідних даних, використаємо субтрактивний метод кластеризації. Варто зазначити, що, на відміну від існуючого методу кластеризації, у запропонованому радіус кластера є фіксованим:  $r = \max_{k=1, \dots, K} (z_k^+ - z_k^-) / 2$ .

У результаті проведеної кластеризації отримаємо  $H$  кластерів. Однозначною залежністю між вихідною характеристикою та вхідними змінними будемо вважати випадок, коли проєкції кластерів не перетинаються

на осі залежних змінних, як це проілюстровано на рис. 2,в. Це означає можливість знаходження однозначної залежності у межах початково заданої ширини інтервалів для вихідної характеристики, тобто радіусу кластера, для кластерів номер  $h$  та номер  $j$ . Математично зазначену умову запишемо у такому вигляді:

$$\exists [u_{proj,h}^-; u_{proj,h}^+] \cap [u_{proj,j}^-; u_{proj,j}^+] = \emptyset, \quad h = 1, \dots, H; \quad j = 1, \dots, J; \quad h \neq j. \quad (16)$$

де  $u_{proj,h}^-, u_{proj,h}^+$  – нижнє та верхнє значення інтервалу, отриманого внаслідок проекції  $h$ -го кластера на вісь залежних змінних;  $u_{proj,j}^-, u_{proj,j}^+$  – нижнє та верхнє значення інтервалу, отриманого внаслідок проекції  $j$ -го кластера на вісь залежних змінних.

У протилежному випадку, застосовуємо для усіх дискрет вибірки перетворення (14) і для перетвореної вибірки повторюємо процедуру кластеризації. Якщо зазначена процедура виконана на одній ітерації і при цьому забезпечено виконання умови (16), то можемо стверджувати, що у множині структурних елементів для задачі структурної ідентифікації необхідно ввести такий елемент:

$$f_i^s(\bullet) = \frac{z_{k-1} - z_{k-2}}{u_{k-1} - u_{k-2}}. \quad (17)$$

На рис. 2 показано послідовність перетворення вибірки вхідних даних. Рис. 2,в ілюструє виконання умови (16) і завершення процедури визначення необхідного набору структурних елементів для задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

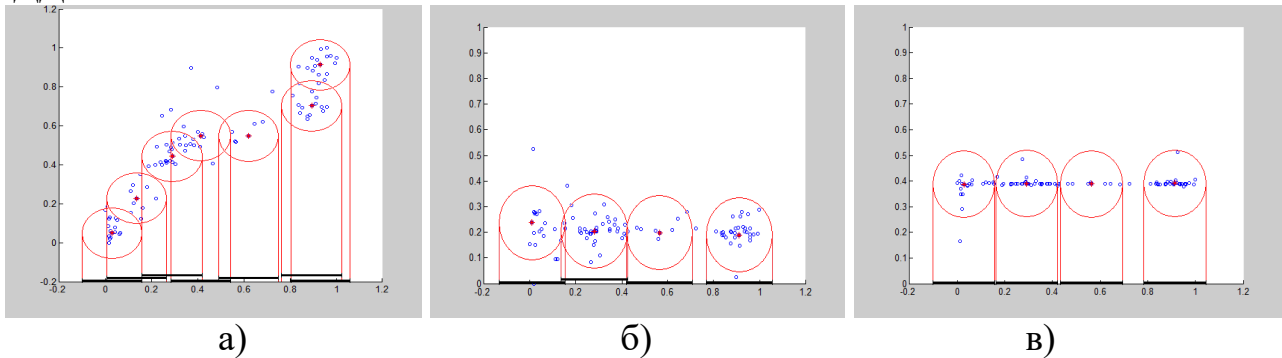


Рисунок 2 – Інтервали проекцій кластерів на вісь вхідної змінної: а) для вихідної вибірки; б) на першій ітерації перетворення вибірки; в) на кінцевій ітерації

Таким чином, у початкову множині структурних елементів для задачі структурної ідентифікації за результатами кожної ітерації додаємо до елементи (17) і, за необхідності, скінченні різниці вищих порядків.

У завершальній частині розділу наведено приклади застосування формування початкової множини структурних елементів для задачі структурної ідентифікації ІДДМ на прикладі моделювання добового циклу динаміки концентрацій діоксиду азоту (хімічна формула –  $\text{NO}_2$ ).

Таким чином, удосконалено метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолиної колонії, який, на відміну від існуючого, містить процедури автоматизованого формування набору структурних елементів на основі методу субтрактивної кластеризації вибірки вхідних

даних, що забезпечує підвищення якості формування початкової множини структурних елементів і, тим самим, – зниження обчислювальної складності реалізації методу.

У третьому розділі наведено результати розробки засобів для моделювання процесів динаміки забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

Спочатку розглянуто нову інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує методи та засоби параметричної і структурної ідентифікації з процедурами автоматизованого формування набору структурних елементів різницевих рівнянь на основі кластерного аналізу інтервальних даних, і забезпечує результати моделювання цих процесів з гарантованою точністю.

Схему реалізації інформаційної технології наведено на рис. 3.

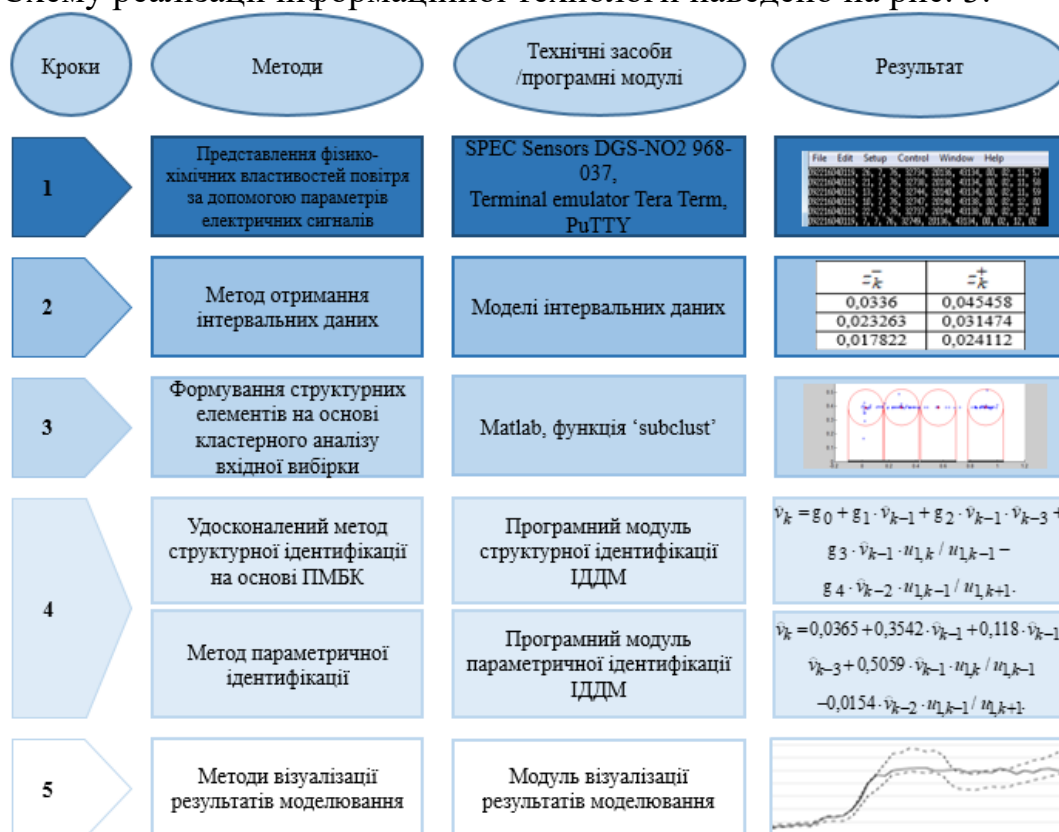


Рисунок 3 – Схема реалізації інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери вихлопними газами автотранспорту

Як бачимо, інформаційна технологія інтегрує такі методи: методи представлення фізико-хімічних властивостей повітря за допомогою параметрів електричних сигналів, методи отримання інтервальних даних, методи кластеризації даних, методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей процесів динаміки забруднення атмосфери, а також методи візуалізації результатів моделювання.

В інформаційній технології також інтегровано технічні засоби: сенсори концентрацій шкідливих викидів автотранспорту (зокрема, «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037»), в яких також вмонтовано сенсори для визначення температури

та вологості повітря, сенсори для вимірювання інтенсивності автотранспортних потоків, які разом із сенсорами для вимірювання концентрацій шкідливих викидів підключено до одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi3, що здійснюють попередню обробку результатів вимірювань. Кожен одноплатний комп'ютер обладнаний також GSM-модулем, через який здійснюється передача даних до центрального сервера.

Далі у цьому розділі обґрунтовано архітектуру програмно-апаратної системи для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту. Автоматизована система моніторингу шкідливих викидів автотранспорту виконує такі завдання: збір, накопичення та обробку інформації про забруднюючі атмосферу речовини, що є продуктами викиду відпрацьованих газів автомобілів, у залежності від інтенсивності автотранспортного потоку; моделювання ситуації щодо стану забруднення атмосферного повітря; прогнозування забруднення атмосферного повітря шкідливими викидами автотранспорту; забезпечення підтримки прийняття оперативних управлінських рішень, від виконання яких безпосередньо залежить здоров'я та екологічне благополуччя населення.

Архітектуру системи екологічного моніторингу представлено на рис. 4.

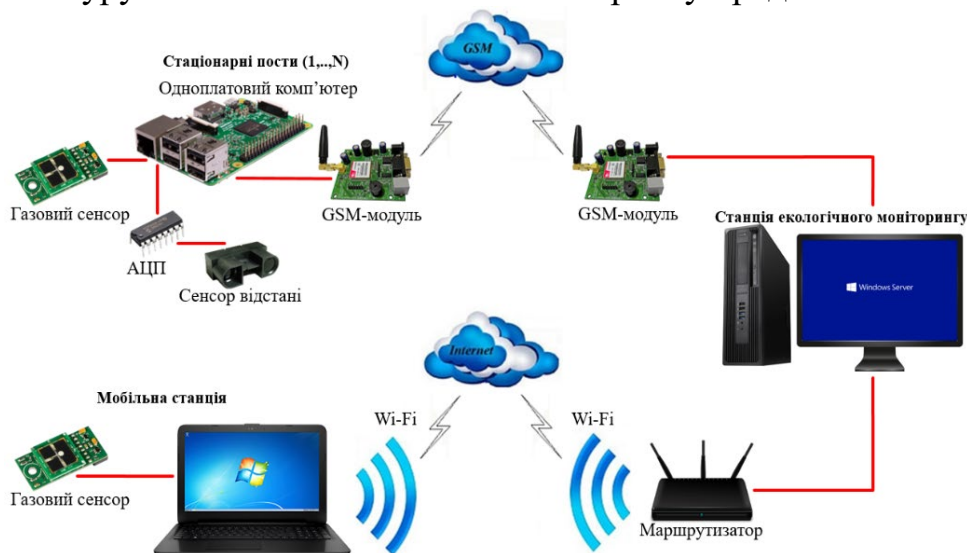


Рисунок 4 – Схематичне представлення архітектури системи екологічного моніторингу

Станція моніторингу являє собою сервер, на якому знаходяться: база даних виміряних концентрацій  $\text{NO}_2$ , програмне забезпечення для побудови математичних моделей з метою прогнозування часового розподілу вказаних концентрацій. Також, на станції моніторингу реалізовано серверну частину веб-орієнтованої системи для відображення результатів моделювання та архівних даних рівня концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в атмосферному повітрі м. Тернополя.

У четвертому розділі, з використанням розроблених програмних засобів реалізації методів структурної та параметричної ідентифікації ІДДМ, побудовано комплекс інтервальних моделей процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

Розроблена інформаційна технологія, в основі якої є методи структурної



та параметричної ідентифікації, дає можливість розв'язувати задачу встановлення добового циклу концентрацій шкідливих викидів автотранспорту. Розглянемо приклад побудови такої моделі у м. Тернопіль на перехресті вулиць «Бродівська – Збараська – Довга». Дані для побудови моделі отримано 7 квітня 2015 року. Похибка вимірювання концентрацій оксиду вуглецю (СО) спектроаналізатором типу „СФ-26“ складала 25 %. Із застосуванням розробленої технології та засобів, отримано таку ІДДМ:

$$[\hat{v}_k] = -0,52637 + 0,19304 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0,02816 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-2}] + 0,75903 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_k / u_{k-1}, (19)$$

де  $[\hat{v}_k]$  – прогнозована концентрація СО в  $k$ -й момент часу;  $u_k$  – інтенсивність автотранспортних потоків в  $k$ -й момент часу.

Експериментальні та прогнозовані дані представлено на рис. 5, зокрема, суцільними лініями представлено виміряні інтервальні значення концентрацій, а штриховими – прогнозовані інтервали концентрацій оксиду вуглецю. Як бачимо, модель у вигляді різницевого рівняння (1) зберігає логіку добового циклу зміни концентрацій шкідливих викидів у залежності від інтенсивності транспортних потоків. Також бачимо, що прогнозована динаміка добового циклу зміни концентрацій оксиду вуглецю знаходиться у межах експериментальних даних і визначає концентрацію оксиду вуглецю в межах похибок спостережень.

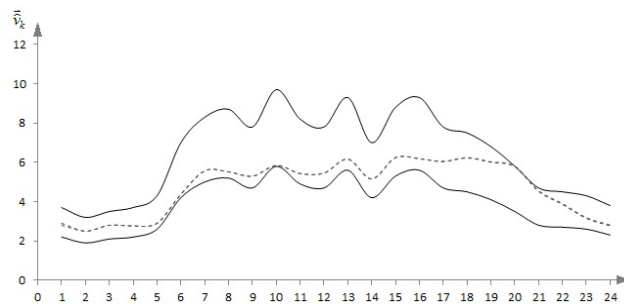


Рисунок 5 – Добовий цикл концентрацій оксиду вуглецю на перехресті вулиць «Бродівська – Збараська – Довга», м. Тернопіль

Наступними в цьому розділі розглянуто комплекс моделей для прогнозування динаміки концентрацій діоксиду азоту. Зокрема, модель для точки на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя:

$$[\hat{v}_k] = 0,0365 + 0,3542 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0,118 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-3}] + 0,5059 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{1,k} / u_{1,k-1} - 0,0154 \cdot [\hat{v}_{k-2}] \cdot u_{1,k-1} / u_{1,k+1}. (20)$$

Результати моделювання із застосуванням моделі (20) представлено на рис. 6. Штриховими лініями зображено інтервали вимірних значень концентрації діоксиду азоту, а суцільними – інтервали прогнозованих значень. Як видно з рис. 6, інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту знаходяться у межах інтервалів вимірних значень концентрацій діоксиду азоту не для усіх дискрет. Спроби знайти адекватну ІДДМ для цього випадку призводили до суттєвого зростання порядку різницевого рівняння.

Для верифікації отриманої моделі (20) використано дані вимірних концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою



м. Тернополя на десятигодинному часовому інтервалі: з 11:00 до 21:00 год. Результати застосування моделі для вказаного перехрестя представлені на рис. 7. Як бачимо, інтервали прогнозованих значень концентрацій  $\text{NO}_2$  знаходяться в межах інтервалів вимірних концентрацій не для усіх дискрет.



Рисунок 6 – Добовий цикл концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича, м. Тернопіль



Рисунок 7 – Динаміка концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою, м. Тернопіль

Також було встановлено причину неадекватності побудованої ІДДМ (20), а саме, в обох випадках результати кластерного аналізу підтверджують неоднозначність зв'язку між вимірною концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю транспортних потоків. Для побудови універсальної моделі, яка би була придатною для опису динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту для різних перехресть (принаймні, цих двох) доцільно доповнити елементи початкової множини структурних елементів для методу структурної ідентифікації на основі описаної в розд. 2 методики. У результаті застосування цієї методики множину структурних елементів для задачі структурної ідентифікації ІДДМ було доповнено елементами у вигляді (17).

Застосування методу структурної ідентифікації ІДДМ з доповненими елементами дали можливість отримати таку ІДДМ:

$$\begin{aligned} [\hat{v}_k] = & 0.0674 + 0.0752 \cdot ([\hat{v}_{k-1}] - [\hat{v}_{k-2}]) / (u_{k-1} - u_{k-2}) + 0.1722 \cdot [\hat{v}_{k-5}] \cdot [\hat{v}_{k-7}] - \\ & - 0.1269 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0.0006 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{k-1} - 0.0778 \cdot [\hat{v}_{k-5}] \cdot u_{k-8} / u_{k-2}. \end{aligned} \quad (21)$$

Результати застосування отриманої моделі (21) представлено на рис. 8.

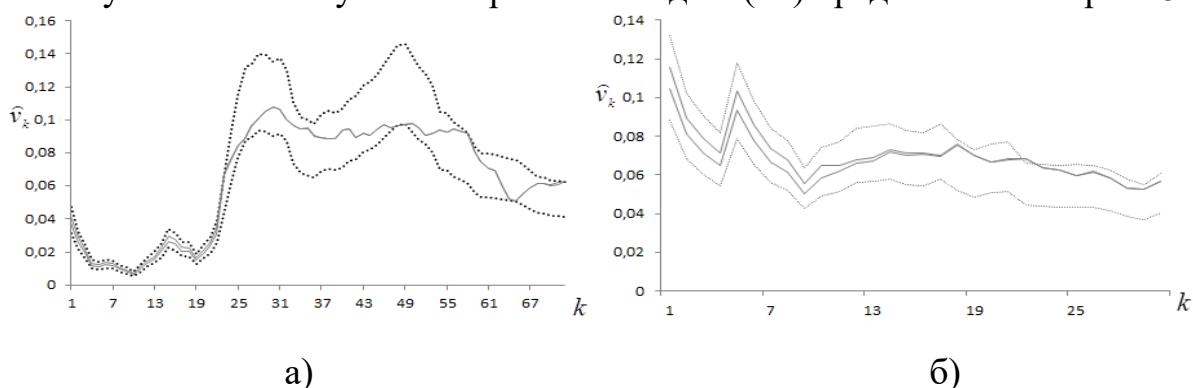


Рисунок 8 – Динаміка концентрацій діоксиду азоту на основі «універсальної» ІДДМ (21) на перехрестях вулиць м. Тернополя: а) Чехова – За Рудкою, б) Руська – Замкова – Шашкевича

Як бачимо, в обох випадках інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту знаходяться у межах інтервалів вимірних концентрацій для усіх дискрет, що підтверджує обґрунтованість ідей, закладених в основу удосконаленого методу структурної ідентифікації ІДДМ.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розвитку методів структурної та параметричної ідентифікації, а також засобів їх реалізації, інтегрованих в єдине середовище для математичного та комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, які базуються на використанні інтервальних даних, отриманих з сенсорів для вимірювання концентрацій шкідливих викидів. При цьому, отримано такі наукові та практичні результати.

1. Проведено дослідження методів моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. Встановлено класи цих моделей та обґрунтовано використання для цих цілей різницевого рівняння, які є аналогами відповідних диференціальних рівнянь. Запропоновано здійснювати налаштування цих рівнянь на основі експериментальних даних.

2. Проаналізовано методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей у вигляді різницевого рівняння. Встановлено, що у випадку обмежених за значеннями вимірювальних похибок концентрацій шкідливих викидів доцільно використовувати методи аналізу інтервальних даних. Обґрунтовано для моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту використання методу структурної ідентифікації на основі поведінкової моделі бджолиної колонії. Сформульовано основні недоліки цього методу, зокрема, висока обчислювальна складність реалізації.

3. Встановлено, що основним фактором, який впливає на обчислювальну складність методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолиної колонії, є якість формування початкового набору структурних елементів, що слугувало підставою для його удосконалення. Цей метод, на відміну від існуючого, містить процедури автоматизованого формування набору структурних елементів, які, у свою чергу, ґрунтуються на методі субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних. У сукупності це забезпечує підвищення якості формування початкової множини структурних елементів і, тим самим, – зниження обчислювальної складності реалізації методу.

4. Вперше створено інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, яка, на відміну від існуючих, інтегрує методи структурної та параметричної ідентифікації на основі інтервальних даних, отриманих з допомогою сенсорів, і забезпечує побудову комп'ютерних моделей у вигляді дискретних рівнянь з гарантованими прогностичними властивостями.

5. Набули подальшого розвитку інтервальні моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту, які, на відміну від існуючих, забезпечують гарантовану точність та придатні для налаштування у залежності від умов середовища їх застосування.

6. Достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджено апробацією розробленої інформаційної технології, програмно-апаратного комплексу та комплексу математичних моделей для розв'язування задач моніторингу забруднень атмосфери автотранспортом на прикладі м. Тернополя.

### ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Dyvak M., Stakhiv P., Pukas A., Voytyuk I., Porplytsya N., Maslyiak Y. Interval model of dynamics of dispersion of harmful pollution from vehicular traffic // *Journal of Applied Computer Science*. 2016. Vol. 24, № 3. P. 49-60.

2. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyak Y., Shynkaryk M. Method of parametric identification for interval discrete dynamic models and the computational scheme of its implementation // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer. 2018. Vol. 689. P. 101-112. (Індексується міжнародними наукометричними базами Scopus та Web of Science).

3. Дивак М.П., Порплиця Н.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Мельник А.М. Метод ідентифікації моделей об'єктів із розподіленими параметрами з просторово розподіленим керуванням на основі аналізу інтервальних даних // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. № 2. С. 150-159. (Індексується міжнародною наукометричною базою Web of Science).

4. Дивак М.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранспорту // *Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ, 2017. Вип. 9. С. 69-84.*

5. Масляк Ю.Б. Метод моделювання розподілу концентрацій шкідливих викидів автотранспорту з використанням кластерного та інтервального аналізів // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2018. № 1 (26). С. 34-40.

6. Dyvak M., Maslyiak Y., Porplytsya N., Pukas A., Dyvak T. Drywall humidity modeling during its drying process under condition of changing the temperature fields based on interval difference operator / *Proc. of the 13<sup>th</sup> Intern. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. 2016. P. 136-139. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

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 // *Proc. Of the 14<sup>th</sup> Intern. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017)*. 2017. P. 50-54. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

8. Dyvak M., Pukas A., Maslyiak Y., Stakhiv P., Cegielski M. Using a neural network with radial basis functions for task of recurrent laryngeal nerve monitoring based on electrophysiological approach // *Computational Problems of Electrical Engineering: Proc. of the 18<sup>th</sup> Intern. Conf. (CPEE'2017)*. 2017. P. 1-4. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

9. Maslyiak Y., Pukas A., Voytyuk I., Shynkaryk M. Environmental monitoring system for control of air pollution by motor vehicles // *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Proc. of the 14<sup>th</sup> Intern. Conf. (MEMSTECH'2018)*. 2018. P. 250-254. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

10. Dyvak M., Porplytsya N., Tymets V., Maslyiak Y. Method of structural identification of a model for recurrent laryngeal nerve localization // Computer Sciences and Information Technologies: Proc. of the 13<sup>th</sup> Intern. Sci. and Tech. Conf. (CSIT'2018). 2018. Vol. 1. P. 470-474. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

11. Dyvak M., Maslyiak Y., Pukas A. Information technology for modeling of atmosphere pollution processes by motor vehicle harmful emissions // Experience of Designing and Application of CAD Systems: Proc. of the 15<sup>th</sup> Intern. Conf. 2019. P. 2/91-2/95. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

12. Dyvak M., Maslyiak Y., Voytyuk I., Maslyiak B. Modified method of subtractive clustering for modeling of distribution of harmful vehicles emission concentrations // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2300: International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2018). 2018. P. 58-62. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

13. Масляк Ю.Б. Динамічна модель генерування електроенергії МГЕС «Топольки» // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. 2014. С. 29-30.

14. Масляк Ю.Б. Імітаційна модель для дослідження розподілу вологості гіпсокартону при різних температурних полях його сушіння // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали VI Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів (ACIT'2016). 2016. С. 25-26.

15. Масляк Ю.Б., Заєць В.О. Підхід до побудови математичної моделі забруднення атмосфери автотранспортом в залежності від інтенсивності його руху // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: Матеріали Всеукраїнської конференції з міжнародною участю (ACIT'2017). 2017. С. 231-232.

16. Dyvak M., Maslyiak Y., Papa O., Savka N. Clustering and interval analysis of heterogeneous data sample // Computer Sciences and Information Technologies: Proc. of the 12<sup>th</sup> Intern. Sci. and Tech. Conf. (CSIT'2017). Vol. 1. 2017. P. 528-532. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

17. Dyvak M., Oliynyk I., Maslyiak Y., Pukas A. Static interval model of air pollution by motor vehicles and its identification method // Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: Proc. of the 14<sup>th</sup> Intern. Conf. (TCSET'2018). 2018. P. 859-863. (Індексується міжнародною наукометричною базою Scopus).

## АНОТАЦІЇ

**Масляк Ю.Б. Інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та методи їх ідентифікації.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної наукової задачі розвитку методів структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей (ІДДМ) у вигляді різницевих рівнянь, а також засобів їх реалізації, інтегрованих в єдине середовище для математичного та

комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в умовах використання інтервальних даних, отриманих за допомогою сенсорів для вимірювання концентрацій шкідливих викидів.

У роботі проаналізовано особливості існуючих математичних моделей та методів моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту; проведено аналіз існуючих методів структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей у вигляді різницевого рівнянь; досліджено часові характеристики методу структурної ідентифікації ІДДМ, який ґрунтується на поведінковій моделі бджолої колонії, та удосконалено його з метою зниження обчислювальної складності; розроблено інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в умовах використання інтервальних даних; розроблено ряд нових ІДДМ для моделювання динаміки зазначених процесів; проведено апробацію розробленої інформаційної технології та математичних моделей для розв'язування задач моніторингу забруднень атмосфери автотранспортом на прикладі м. Тернополя.

*Ключові слова:* моделювання процесів забруднення атмосфери автотранспортом, інтервальна дискретна динамічна модель, структурна ідентифікація, поведінкова модель бджолої колонії, інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь.

**Масляк Ю.Б. Интервальные модели процессов загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта и методы их идентификации.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2019.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи развития методов структурной идентификации интервальных дискретных динамических моделей (ИДДМ) в виде разностных уравнений, а также средств их реализации, интегрированных в единую среду для математического и компьютерного моделирования процессов загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта в условиях использования интервальных данных, полученных с помощью сенсоров для измерения концентраций вредных выбросов.

В работе проанализированы особенности существующих математических моделей и методов моделирования процессов загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта; проведен анализ существующих методов структурной и параметрической идентификации математических моделей в виде разностных уравнений; исследованы временные характеристики метода структурной идентификации ИДДМ, основанного на поведенческой модели пчелиной колонии, и усовершенствован он с целью снижения вычислительной сложности; разработана информационная технология для компьютерного моделирования процессов загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта в условиях использования интервальных данных; разработан ряд новых ИДДМ для моделирования динамики указанных процессов;

проведена апробация разработанной информационной технологии и математических моделей для решения задач мониторинга загрязнений атмосферы автотранспортом на примере г. Тернополя.

*Ключевые слова:* моделирование процессов загрязнения атмосферы автотранспортом, интервальная дискретная динамическая модель, структурная идентификация, поведенческая модель пчелиной колонии, интервальная система нелинейных алгебраических уравнений.

**Maslyiak Y.B. Interval models of atmosphere pollution processes by harmful emissions of motor vehicles and methods of their identification.** – On the rights of manuscript.

The dissertation for obtaining the candidate of technical sciences degree on specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The dissertation is devoted to solving of the actual scientific task of development of structural identification methods for interval discrete dynamic models (IDDM) in the form of difference equations. Also, tools for their realization integrated into a single environment for mathematical and computer modeling of atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles using interval data obtained by sensors.

In the work, features of existing mathematical models and methods of modeling of atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles have been analyzed; the analysis of existing methods of structural and parametric identification of mathematical models in the form of difference equations for modeling of atmospheric pollution processes by harmful emissions of motor vehicles has been conducted; time characteristics of the IDDM structural identification method which is based on behavioral model of bee colony have been investigated; the method of IDDM structural identification based on behavioral model of bee colony has been improved, which, unlike the existing one, contains procedures of automated formation of initial structural elements set; to implement these procedures, the method of subtractive clustering of input data sample has been used, that ensured increase in quality of formation of initial set of structural elements and reduction in computational complexity of implementation of the structural identification method in general; information technology for computer modeling of atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles using interval data obtained by sensors has been developed; a number of new IDDMs in the form of difference equations for modeling of dynamics of atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles has been developed; approbation of the developed information technology and mathematical models for solving of problems of atmospheric pollution monitoring on the example of Ternopil city has been conducted. The developed information technology allows to solve the problem of establishing of daily cycle of concentrations of harmful emissions from motor vehicles taking into account the influence of traffic flow intensity.

*Keywords:* modeling of atmospheric pollution by motor vehicles, interval discrete dynamic model, structural identification, bee colony behavioral model, interval system of nonlinear algebraic equations.