

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

Войтюк Ірина Федорівна

УДК 519.24

**СТРУКТУРНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ РІЗНИЦЕВИХ ОПЕРАТОРІВ
МЕТОДАМИ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Львів – 2012

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Тернопільському національному економічному університеті Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Дивак Микола Петрович,
Тернопільський національний економічний університет,
декан факультету комп'ютерних інформаційних
технологій, завідувач кафедри комп'ютерних наук

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Матвійчук Ярослав Миколайович,
Інститут підприємництва та перспективних
технологій Національного університету «Львівська
політехніка», м. Львів, завідувач кафедри
інформаційних систем і технологій

доктор технічних наук, професор
Степашко Володимир Семенович,
Міжнародний науково-навчальний центр
інформаційних технологій та систем Національної
академії наук та Міністерства освіти і науки, молоді
та спорту України, м. Київ, завідувач відділом
інформаційних технологій індуктивного моделювання

Захист відбудеться 15 березня 2012 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.05 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. С.Бандери, 12.

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

Автореферат розіслано 14 лютого 2012 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор

Р.А. Бунь

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Інтенсивний розвиток обчислювальної техніки створив умови для побудови складних систем, де частка програмної складової суттєво перевищує частку апаратної. До таких систем відносять програмно-апаратні комплекси для екологічного моніторингу довкілля. Однією із задач, яку розв'язують вказані системи, є оцінювання просторового розподілу концентрацій шкідливих викидів хімічних речовин та співставлення їх із граничнодопустимими. Особливістю таких систем є наявність програмних модулів для моделювання процесів поширення шкідливих викидів на основі експериментальних даних, отриманих із застосуванням спектроаналізаторів, які характеризуються достатньо низькою точністю вимірювань. В цьому випадку апріорну невизначеність доцільно описувати в інтервальному вигляді, а побудову математичних моделей здійснювати на методах макромоделювання із застосуванням аналізу інтервальних даних.

Однією із основних проблем макромоделювання є вибір загального вигляду макромоделі, тобто розв'язування задач структурної ідентифікації. При цьому, у випадку моделювання процесів поширення хімічних речовин базою для вибору структури макромоделі можуть слугувати диференціальні рівняння в частинних похідних або їх різницеві аналоги. Найбільш значущі результати при дослідженні проблематики структурної ідентифікації математичних моделей отримали наукові школи таких українських та зарубіжних вчених: Я. З. Ципкін, О. Г. Івахненко, Н. Akaike, L. Ljung, J. Rissanen, D. Pollard. В основі усіх відомих методів структурної ідентифікації макромоделей у вигляді різницевих операторів є критерії оцінки якості структури, які ґрунтуються на мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними. В умовах великих похибок спектроаналізаторів такий підхід є неприйнятним. Більш природнім було б розв'язувати задачу синтезу структури макромоделі у вигляді різницевих операторів за умови забезпечення її прогностичних властивостей в межах похибок спостережень на основі теоретико-множинного та інтервального підходів. Методи аналізу інтервальних даних в достатній мірі описані у працях наукових шкіл таких вчених як В. М. Кунцевич, М. М. Личак, Ю. І. Шокін, С. П. Шарий, проте у них відсутня проблематика структурної ідентифікації різницевих операторів, що й обумовлює актуальність науково-технічної задачі, розглянутої у даному дослідженні.

Отже, у дисертаційній роботі розглянуто актуальну науково-технічну задачу структурної ідентифікації різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних, отриманих за результатами спостережень реальних процесів з похибками, обмеженими за амплітудою.

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 2008 – 2011 років. Дисертаційна робота безпосередньо пов'язана з:

- науково-дослідною роботою «Математичні методи, інтервальні моделі та інформаційні технології для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (номер державної реєстрації 0110U001125), у якій автором розроблено макромоделювання, яка відображає залежність добового циклу зміни концентрацій діоксиду азоту від інтенсивності транспортних потоків у заданій точці міста;

- науково-дослідною роботою «Методи та засоби математичного моделювання

складних систем на основі теоретико-множинного та інтервального підходів» (номер державної реєстрації 0106U012529), у якій автором розроблено метод та програмне забезпечення для структурної ідентифікації макромоделей у вигляді різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних.

Усі вищезгадані роботи виконувались за безпосередньої участі автора.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є розробка методів та алгоритмів структурної ідентифікації різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних та їх застосування для задач макромоделювання процесів поширення шкідливих викидів хімічних речовин у системах екологічного моніторингу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно вирішити такі основні завдання:

- проаналізувати особливості застосування макромоделей у вигляді різницевих операторів для моделювання процесів у системах екологічного моніторингу;
- провести аналіз методів та алгоритмів ідентифікації макромоделей об'єктів в умовах структурної невизначеності;
- розробити критерії оцінки якості та складності структури моделей у вигляді інтервальних різницевих операторів (ІРО);
- формалізувати задачу структурної ідентифікації ІРО;
- розробити метод та генетичний алгоритм структурної ідентифікації ІРО;
- провести апробацію розроблених методу та алгоритму структурної ідентифікації ІРО при розв'язуванні задач макромоделювання процесів поширення концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в м. Тернополі.

Об'єкт дослідження – процеси поширення шкідливих викидів автотранспорту та їх макромоделювання у вигляді різницевих операторів.

Предмет дослідження – методи структурної ідентифікації макромоделей у вигляді різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних.

Методи дослідження. Для розробки критеріїв оптимальності структур різницевих операторів використано теоретико-множинний та інтервальний підходи. Розробка методу та алгоритму структурної ідентифікації ІРО здійснювалась із застосуванням методів аналізу інтервальних даних та теорії еволютивних алгоритмів. Для дослідження показників оптимальності структур ІРО, збіжності та часової складності методу та алгоритму структурної ідентифікації використано комп'ютерне моделювання. Розв'язування інтервальних систем нелінійних алгебричних рівнянь здійснювалося методами математичного програмування. Для створення програмного забезпечення реалізації алгоритмів структурної ідентифікації використано об'єктно-орієнтований підхід.

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

- на основі аналізу інтервальних даних запропоновано та обґрунтовано показники якості структури макромоделі у вигляді різницевого оператора, які на відміну від існуючих забезпечують гарантовану точність макромоделі в межах похибок експериментальних даних при мінімальній складності;
- формалізовано задачу структурної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО як багатокритеріальну задачу дискретної оптимізації з обмеженнями, заданими інтервальною системою нелінійних алгебричних рівнянь;
- створено новий метод структурної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО,

який за рахунок використання генетичних алгоритмів з модифікованими базовими операціями, орієнтованими на кодування хромосом у десятковій системі числення, забезпечує розв'язування багатокритеріальної задачі пошуку структури макромоделі з гарантованими прогностичними властивостями та контрольованою складністю.

Набули подальшого розвитку методи структурної ідентифікації різницевого оператора для макромоделей полів концентрацій шкідливих викидів, зокрема які прогнозують концентрації викидів діоксиду азоту з похибками, що не перевищують інтервальні похибки експериментальних даних.

Практичне значення одержаних результатів. На основі розробленого методу та генетичного алгоритму створено програмне забезпечення для структурної ідентифікації макромоделей у вигляді ІРО, яке практично впроваджено для розв'язування задач екологічного моніторингу в санітарно-епідеміологічній станції м. Тернополя, що засвідчено довідкою про впровадження. Розроблене програмне забезпечення функціонує як окремий програмний модуль в системі екологічного моніторингу і використовується для підтримки прийняття рішень щодо перевищення граничнодопустимих концентрацій забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. Програмна реалізація методу та алгоритму структурної ідентифікації ІРО може бути також впроваджена в науково-дослідних установах та підрозділах міністерства надзвичайних ситуацій для дослідження і прогнозування наслідків екологічних та техногенних катастроф. За результатами проведених у дисертаційній роботі досліджень, створено методичне та програмне забезпечення, яке використовують у Тернопільському національному економічному університеті для викладання дисциплін «Інтервальні обчислення», «Математичне забезпечення програмних систем», «Дискретні динамічні системи», що засвідчено довідкою про впровадження.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, викладені у дисертації, отримані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, здобувачем: [1] – проведено апробацію розроблених методу та алгоритму структурної ідентифікації ІРО при розв'язуванні задач макромоделювання процесів поширення шкідливих викидів автотранспорту в м. Тернополі; [2] – здійснено формальне представлення показників якості структури ІРО та їх дослідження засобами комп'ютерного моделювання; [3] – формалізовано оптимізаційну задачу структурної ідентифікації ІРО; [4] – удосконалено алгоритм та розроблено програмний модуль для перетворення результатів вимірювань в інтервальні дані; [5] – обґрунтовано та розроблено процедуру оптимального налаштування параметрів алгоритму пошуку розв'язку ІСНАР; [7] – розроблено метод структурної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО та генетичного алгоритму його реалізації; [8] – досліджено властивості критеріїв адекватності, складності, точності та повноти для оцінки якості структури макромоделі у вигляді ІРО; [10] – обґрунтовано показники якості структури ІРО; [11] – розроблено основні принципи пошуку оптимальних структур макромоделей у вигляді ІРО; [12] – обґрунтовано та формалізовано критерії оптимальності структури ІРО; [13] – здійснено системний аналіз критеріїв оптимальності макромоделей у вигляді ІРО; [14] – розроблено алгоритм отримання інтервальних даних за результатами спостережень з обмеженою за амплітудою похибкою; [15] – розроблено алгоритм для розв'язування інтервальної системи алгебричних рівнянь.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на конференціях та семінарах, а саме: міжнародній науково-практичній конференції «Трансформаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах» (Вінниця, 2009); X-th International Conference TCSET'2010 «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (Lviv – Slavske, 2010); IX and XI International Conferences «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» CADSM (Lviv – Polyana, 2007, 2011); Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Математическое моделирование в технике и технологии» (Воронеж, Россия, 2011); міжнародній школі-семінар для молодих науковців «Індуктивне моделювання: теорія і застосування» (с. Жукін, Київська обл., 2010, 2011); I Всеукраїнській школі-семінар молодих вчених і студентів АСІТ'2011 (Тернопіль, 2011); міжнародній проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління» (Бучач – Східниця, 2010); проблемно-науковій міжгалузевій конференції «Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання» (Бучач – Скоморохи, 2008, 2009); науково-практичних конференціях професорсько-викладацького складу Тернопільського національного економічного університету (2008 – 2011).

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 15 наукових працях загальним обсягом 86 сторінок, у тому числі 5 статей у фахових виданнях, 10 публікацій у матеріалах конференцій, семінарів та тезах доповідей.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи 153 сторінки. Основний зміст викладено на 118 сторінках. Робота містить 23 рисунки і 21 таблицю. Додатки на 15 сторінках. Список використаних джерел охоплює 152 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, а також наведено відомості про особистий внесок здобувача та апробацію результатів дисертації, показано структуру та обсяг роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз методів побудови макромоделей у вигляді різницевого операторів із невизначеною структурою, а також досліджено особливості застосування цих макромоделей для моделювання процесів у системах екологічного моніторингу.

У **задачах екологічного моніторингу** з метою прийняття рішень про перевищення концентрацій шкідливих викидів використовують програмно-апаратні системи для опрацювання даних вимірювань концентрацій шкідливих викидів. Складовими програмно-апаратних систем є програмно реалізовані математичні моделі стаціонарних та нестаціонарних полів. З метою мінімізації високовартісних експериментів, доцільно проводити окремі вимірювання на заданих ділянках місцевості, а просторовий розподіл концентрацій в інших ділянках встановлювати засобами математичного моделювання.

Встановлено, що для моделювання процесів поширення забруднень шкідливих речовин традиційно використовують математичні моделі у вигляді диференціальних рівнянь у частинних похідних, розв'язки яких шукають попередньо апроксимували диференціальні рівняння різницевиими схемами. Проте для побудови вихідного рівняння із відповідними початковими умовами мають бути відомі параметри усіх джерел викидів, детальні дані про метеоумови та атмосферні явища, що нереально для такого розподіленого в просторі та часі джерела як автотранспорт. На цій основі обґрунтовано використання макромоделей полів концентрацій у вигляді різницевих операторів, які будують за результатами експерименту. Встановлено, що для макромодельовання процесів поширення хімічних речовин на основі різницевих операторів отримують дані за допомогою спектроаналізаторів хімічних речовин, які відзначаються достатньо великими відносними похибками в межах від 20% до 70%. У цьому випадку немає сенсу враховувати усі фізичні явища для точного відтворення динаміки процесів забруднення. Показано доцільність розгляду експериментальних даних з обмеженими за амплітудою похибками в інтервальному вигляді.

Далі у цьому розділі проведено аналіз методів структурної ідентифікації макромоделей у вигляді різницевих операторів і показано, що вони ґрунтуються на комбінаторних алгоритмах синтезу структури макромоделей, а для аналізу моделей-претендентів переважно використовують критерії регулярності. Складовою частиною цього критерію є мінімізація середньоквадратичного відхилення між прогнозованими і експериментальними даними, що є не прийнятним у випадку представлення результатів експерименту у вигляді інтервальних даних.

Встановлено, що для аналізу кожної моделі-претендента необхідно розв'язувати задачу параметричної ідентифікації. Розглянуто особливості цієї задачі для випадку аналізу інтервальних даних.

Запропоновано макромодель процесу поширення хімічних речовин представляти у вигляді такого лінійного за параметрами різницевого оператора:

$$v_{j+1,k+1} = \vec{g}^T \cdot \vec{f}(v_{0,0}, \dots, v_{0,k}, \dots, v_{j,0}, \dots, v_{j,k}, \vec{u}_{0,0}, \dots, \vec{u}_{j,k}), \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (1)$$

де $\vec{f}(v_{0,0}, \dots, v_{0,k}, \dots, v_{j,0}, \dots, v_{j,k}, \vec{u}_{0,0}, \dots, \vec{u}_{j,k})$ – вектор (розмірністю $m \times 1$) базисних функцій, що задає структуру різницевого оператора; $v_{j+1,k+1}$ – прогнозована характеристика (концентрація) в $(j+1)$ -ій точці простору в $(k+1)$ -ий момент часу; $\vec{u}_{j,k} = (\vec{u}_{0,0}, \dots, \vec{u}_{j,k})^T$ – відомий вектор (розмірністю $p \times 1$) вхідних змінних в j -ій точці простору в k -ий дискретний момент часу; \vec{g} – невідомий вектор (розмірністю $m \times 1$) параметрів різницевого оператора. Для загального випадку дослідження процесів поширення концентрацій хімічних речовин в атмосфері, j -ій точці простору відповідає дискретне значення координат x_j, y_j, z_j .

Для оцінювання вектора параметрів \vec{g} різницевого оператора використано результати вимірювань в k -ий момент часу в j -ій точці простору:

$$\tilde{v}_{j,k} = c_{j,k} \cdot v_{j,k} + e_{j,k}, \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (2)$$

де $\tilde{v}_{j,k}$ – виміряне значення характеристики концентрації речовини в j -ій точці простору в k -ий момент часу; $c_{j,k}$ – відомий коефіцієнт. У формулі (2) прийнято $e_{j,k}$ – випадкові, обмежені за амплітудою похибки:

$$|e_{1,k}| = |e_{2,k}| = \dots = |e_{j,k}| = |e_k| \leq \Delta_k, \quad \Delta_k > 0, \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

які в загальному випадку залежать від координат простору та часу вимірювань.

Із використанням моделі вимірювань (1) та із урахуванням обмеженості за амплітудою похибки (2), експериментальні дані набули інтервального представлення:

$$[v_{j,k}] = [v_{j,k}^-; v_{j,k}^+] = [\tilde{v}_{j,k} - \Delta_k; \tilde{v}_{j,k} + \Delta_k] / c_{j,k}, \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (4)$$

де $[v_{j,k}^-; v_{j,k}^+]$ – гарантований інтервал, нижнє та верхнє значення вимірної величини, відповідно.

Зауважимо, що обчислення у виразі (4) виконуємо згідно з правилами інтервальної арифметики.

Для оцінювання невідомого вектора параметрів \hat{g} обґрунтовано і запропоновано такий критерій узгодження між результатом моделювання (прогнозування) та інтервальними даними експерименту:

$$[\hat{v}_{j+1,k+1}] = [\hat{v}_{j+1,k+1}^-; \hat{v}_{j+1,k+1}^+] \subseteq [v_{j+1,k+1}] = [v_{j+1,k+1}^-; v_{j+1,k+1}^+], \quad \forall j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (5)$$

де $[\hat{v}_{j+1,k+1}] = [\hat{v}_{j+1,k+1}^-; \hat{v}_{j+1,k+1}^+]$ – прогнозований інтервал, який обчислюємо за формулою

$$[\hat{v}_{j+1,k+1}] = \hat{g}^T \cdot \vec{f}([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,k}], \dots, [\hat{v}_{j,0}], \dots, [\hat{v}_{j,k}], \vec{u}_{0,0}, \dots, \vec{u}_{j,k}), \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (6)$$

де \hat{g} – вектор оцінок параметрів різницевого оператора, які отримуємо із умов включення (5); $[\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,k}], \dots, [\hat{v}_{j,0}], \dots, [\hat{v}_{j,k}]$ – задані чи розраховані інтервальні оцінки початкових дискретних значень прогнозованої характеристики.

Оскільки для отримання інтервалу прогнозованої характеристики $[\hat{v}_{j+1,k+1}]$ за формулою різницевого оператора (6) необхідно проводити обчислення за правилами інтервальної арифметики, то такий оператор називатимемо лінійним за параметрами ІРО. Підставляючи інтервальні оцінки $[\hat{v}_{j+1,k+1}]$, обчислені за формулою (6) за наявності початкових наближень $[\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,k}], \dots, [\hat{v}_{j,0}], \dots, [\hat{v}_{j,k}]$, у виразі (5) отримали таку інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР):

$$v_{j+1,k+1}^- \leq \hat{g}^T \cdot \vec{f}([\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,k}], \dots, [\hat{v}_{j,0}], \dots, [\hat{v}_{j,k}], \vec{u}_{0,0}, \dots, \vec{u}_{j,k}) \leq v_{j+1,k+1}^+, \quad j = 0, \dots, J-1, \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (7)$$

Отже, задача ідентифікації параметрів лінійного ІРО (6) за умов (5) є надзвичайно складною обчислювальною задачею розв'язування ІСНАР у вигляді (7).

У результаті аналізу методів структурної ідентифікації встановлено, що висока обчислювальна складність задачі параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО не дає можливості адаптувати відомі комбінаторні алгоритми синтезу структур макромоделей, розроблені Івахненком О. Г. та його науковою школою для випадку аналізу інтервальних даних. Взамін запропоновано та обґрунтовано застосування генетичних алгоритмів. Проведено критичний аналіз цих алгоритмів, встановлено необхідність модифікації їх базових операцій та розробки нових критеріїв оцінки якості структури ІРО.

У заключній частині цього розділу сформульовано основні задачі дисертаційного дослідження.

У другому розділі розроблено критерії оцінки якості та складності структури макромоделей у вигляді ІРО та здійснено формальну постановку задачі структурної ідентифікації.

У дисертаційній роботі для визначення поняття оптимальності структури різницевого оператора враховано основні властивості моделей у вигляді різницевих операторів та на цій основі формалізовано задачу структурної ідентифікації.

Для короткого представлення структури ІРО введено означення таких підмножин: $U_p^s \subseteq U_p$, $U_p = \{\bar{u}_{j,k} \in R^p \mid \{\bar{u}_{0,0}, \dots, \bar{u}_{j,k}\}\}$, U_p^s – підмножина вхідних змінних (управлінь), яка визначається на множині усіх можливих компонент вектора управлінь $\bar{u}_{j,k}$; $V_\eta^s \subseteq V_\eta$, $V_\eta = \{\hat{v}_{j,k} \in R^\eta \mid \{[\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,k}], \dots, [\hat{v}_{j,0}], \dots, [\hat{v}_{j,k}]\}\}$, V_η^s – підмножина дискретних значень прогнозу величини у початкові моменти, яка визначається на множині усіх можливих компонент із набору $[\hat{v}_{0,0}], \dots, [\hat{v}_{0,k}], \dots, [\hat{v}_{j,0}], \dots, [\hat{v}_{j,k}]$ і характеризує порядок η ІРО; $G_m^s \subseteq G_m$, $G_m = \{\bar{g}_m \in R^m \mid \{g_1, \dots, g_m\}\}$, G_m^s – підмножина параметрів ІРО, яка визначається компонентами вектора \bar{g} ; $F_m^s \subseteq F_m$, $F_m = \{\vec{f} \in R^m \mid \{f_1([\hat{v}_{j,k}], \bar{u}_{j,k}), \dots, f_i([\hat{v}_{j,k}], \bar{u}_{j,k}), \dots, f_m([\hat{v}_{j,k}], \bar{u}_{j,k})\}\}$, F_m^s – підмножина базисних функцій ІРО, яка визначається вектором базисних функцій $\vec{f} = (f_1([\hat{v}_{j,k}], \bar{u}_{j,k}), \dots, f_i([\hat{v}_{j,k}], \bar{u}_{j,k}), \dots, f_m([\hat{v}_{j,k}], \bar{u}_{j,k}))$.

Уведені означення дали можливість описати структуру ІРО у вигляді такого кортежу:

$$\lambda_s : \langle U_p^s, V_\eta^s, G_m^s, F_m^s \rangle, s = 1, \dots, S. \quad (8)$$

Очевидно, що постановка задачі пошуку структури λ_s , яка забезпечує адекватність моделі безвідносно до задачі моделювання, є не зовсім коректною. Проте у випадку побудови макромоделей у вигляді ІРО для моделювання просторового та часового розподілу концентрацій шкідливих викидів в задачах екологічної експертизи модель буде адекватною, коли результати прогнозування узгоджені із експериментальними інтервальними даними в сенсі критерію (5) – тобто за умов сумісності ІСНАР (7). Враховуючи, що ІСНАР (7) сформовано на основі інтервальних даних $[v_{j,k}]$, для заданої структури різницевого оператора λ_s область розв'язків ІСНАР (7) позначаємо у вигляді: $\Omega|_{[v_{j,k}], \lambda_s}$. Тоді формально правило, яке визначає адекватність моделі, побудованої на основі ІРО, має вигляд: якщо $\Omega|_{[v_{j,k}], \lambda_s} \neq \emptyset$, то модель у вигляді ІРО зі структурою λ_s є адекватною.

Ступінь розумового узгодження між результатами прогнозування на основі макромоделі із фіксованою структурою λ_s та інтервальними експериментальними даними запропоновано та обґрунтовано обчислювати за виразами:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{j=0, \dots, J-1, k=0, \dots, N-1} \left\{ \text{mid}([\hat{v}_{j+1, k+1}(\lambda_s)]) - \text{mid}([v_{j+1, k+1}]) \right\}, \quad (9)$$

якщо $[\hat{v}_{j+1, k+1}(\lambda_s)] \cap [v_{j+1, k+1}] = \emptyset$, $\exists j = 0, \dots, J-1$, $\exists k = 0, \dots, N-1$,

$$\delta(\lambda_s) = \max_{j=0, \dots, J-1, k=0, \dots, N-1} \{ \text{wid}([\widehat{v}_{j+1, k+1}(\lambda_s)]) - \text{wid}([\widehat{v}_{j+1, k+1}(\lambda_s)] \cap [v_{j+1, k+1}]) \}, \quad (10)$$

якщо $[\widehat{v}_{j+1, k+1}(\lambda_s)] \cap [v_{j+1, k+1}] \neq \emptyset, \forall j=0, \dots, J-1, \forall k=0, \dots, N-1,$

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

Якщо для фіксованої структури λ_s справджується $\delta(\lambda_s) = 0$, то обрана структура уможливорює побудову адекватної моделі. Застосування вищеописаного показника якості структури дає можливість сформулювати множину адекватних в сенсі (5) моделей з різними структурами різницевого оператора. Для встановлення єдиної структури в дисертаційній роботі введено додаткові критерії оптимальності структури макромоделі у вигляді ІРО, наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Критерії оптимальності структури ІРО

Критерій	Формальний запис
критерії складності:	
мінімізація кількості вхідних змінних	$p \rightarrow \min, U_p^s \subseteq U_p$
мінімізація порядку ІРО	$\eta \rightarrow \min, V_\eta^s \subseteq V_\eta,$
мінімізація кількості базисних функцій	$m \rightarrow \min, F_m^s \subseteq F_m$
мінімізація кількості параметрів ІРО	$m \rightarrow \min, G_m^s \subseteq G_m$
критерій адекватності:	
сумісність ІСНАР	$\Omega \Big _{[v_{j,k}, \lambda_s] \neq \emptyset, \delta(\lambda_s) = 0}$
критерій точності:	$\Delta \psi(\lambda_s) \xrightarrow{\lambda_s} \max,$ $\Delta \psi(\lambda_s) = \frac{1}{J \cdot N} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{N-1} (\widehat{v}_{j+1, k+1}^+ - \widehat{v}_{j+1, k+1}^-)$
критерій повноти:	$R(\lambda_s) \xrightarrow{\lambda_s} \max,$ $R(\lambda_s) = \frac{1}{J \cdot N} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{N-1} \left(\min \{ v_{j+1, k+1}^+, \widehat{v}_{j+1, k+1}^+ (\widehat{v}_{j, k}, \bar{u}_{j, k}) \} - \right.$ $\left. - \max \{ v_{j+1, k+1}^-, \widehat{v}_{j+1, k+1}^- (\widehat{v}_{j, k}, \bar{u}_{j, k}) \} \right) / (2 \cdot (v_{j+1, k+1}^+ - v_{j+1, k+1}^-))$

На основі табл. 1 в дисертації сформульовано задачу багатокритеріального пошуку оптимальної структури різницевого оператора:

$$\left\{ \begin{array}{l} p \xrightarrow{\lambda_s} \min \text{ або } \eta \xrightarrow{\lambda_s} \min \text{ або } m \xrightarrow{\lambda_s} \min; \\ \Delta \psi(\lambda_s) \xrightarrow{\lambda_s} \max, \Delta \psi(\lambda_s) = \frac{1}{J \cdot N} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{N-1} (\widehat{v}_{j+1, k+1}^+ - \widehat{v}_{j+1, k+1}^-); \\ R(\lambda_s) \xrightarrow{\lambda_s} \max, \\ R(\lambda_s) = \frac{1}{J \cdot N} \sum_{j=0}^{J-1} \sum_{k=0}^{N-1} \frac{\min \{ v_{j+1, k+1}^+, \widehat{v}_{j+1, k+1}^+ (\widehat{v}_{j, k}, \bar{u}_{j, k}) \} - \max \{ v_{j+1, k+1}^-, \widehat{v}_{j+1, k+1}^- (\widehat{v}_{j, k}, \bar{u}_{j, k}) \}}{2 \cdot (v_{j+1, k+1}^+ - v_{j+1, k+1}^-)}, \end{array} \right. \quad (11)$$

за умови $\delta(\lambda_s) = 0$.

Аналіз даної задачі показав, що вона є задачею багатокритеріальної оптимізації із дискретними цільовими функціями та нелінійними обмеженнями, заданими ІСНАР (7). Складність задачі структурної ідентифікації (11) пов'язана в першу чергу із дискретністю задання розв'язку у вигляді кортежу (8). Для розв'язку такого типу задач обґрунтовано використовувати генетичні алгоритми із базовими операціями відбору моделей-претендентів із розв'язку оптимізаційної задачі

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\lambda_s} \min. \quad (12)$$

Достовірність результату щодо отримання оптимальної структури інтервального різницевого оператора із розв'язку задачі (11) в дисертаційній роботі перевірено засобами імітаційного експерименту. З цією метою проведено дослідження запропонованих та обґрунтованих показників якості структури. Для прикладу в імітаційному експерименті обрано різницевий оператор у вигляді $[v_{k+1}] = g_1 \cdot u1_k^2 \cdot [v_{k-1}] + g_2 \cdot u2_k + g_3 \cdot [v_k^2]$, де $g_1 = 0,679$; $g_2 = 0,7925$; $g_3 = 0,57$. Із його використанням за початкових умов $[v_0^- = 0,551538; v_0^+ = 0,296982]$ та для заданих управлінь $u1_k, u2_k, k = 0, \dots, N - 1$, згенеровано таблицю даних ($N = 17$) з відносною похибкою 30%. Для оцінки якості структур використано показники точності, повноти, адекватності в сенсі сумісності ІСНАР, наведені в табл. 1. За цими показниками оцінювали якість восьми структур, наведених у другій колонці табл. 2. Результати досліджень показників якості структур моделей у вигляді ІРО із використанням імітаційного експерименту наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати дослідження показників якості структур моделей у вигляді ІРО

№ з/п	Згенеровані структури ІРО	Показники якості структури		
		Точність $\Delta\psi$	Повнота R	Адекватність в сенсі сумісності ІСНАР
1.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g \cdot [\widehat{v}_k]$	-	-	ІСНАР несумісна
2.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot [\widehat{v}_k] + g_2 \cdot u2_k$	-	-	ІСНАР несумісна
3.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot [\widehat{v}_{k-1}] + g_2 \cdot u2_k + g_3 \cdot [\widehat{v}_k]$	0,0001679	0,000687	ІСНАР сумісна
4.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot [\widehat{v}_k] + g_2 \cdot u1_k + g_3 \cdot u2_k$	0,011593	0,055721	ІСНАР сумісна
5.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot u1_k \cdot [\widehat{v}_{k-1}] + g_2 \cdot u2_k + g_3 \cdot [\widehat{v}_k]$	0,025231	0,096199	ІСНАР сумісна
6.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot u1_k^2 \cdot [\widehat{v}_{k-1}] + g_2 \cdot u2_k + g_3 \cdot [\widehat{v}_k^2]$	0,039171	0,143177	ІСНАР сумісна
7.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot u1_k^2 \cdot [\widehat{v}_{k-1}^2] + g_2 \cdot u2_k + g_3 \cdot [\widehat{v}_k^2]$	0,0127799	0,050779	ІСНАР сумісна
8.	$[\widehat{v}_{k+1}] = g_1 \cdot u1_k^2 \cdot [\widehat{v}_{k-1}] + g_2 \cdot u2_k^2 + g_3 \cdot [\widehat{v}_k^2]$	-	-	ІСНАР несумісна

Аналіз табл. 2 показав, що найбільше значення показників якості досягається для моделі № 6, на основі якої згенеровано експериментальні дані. Це підтверджує можливість застосування введених критеріїв для пошуку оптимальної структури моделі, а також можливість отримання достовірного результату із розв'язку задачі (11).

У третьому розділі розроблено новий метод структурної ідентифікації макромоделей у вигляді ІРО, особливістю якого є застосування при аналізі моделей-претендентів генетичного алгоритму з модифікованими базовими операціями та з кодуванням структурних елементів моделі десятковою системою числення.

В основі побудови генетичного алгоритму є застосування певних принципів кодування хромосом. У випадку розв'язування задачі структурної ідентифікації моделі у вигляді ІРО хромосома відображатиме конкретну структуру моделі. Запропоновано схему десяткового кодування хромосом, що представляє особину – конкретну структуру різницевого оператора. На цій основі модифіковано базові оператори генетичного алгоритму у напрямку забезпечення їх застосування для задач структурної ідентифікації. Зокрема замість стандартних кросоверів, які використовують в операторах схрещування генетичного алгоритму, запропоновано та обґрунтовано процедуру схрещування за принципом «розіграшу лотереї», коли гени обох батьківських хромосом, що представляють пару структур ІРО, «розігрують» для формування хромосом-нащадків. При цьому використання десяткового кодування уможливило отримання структур моделей із контрольованою складністю.

Розглянемо припущення, які забезпечують збіжність при реалізації методу структурної ідентифікації ІРО.

Припущення 1. Для побудови адекватної в сенсі $\delta(\lambda_s) = 0$ макромоделі досліджуваного об'єкта відомою є множина структурних елементів, яка обов'язково включає підмножину усіх структурних елементів адекватної моделі.

Це припущення означає, що виходячи із фізичних міркувань, необхідно сформулювати множини: $U_p; V_\eta; F_m$ із загальною кількістю структурних елементів L і, що виконується умова:

$$U_{\lambda_s^o} \subseteq U_p; \quad V_{\lambda_s^o} \subseteq V_\eta; \quad F_{\lambda_s^o} \subseteq F_m, \quad (13)$$

де λ_s^o – структура адекватної моделі, що записується кортежем:

$$\lambda_s^o : \langle U_{\lambda_s^o}, V_{\lambda_s^o}, G_{\lambda_s^o}, F_{\lambda_s^o} \rangle. \quad (14)$$

Слід зауважити, що всі елементи для адекватної структури пов'язані між собою базисними функціями F_m , тобто, якщо відома λ_s^o структура, то однозначно можна записати різницевий оператор у вигляді (1).

Припущення 2. Відомий інтервал $[I_{\min}^s; I_{\max}^s]$, який гарантовано включає число I_s , що задає кількість структурних елементів для адекватної структури:

$$I_{\min}^s \leq I_s \leq I_{\max}^s. \quad (15)$$

Усі можливі структурні елементи різницевого оператора представимо набором десяткових чисел:

$$M = \{N_1, \dots, N_l, \dots, N_L\}, \quad (16)$$

де N_l – номер структурного елемента у впорядкованій послідовності $l = 1, \dots, L$.

Тоді структуру будь-якого різницевого оператора представимо за допомогою хромосоми у вигляді коду $k_{10}(\lambda_s)$, який є послідовністю десяткових чисел – підмножиною множини M . Наприклад, структуру різницевого оператора у вигляді $v_{k+1} = g_1 \cdot v_{k-1} + g_2 \cdot v_k + g_3 \cdot u_{2,k}$ можна представити за допомогою хромосоми у вигляді коду $k_{10}(\lambda_s) = \langle 01, 02, 04 \rangle$, де $N_{1s} = 01$; $N_{2s} = 02$; $N_{3s} = 04$.

Із урахуванням кодування, на кожному етапі формування моделей-претендентів здійснюємо за допомогою формули:

$$v_{j+1,k+1} = \mu_1 \cdot g_1 \cdot f_1(\vec{v}_{j,k}, \vec{u}_{j,k}) + \dots + \mu_l \cdot g_l \cdot f_l(\vec{v}_{j,k}, \vec{u}_{j,k}) + \dots + \mu_L \cdot g_L \cdot f_L(\vec{v}_{j,k}, \vec{u}_{j,k}), \quad (17)$$

де $\vec{\mu}_l$ – означає випадковий вектор із компонентами 0 та 1; $I_{\min}^s \leq \sum_{l=0}^L \mu_l \leq I_{\max}^s$.

Кількість згенерованих структур на відповідній ітерації позначимо за S – величину свободи вибору кращих моделей, як це прийнято називати в методах групового урахування аргументів (МГУА).

Селекцію згенерованих структур та побудованих на їх основі моделей проводимо за критерієм (11) із використанням відношень:

$$\delta(\lambda_s) \leq \dots \leq \delta(\lambda_i) \leq \dots \leq \delta(\lambda_s). \quad (18)$$

Вибрані структури за умовою (18) у загальній кількості S комбінуюємо випадковим чином попарно для отримання нових моделей-претендентів. Окрім того, на наступний ряд селекції з метою зменшення ризику втрати структурних елементів адекватної моделі додаємо структури з попереднього ряду селекції. Тобто кожна пара виділених структур на попередньому ряді продукує дві пари структур. Якщо на якомусь із етапів селекції $\delta(\lambda_s) = 0 \exists s = 1, \dots, S$, то для усіх цих структур λ_s , розв'язуємо багатокритеріальну задачу (11) без урахування вказаної умови. Розв'язування цієї задачі здійснюють послідовним зважуванням структур за критеріями складності, точності та повноти. Слід зауважити, що в результаті реалізації методу серед адекватних моделей може виявитись Парето-оптимальна множина, оскільки пошук здійснюється ще за трьома критеріями. В цьому випадку оптимальну модель слід додатково вибирати виходячи із фізичних міркувань.

Таким чином вхідними змінними для реалізації методу є: множина структурних елементів M ; інтервал $[I_{\min}^s; I_{\max}^s]$, що включає число I_s структурних елементів; параметр S , який називають величиною свободи вибору кращих моделей.

На рис. 1 наведено схему реалізації методу структурної ідентифікації IPO.

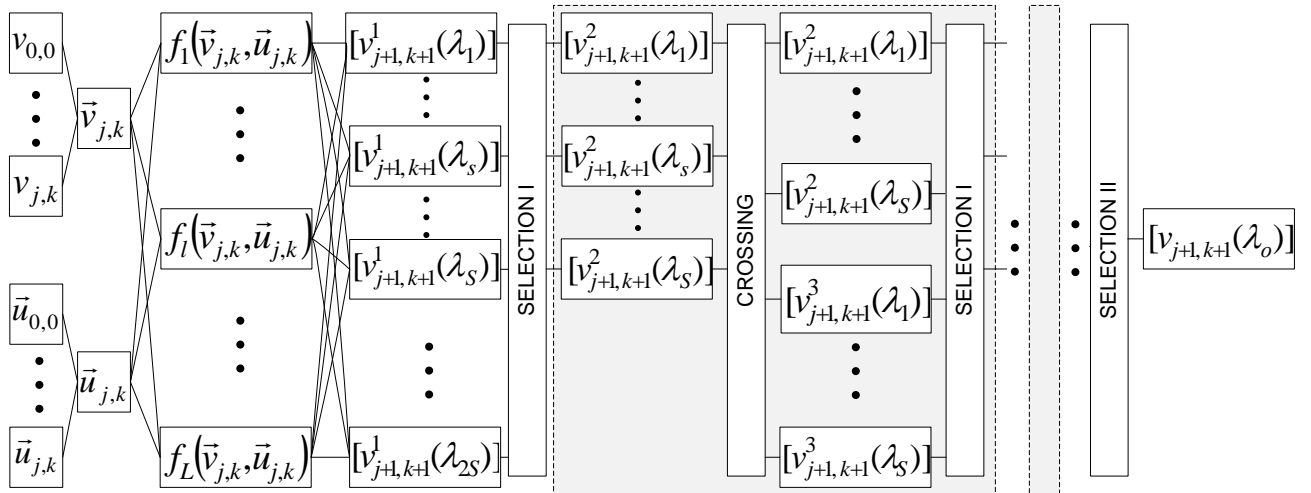


Рисунок 1 – Схема реалізації методу структурної ідентифікації IPO

На першому ряді задаємо максимальну кількість згенерованих структур $2S$ – максимальна величина свободи вибору кращих моделей-претендентів. Блок «SELECTION I» означає селекцію згенерованих структур та побудованих на їх основі моделей за критерієм (12) і впорядкування їх з використанням відношень (18). У результаті отримуємо моделі-претенденти другого ряду формування $[v_{j+1,k+1}^2(\lambda_1)], \dots, [v_{j+1,k+1}^2(\lambda_s)], \dots, [v_{j+1,k+1}^2(\lambda_s)]$. Блок «CROSSING» означає попарне

комбінування вибраних за умовою (18) структур у загальній кількості S . Далі проводиться селекція (блок «SELECTION I» та блок «SELECTION II») отриманих нових моделей-претендентів кількістю S третього ряду формування $[v_{j+1,k+1}^3(\lambda_1)], \dots, [v_{j+1,k+1}^3(\lambda_s)], \dots, [v_{j+1,k+1}^3(\lambda_S)]$, а також моделей-претендентів кількістю S другого ряду $[v_{j+1,k+1}^2(\lambda_1)], \dots, [v_{j+1,k+1}^2(\lambda_s)], \dots, [v_{j+1,k+1}^2(\lambda_S)]$. Блок «SELECTION II» означає селекцію моделей із розв'язку багатокритеріальної задачі (11). Причому зауважимо, що умова виконується для усіх моделей-претендентів на даному етапі селекції.

Із врахуванням наведеної схеми в дисертації запропоновано один із алгоритмів реалізації методу структурної ідентифікації IPO.

Крок 1. Генерування набору структурних елементів (16), який гарантовано включає усі структурні елементи адекватних структур різницевого оператора та їх кодування за допомогою впорядкованої послідовності десяткових чисел. Цей крок вимагає настроювання параметру L , що задає потужність множини структурних елементів. У випадку, якщо згенерована кількість структурних елементів не забезпечує побудову адекватної моделі, то необхідно розширити множину структурних елементів.

Крок 2. Випадкове генерування десяткових кодів $k_{10}(\lambda_s)$ хромосом, що задають відповідні структури λ_s , де $s = 1, \dots, S$. Десятковий код $k_{10}(\lambda_s)$ хромосоми задає поточну структуру різницевого оператора і має такий загальний вигляд:

$$k_{10}(\lambda_s) = \langle N_{1,s}, \dots, N_{i,s}, \dots, N_{m,s} \rangle, s = 1, \dots, S. \quad (19)$$

Параметрами генетичного алгоритму на цьому кроці є: потужність S множини згенерованих кодів $k_{10}(\lambda_s)$ хромосом; кількість m згенерованих структурних елементів-генів у поточному коді $k_{10}(\lambda_s)$ хромосоми. Параметр кількості генів m на цьому кроці генеруємо випадковим чином – як число на інтервалі $[I_{\min}; I_{\max}]$.

Крок 3. Оцінювання якості згенерованих структур з кодами $k_{10}(\lambda_s)$ та селекція популяції «кращих» особин за функцією пристосованості у вигляді показника якості структури $\delta(\lambda_s)$. Якщо на цьому кроці існує хоча б одна структура різницевого оператора, для якої $\delta(\lambda_s) = 0$, то – завершення процедури структурної ідентифікації. У випадку, коли $\delta(\lambda_s) = 0$ для декількох структур, то вибір єдиної здійснюємо послідовним зважуванням вказаних структур на основі додаткових критеріїв селекції (12). В іншому випадку формуємо популяцію найкращих особин (з найменшими $\delta(\lambda_s)$) у кількості, що задана величиною свободи вибору S .

Крок 4. Схрещування відібраних особин у популяції здійснюємо випадковим чином із застосуванням оператора схрещування, побудованого за принципом «розіграшу лотереї». Після виконання цього кроку – перехід на крок 3.

У заключній частині цього розділу проведено дослідження впливу параметрів генетичного алгоритму на обчислювальну складність реалізації методу структурної ідентифікації IPO. Дослідження проведено на прикладі задачі моделювання поля зважених речовин у водному середовищі. Обчислювальні експерименти побудовано за умов задання кількості структурних елементів у шуканих моделях $m = [I_{\min} = 2; I_{\max} = 8]$. Розглянуто такі варіанти задання потужності множини

структурних елементів та степеня свободи вибору моделі, відповідно: $L = 12, 18, 30$; $S = 5, 10, 15$. Загальна кількість проведених обчислювальних експериментів становила 9. В результаті проведених досліджень встановлено, що найбільш впливовим параметром на обчислювальну складність є показник S свободи вибору «кращих» моделей.

У четвертому розділі описано створені інструментальні засоби і проведено апробацію розроблених методу та алгоритму структурної ідентифікації ІРО при розв'язуванні задач макромодельовання процесів поширення концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в м. Тернополі.

Однією із основних компонент системи моніторингу шкідливих викидів автотранспорту, яка розроблена в дисертаційній роботі, є база даних (БД) для накопичення концентрацій шкідливих викидів, що безпосередньо пов'язана із підсистемами для моделювання процесів поширення шкідливих викидів та полів для цих концентрацій. В дисертаційній роботі спроектовано корпоративну модель БД, а також на основі специфікацій вимог користувачів концептуальну модель. Програмне забезпечення системи розроблено на базі середовища Microsoft Visual Studio із використанням Microsoft .NET Framework v3.0, а також Microsoft SQL Server. Для проектування БД використано Microsoft SQL Server Management Studio Express. Програмне забезпечення системи забезпечує online-реєстрацію концентрацій шкідливих речовин атмосфери, занесення результатів у БД з подальшою роботою над ними. Дані вимірювань концентрацій шкідливих речовин вносять у БД працівники санітарно-епідеміологічної станції м. Тернополя. Програма відповідно «прив'язує» дані до конкретного об'єкта на карті.

Далі в цьому розділі розглянуто задачу структурної ідентифікації стаціонарного поля концентрацій діоксиду азоту, утвореного внаслідок забруднення автотранспортом. Виміряні концентрації діоксиду азоту в приземистому шарі атмосфери центральної частини м. Тернополя за умов максимальної інтенсивності транспортних потоків наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Виміряні концентрації $\tilde{v}_{i,j}$ діоксиду азоту у центральній частині м. Тернополя, мг/м³

$i \backslash j$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0,0150	0,0294	0,0421	0,0419	0,0324	0,0216	0,0200	0,0249	0,0200
1	0,0133	0,0448	0,0606	0,0598	0,0444	0,0242	0,0231	0,0453	0,0400
2	0,0200	0,0566	0,0778	0,0751	0,0603	0,0371	0,0323	0,0570	0,0619
3	0,0401	0,0755	0,0947	0,0919	0,0747	0,0540	0,0462	0,0671	0,0754
4	0,0601	0,0952	0,1075	0,1027	0,0847	0,0644	0,0584	0,0734	0,0806
5	0,0713	0,1076	0,1129	0,1032	0,0850	0,0654	0,0606	0,0736	0,0763
6	0,0682	0,1067	0,1068	0,0921	0,0729	0,0554	0,0515	0,0635	0,0643
7	0,0458	0,0870	0,0850	0,0675	0,0482	0,0334	0,0321	0,0437	0,0447
8	0,0750	0,0423	0,0730	0,0371	0,0255	0,0095	0,0124	0,0233	0,0250

Як видно, кількість точок сітки складає 81. У табл. 3: i – дискретне значення координати x з кроком $\Delta x = 275$ м; j – дискретне значення координати y із кроком $\Delta y = 275$ м. Отримано дані концентрацій з точністю 25% за допомогою спектрофотометра типу „СФ-26“. Згідно із розробленим методом структурної ідентифікації задано кількість структурних елементів, яка при побудові макромоделі поля концентрацій діоксиду азоту склала $L = 44$ (табл. 4).

Таблиця 4 – Множина структурних елементів

N_l	Структурний елемент	N_l	Структурний елемент
1	$v_{i,j-1}$	15	$v_{i,j-1} \cdot v_{i,j-2}$
2	$v_{i-1,j}$	16	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-2,j}$
3	$v_{i-1,j-1}$	17	$v_{i,j-1} \cdot v_{i-1,j-2}$

10	$v_{i,j-2}$	40	$v_{i,j-2}^2$
11	$v_{i-2,j}$	41	$v_{i-1,j-2}^2$
12	$v_{i-1,j-2}$	42	$v_{i-2,j}^2$
13	$v_{i-2,j-1}$	43	$v_{i-2,j-1}^2$
14	$v_{i-2,j-2}$	44	$v_{i-2,j-2}^2$

У результаті оцінювання якості згенерованих структур (у кількості $S=30$) на першому етапі проведено селекцію – відбір 20 найкращих структур за умовою (12) і схрещування випадковим чином відповідно до процедури схрещування, побудованої за принципом «розиграшу лотереї». Відібравши знову 10 найкращих особин, аналогічно при схрещуванні на третій ітерації отримали три структури, для яких виконується умова $\delta(\lambda_s) = 0$.

Таким чином в результаті застосування генетичного алгоритму, найкращу структуру обрали за критерієм мінімальної складності. Отримали різницевий оператор, який адекватно описує просторовий розподіл концентрацій діоксиду азоту:

$$v_{i,j} = 0,512 + 1,047 \cdot v_{i,j-1} - 0,201 \cdot v_{i,j-2} + 0,338 \cdot v_{i-1,j} + 0,238 \cdot v_{i-1,j-1} - 0,515 \cdot v_{i-1,j-2} + 0,385 \cdot v_{i-2,j} - 0,851 \cdot v_{i-2,j-1} + 0,447 \cdot v_{i-2,j-2}, \quad i = 2, \dots, 8; j = 2, \dots, 8. \quad (19)$$

На рис. 2 на фоні карти м. Тернополя нанесено лінії рівного рівня концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту, а на рис. 3 – просторовий розподіл цих концентрацій.

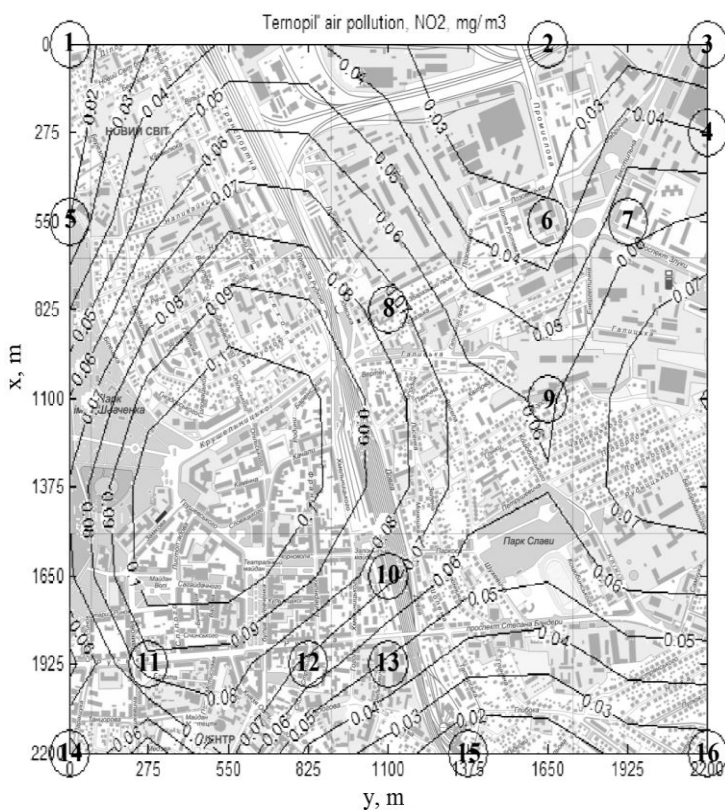


Рисунок 2 – Карта м. Тернополя з нанесеними лініями рівня концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту

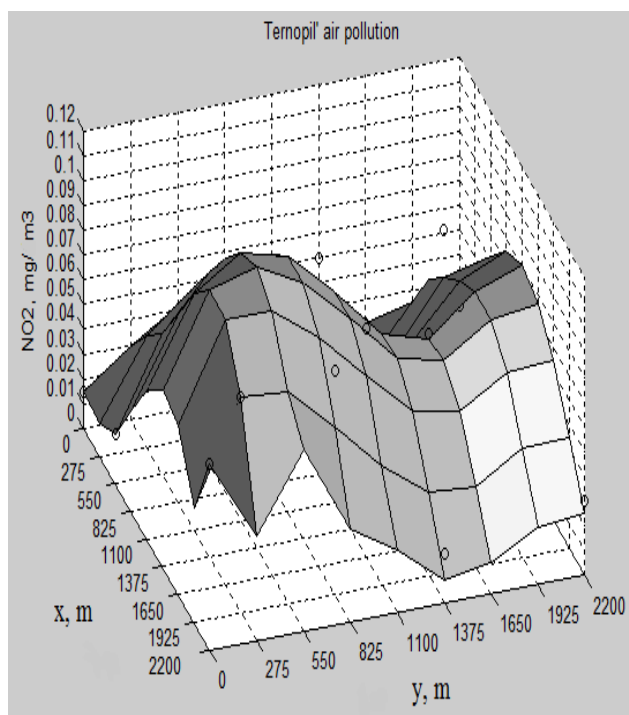


Рисунок 3 – Просторовий розподіл концентрацій діоксиду азоту

Таблиця 5 – Порівняння результатів прогнозування концентрацій діоксиду азоту та виміряних в контрольних точках

№ точки	x, м	y, м	Виміряні концентрації [$v_{i,j}^-; v_{i,j}^+$], мг/м ³	Спрогнозовані концентрації [$\widehat{v}_{i,j}^-; \widehat{v}_{i,j}^+$], мг/м ³
1	0	0	[0,011; 0,019]	[0,0141; 0,0149]
2	0	1650	[0,015; 0,025]	[0,0215; 0,0218]
3	0	2200	[0,015; 0,025]	[0,0231; 0,0239]
4	275	2200	[0,030; 0,050]	[0,0370; 0,0377]
5	550	0	[0,015; 0,025]	[0,0224; 0,0228]
6	550	1650	[0,015; 0,025]	[0,0191; 0,0196]
7	550	1925	[0,057; 0,095]	[0,0772; 0,0779]
8	825	1100	[0,065; 0,109]	[0,0962; 0,0968]
9	1100	1650	[0,045; 0,075]	[0,0658; 0,0662]
10	1650	1100	[0,069; 0,115]	[0,0981; 0,0987]
11	1925	275	[0,065; 0,109]	[0,0838; 0,0843]
12	1925	825	[0,068; 0,113]	[0,0882; 0,0892]
13	1925	1100	[0,036; 0,060]	[0,0514; 0,0519]
14	2200	0	[0,056; 0,094]	[0,0687; 0,0693]
15	2200	1375	[0,015; 0,025]	[0,0215; 0,0219]
16	2200	2200	[0,023; 0,038]	[0,0331; 0,0337]

У дисертаційній роботі була перевірена достовірність результатів, отриманих із застосуванням макромоделі стаціонарного поля діоксиду азоту у вигляді ІРО (19). Для цього за умов максимальної інтенсивності транспортних потоків у макромоделі (19) задано інші початкові умови у 32 точках на сітці та спрогнозовано розподіл концентрацій діоксиду азоту у решта 49 точках сітки. Контрольні вимірювання у 16 точках сітки показали, що спрогнозовані значення концентрацій діоксиду азоту знаходяться в межах виміряних інтервалів. Результати співставлення наведені у табл. 5.

Зауважимо, що використання макромоделі (19), побудованої в результаті розв'язування задачі структурної ідентифікації, суттєво зменшує кількість експерименталь-

них досліджень для встановлення поля концентрацій шкідливих викидів в приземному шарі атмосфери м. Тернополя. Так, для її ідентифікації проведено 81 вимірювання, а в подальшому використанні достатньо здійснити вимірювання шкідливої речовини максимум у 32 точках, що зменшує кількість експериментальних досліджень мінімум у 2,53 рази.

У заключній частині розділу розглянуто також макромодель у вигляді ІРО, яка описує динаміку концентрацій шкідливих викидів у фіксованій точці міста в залежності від інтенсивності транспортних потоків.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано важливу науково-технічну задачу структурної ідентифікації різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних, отриманих за результатами спостережень реальних процесів з похибками, обмеженими за амплітудою.

Основні наукові результати та висновки дисертаційних досліджень:

1. Встановлено, що для макромодельовання процесів в системах екологічного моніторингу результати експериментів необхідно представляти у вигляді інтервальних даних, враховуючи точність спектроаналізаторів хімічних речовин. За макромоделі доцільно використовувати різницеві оператори, структурну та параметричну ідентифікацію яких необхідно проводити методами аналізу інтервальних даних. Такий підхід забезпечує гарантовану точність макромоделі, яка визначається похибками інтервальних даних.

2. З'ясовано, що існуючі методи макромодельовання процесів у вигляді

різницевих операторів за умов структурної невизначеності непридатні для синтезу макромоделей на основі аналізу інтервальних даних, оскільки ґрунтуються на комбінаторних алгоритмах і зорієнтовані на перевірку якості структури моделі за критерієм регулярності. З метою уникнення комбінаторної складності алгоритмів реалізації методу структурної ідентифікації обґрунтовано використання генетичних алгоритмів пошуку субоптимальної моделі.

3. Запропоновано та обґрунтовано показники якості структури моделі у вигляді ІРО, які на відміну від існуючих забезпечують: гарантовану точність макромоделі в межах похибок експериментальних даних; кількісно оцінюють складність моделі, а також необхідну її повноту для досягнення цілі моделювання.

4. Математично сформульовано задачу структурної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО із застосуванням введених показників якості та складності структури. Встановлено, що дана задача є багатокритеріальною задачею дискретної оптимізації з обмеженнями, заданими ІСНАР. Запропоновано для її розв'язування поєднати базові принципи алгоритмів реалізації МГУА та генетичних алгоритмів.

5. Синтезовано новий метод структурної ідентифікації макромоделі у вигляді ІРО. Особливостями методу є: оцінювання сумісності ІСНАР на кожній ітерації пошуку субоптимальної моделі з метою забезпечення заданої її точності; використання генетичного алгоритму з модифікованою базовою операцією схрещування, побудованою за принципом «розіграшу лотереї», а також з кодуванням хромосом за допомогою десяткової системи числення. Уведені модифікації забезпечують розв'язування багатокритеріальної задачі пошуку структури макромоделі з гарантованими прогностичними властивостями та контрольованою складністю моделі.

6. Встановлено основні параметри генетичного алгоритму, які впливають на обчислювальну складність розробленого методу структурної ідентифікації ІРО: потужність множини структурних елементів; інтервал, що включає число структурних елементів шуканої субоптимальної моделі; параметр, який в алгоритмах МГУА називають величиною свободи вибору кращих моделей. В результаті комп'ютерного моделювання показано, що обчислювальна складність методу структурної ідентифікації найбільш чутлива до показника, що задає свободу вибору кращих моделей на кожній ітерації селекції.

7. Підтверджено достовірність отриманих в дисертаційній роботі теоретичних результатів при розв'язуванні практичної задачі синтезу макромоделей полів концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту в центральній частині м. Тернополя. На контрольній вибірці показано, що результати, спрогнозовані на основі побудованої макромоделі, знаходяться в межах інтервальних експериментальних даних. Створене програмне забезпечення для задач структурної ідентифікації макромоделей у вигляді ІРО впроваджено: в санітарно-епідеміологічній станції м. Тернополя для системи екологічного моніторингу; в Державному управлінні охорони навколишнього природного середовища Тернопільської області; у навчальний процес у Тернопільському національному економічному університеті, а також може бути впроваджене для дослідження і прогнозування наслідків екологічних та техногенних катастроф у науково-дослідних установах та підрозділах Міністерства надзвичайних ситуацій України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Войтюк І. Ф. Застосування інтервального різницевого оператора для апроксимації полів концентрацій шкідливих викидів автотранспорту / І. Ф. Войтюк, Т. М. Дивак, М. П. Дивак, А. В. Пукас // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – № 1 (37). – С. 44–52.
2. Войтюк І. Ф. Кількісні характеристики оцінки якості структури моделі у вигляді інтервального різницевого оператора / І. Ф. Войтюк, М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Відбір і обробка інформації. Міжвідомчий збірник наукових праць. – 2011. – № 34 (110). – С. 86–94.
3. Дивак М. П. Структурна ідентифікація інтервальних різницевих операторів / М. П. Дивак, І. Ф. Войтюк, В. І. Манжула // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2010. – Т. 15, № 4. – С. 154–160.
4. Дивак М. П. Моделювання лінійних динамічних систем із заданою структурою каналу вимірювання методами аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Є. О. Марценюк, І. Ф. Войтюк // Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіону. Збірник праць / відп. ред. д. т. н. Степашко В. С. – Київ : МННЦ ІТС, 2008. – № 4. – С. 79–91.
5. Дивак М. П. Оптимальна процедура налаштування параметрів методу ідентифікації інтервальної дискретної моделі динамічної системи / М. П. Дивак, Є. О. Марценюк, І. Ф. Матола // Відбір і обробка інформації. Міжвідомчий збірник наукових праць. – 2007. – № 27 (103). – С. 17–24.
6. Войтюк І. Ф. Метод структурної ідентифікації макромоделей в виде інтервальних різницевих операторів / І. Ф. Войтюк // Математическое моделирование в технике и технологи : матер. докл. Всерос. конф. с элементами научной школы для молодежи, 21 октября 2011 г. – Воронеж : Научная книга, 2011. – С. 11–16.
7. Voytyuk I. The method of structure identification of macromodels as difference operators based on the analysis of interval data and genetic algorithm [Electronic resource] / Iryna Voytyuk, Mykola Dyvak, Viktor Spilchuk // Proc. of the 4th Intern. Workshop on Inductive Modelling (IWIM 2011). – K. : IRTC ITS, 2011. – P. 114–118. – Режим доступу : http://www.mgua.irtc.org.ua/attach/proceedings_IWIM-2011.pdf.
8. Voytyuk I. Research of quality characteristics of models structure in kind of interval difference operator / Iryna Voytyuk, Mykola Dyvak, Victor Spilchuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2011) : Proc. of the XIth Intern. Conf., 23–25 February 2011. – Lviv, 2011. – P. 87.
9. Войтюк І. Ф. Алгоритм структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора для моделювання полів концентрацій шкідливих викидів автотранспорту / І. Ф. Войтюк // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології : Матер. І Всеукр. шк.-сем. молодих вчених і студентів АСІТ'2011, 20–21 травня 2011 р. – Тернопіль : Економічна думка, 2011. – С. 1–3.
10. Дивак М. П. Критерії структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора / Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк І. Ф. // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, енергетики, економіки, моделювання та управління : Матер. міжнар. проблем.-наук. міжгалуз. конф. (ПНМК–2010), 1–4

червня 2010 р. – Бучач, 2010. – Т. 1., № 6. – С. 280–283.

11. Dyvak M. Features of identification of interval differential operator [Electronic resource] / Mykola Dyvak, Iryna Voytyuk, Iryna Spivak // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : Proc. of the Xth Intern. Conf. TCSET'2010. – Lviv, 2010. – Section 6, 2.

12. Дивак М. П. Критерії оптимальності структури інтервального різницевого оператора / Дивак М. П., Манжула В. І., Войтюк. І. Ф. // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання : Матер. проблем.-наук. міжгалуз. конф. SPIC–2009, 19–22 травня 2009 р. – Бучач, 2009. – Т. 1., № 5. – С. 220–224.

13. Войтюк. І. Ф. Особливості оптимізації структури інтервального різницевого оператора / Войтюк. І. Ф., Манжула В. І., Дивак Т. М. // Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці. Збірка наукових праць учасників міжнар. наук.-практ. конф. «Трансформаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах», 23–24 квітня 2009 р. – Вінниця, 2009. – С. 146–154.

14. Дивак М. П. Моделювання лінійних динамічних систем із заданою структурою каналу вимірювання методами аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, Є. О. Марценюк, І. Ф. Войтюк // Інформаційні проблеми комп'ютерних систем, юриспруденції, економіки та моделювання : Матер. проблем.-наук. міжгалуз. конф. SPIC–2008, 20–24 травня 2008 р. – Бучач, 2008. – Т. 1, № 4. – С. 130–134.

15. Dyvak M. Identification of Parameters of Interval Discrete Model of the Dynamic System on the Basis of Selection of the Saturated Blocks of ISLAE / M. Dyvak, L. Honchar, Ye. Martsenyuk, I. Matola // The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronics : Proc. of the IXth Intern. Conf. CADSM 2007, 20–24 February 2007. – Lviv, 2007. – P. 362–364.

АНОТАЦІЇ

Войтюк І. Ф. Структурна ідентифікація різницевих операторів методами аналізу інтервальних даних. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2012.

Дисертаційна робота присвячена актуальній науковій задачі структурної ідентифікації різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних, отриманих за результатами спостережень реальних процесів з похибками, обмеженими за амплітудою.

Проаналізовано особливості застосування макромоделей у вигляді різницевих операторів для моделювання процесів в системах екологічного моніторингу. Проведено аналіз відомих методів та алгоритмів ідентифікації макромоделей об'єктів в умовах структурної невизначеності і сформульовано можливі напрями розвитку цих методів. Розроблені кількісні критерії оцінки якості та складності структури макромоделей у вигляді інтервальних різницевих операторів, перевірено їх працездатність для пошуку оптимальної структури моделі. Формалізовано задачу багатокритеріального синтезу структури макромоделей у вигляді різницевих операторів на основі інтервальних даних. Розроблено новий метод структурної

ідентифікації макромоделей у вигляді різницевих операторів на основі аналізу інтервальних даних із застосуванням генетичних алгоритмів, зокрема проведено модифікацію відомих операцій селекції та схрещування. Розроблено програмне забезпечення та на його основі проведено апробацію розроблених методу та алгоритму структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора для розв'язуванні задач макромодельовання процесів поширення концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту в м. Тернополі.

Ключові слова: різницевий оператор, структурна ідентифікація, інтервальні дані, критерії оптимальності, генетичний алгоритм.

Войтюк И. Ф. Структурная идентификация разностных операторов методами анализа интервальных данных. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2012.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи структурной идентификации разностных операторов на основе анализа интервальных данных, полученных по результатам наблюдений реальных процессов с погрешностями, ограниченными по амплитуде.

Проанализированы особенности применения макромоделей в виде разностных операторов для моделирования процессов в системах экологического мониторинга. Проведен анализ известных методов и алгоритмов идентификации макромоделей объектов в условиях структурной неопределенности и сформулированы возможные направления развития этих методов. Разработаны количественные критерии оценки качества и сложности структуры макромоделей в виде интервального разностного оператора, проверено их работоспособность для поиска оптимальной структуры модели. Формализована задача многокритериального синтеза структуры макромоделей в виде разностных операторов на основе интервальных данных. Разработан новый метод структурной идентификации макромоделей в виде разностных операторов на основе анализа интервальных данных с применением генетических алгоритмов, в частности проведено модификацию известных операций селексии и скрещивания. Разработано программное обеспечение и на его основе проведена апробация разработанных метода и алгоритма структурной идентификации интервальных разностных операторов для решении задач макромоделирования процессов распространения концентраций выбросов диоксида азота в г. Тернополе.

Ключевые слова: разностный оператор, структурная идентификация, интервальные данные, критерии оптимальности, генетический алгоритм.

Voytyuk I. F. Structure identification the difference operators by the methods of interval data analysis. – Manuscript.

Thesis for a Ph.D. (candidate of science) degree by specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computing methods. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2012.

Dissertation is devoted to the actual scientific task of structure identification of difference operators based on analysis the interval data obtained in the observations of real processes with errors, bounded by the amplitude.

It is analyzed the features of using the macromodels in kind of difference operators for modeling the processes in the environmental monitoring systems.

It is conducted the analyzing the known methods and algorithms for identification the macromodels of objects in terms of structure uncertainty and the possible directions for development of these methods is formulated. It is shown that existing methods of macromodeling processes in the kind of difference operators in conditions of structure uncertainty are unsuitable for the synthesis of macromodels based on interval data analysis, as based on combinatorial algorithms and oriented to the verification of the model structure as the criterion of regularity. It is proved using the genetic algorithms for searching optimal model and to avoid combinatorial complexity of algorithms for realization the method of structure identification.

Introduced and substantiated the concept of interval difference operator, which enables us to construct adequate models based on experimental data presented in interval form. The basis of the construction of such difference operator is the criterion for inclusion of discrete interval estimations of predicted output characteristics of the object on the basis of the received model in corridor of discrete interval values of this characteristic, derivable as a result of experiment. Proposed and substantiated indicators of estimation of quality of the model structure in the form of of interval difference operator, that, unlike existing, offered: a guaranteed accuracy of the macromodel within the errors of experimental data; quantitatively estimate the model complexity and completeness that is necessary for achieving the goal of modeling. It is verified the capacity of quantitative criteria for evaluating the quality and complexity of structure macromodels in the form of interval difference operators to find the optimal model structure. The task of multi-criteria synthesis of structure of macromodels in the form of difference operators on the basis of interval data is formalized.

The new method of structure identification the macromodels in the kind of difference operators on the basis of interval data using genetic algorithms is created. This method is marked the criterion of selection and decline of calculable complication. The features of the method are: estimation of the compatibility of interval systems of nonlinear algebraic equations at each iteration of searching optimal models to ensure the given accuracy; using the genetic algorithm with modified basic operation of the crossing, built on a «playing lottery» and with coding of chromosomes using the decimal system calculus. Thus input variables for realization of method are: the set of structure elements; interval, which includes the number of structure elements of optimal model; parameter, which is named the size of freedom of choice of the best models. So it provides a solution of multicriterion problem of structure identification the macromodel with guaranteed predicted properties and controlled complexity.

The software is created and it is held the approbation of created method and algorithm of structure identification the interval difference operators for solving the tasks of macromodeling processes emissions of nitrogen dioxide concentrations in the city of Ternopil. It is established that the dynamics pollutant emissions of concentrations is largely depend from the the daily cycle of change of intensity of transport traffic. Based on real data with interval errors using the methods of structure identification the interval difference operator it is constructed the field emissions of nitrogen dioxide concentrations of vehicles in the center of Ternopil.

Keywords: difference operator, structure identification, interval data, criteria of optimum, genetic algorithm.