

УДК 519.688

## АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ПРИКЛАД ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ АВТОТРАНСПОРТУ

М.П. Дивак, Ю.Б. Масляк, А.В. Пукас, Н.П. Порплиця, І.Ф. Войтюк,  
В.С. Тимчишин

*Кафедра комп'ютерних наук, Тернопільський національний економічний університет*  
*mdy@tneu.edu.ua, yuramasua@gmail.com, apu@tneu.edu.ua, ocheretnyuk.n@gmail.com,*  
*i.voytyuk.tneu@gmail.com, tymchyshynn@gmail.com*

У статті розглянуто архітектуру програмно-апаратного забезпечення системи екологічного моніторингу. Визначено основні задачі системи, зокрема, прогнозування забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту з використанням математичних моделей у вигляді різницевих операторів. Для їх побудови використано методи структурно-параметричної ідентифікації на основі аналізу інтервальних даних. Розглянуто приклад застосування системи для моделювання добової динаміки концентрацій діоксиду азоту в залежності від інтенсивності транспортних потоків.

*Ключові слова: екологічний моніторинг, концентрації шкідливих викидів автотранспорту, різницевий оператор, аналіз інтервальних даних, математична модель.*

The architecture of software-hardware environmental monitoring system is considered in the paper. The main tasks of the system are determined. In particular, the prediction of atmospheric pollution by harmful emissions of motor vehicles using mathematical models in the form of difference operators. Structural-parametric identification methods based on interval data analysis are used to build them. An example of application of the system for modeling of daily dynamics of nitrogen dioxide concentrations depending on the traffic intensity is considered.

*Keywords: environmental monitoring, concentrations of harmful emissions of motor vehicles, difference operator, interval data analysis, mathematical model.*

В статье рассмотрено архитектуру программно-аппаратного обеспечения системы экологического мониторинга. Определены основные задачи системы, в частности, прогнозирования загрязнения атмосферы вредными выбросами автотранспорта с использованием математических моделей в виде разностных операторов. Для их построения использованы методы структурно-параметрической идентификации на основе анализа интервальных данных. Рассмотрен пример применения системы для моделирования суточной динамики концентраций диоксида азота в зависимости от интенсивности транспортных потоков.

*Ключевые слова: экологический мониторинг, концентрации вредных выбросов автотранспорта, разностный оператор, анализ интервальных данных, математическая модель.*

**Вступ.** Забруднення атмосферного повітря – це змінення складу і властивостей атмосферного повітря в результаті надходження або утворення в ньому фізичних, біологічних факторів і (або) хімічних сполук, що можуть несприятливо впливати на здоров'я людини та стан навколишнього природного середовища. Основними джерелами забруднень у великих містах є промислові підприємства та шкідливі викиди автотранспорту. У містах, де відсутні великі

промислові комплекси, основну частку джерела забруднень складає автотранспорт. Така частка може сягати 80%. Найбільш небезпечними серед них є оксиди вуглецю, азоту та сірки. При високих концентраціях в атмосферному повітрі ці речовини негативно впливають на нервову, серцево-судинну систему, подразливо діють на органи дихання та слизові оболонки очей, можуть викликати сильний кашель, блювоту та головний біль. [1, 2]. Зважаючи на негативні наслідки забруднення довкілля автотранспортом, доцільним є створення в містах систем екологічного моніторингу.

Інтенсивний розвиток обчислювальної техніки створив умови для побудови складних систем екологічного моніторингу із значним переважанням програмної складової над апаратною. Основними задачами, які розв'язують вказані системи, є оцінювання та прогнозування динаміки чи просторового розподілу концентрацій шкідливих викидів хімічних речовин для співставлення їх із гранично допустимими. Програмні модулі таких систем використовуються для моделювання процесів поширення шкідливих викидів на основі експериментальних даних, отриманих із застосуванням вимірювальних пристроїв, які характеризуються певними похибками вимірювань. У цьому випадку таку апріорну невизначеність доцільно описувати в інтервальному вигляді, а побудову математичних моделей здійснювати методами макромоделювання із застосуванням аналізу інтервальних даних [3-10].

Однією із основних проблем макромоделювання є вибір загального вигляду макромоделі. У випадку моделювання процесів поширення шкідливих 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: О.Г. Івахненко, В.С. Степашко, Н. Akaike, L. Ljung, J. Rissanen, D. Pollard [11-20]. В основі усіх відомих методів структурної ідентифікації макромоделей у вигляді різницевого операторів є критерії оцінки якості структури, які ґрунтуються на мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними. В умовах похибок вимірювальних пристроїв такий підхід є неприйнятним. Більш природнім було б розв'язувати задачу синтезу структури макромоделі у вигляді різницевого операторів за умови забезпечення її прогностичних властивостей в межах похибок спостережень на основі теоретико-множинного та інтервального підходів [4-7, 21, 22].

### **1. Архітектура системи екологічного моніторингу**

Спочатку розглянемо архітектуру програмно-апаратної частини системи екологічного моніторингу, яку було створено за результатами науково-дослідного проекту «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом (0116U005507), і яка забезпечує

оцінювання та прогнозування динаміки чи просторового розподілу концентрацій шкідливих викидів автотранспорту.

Архітектура системи екологічного моніторингу представлена на рис. 1.

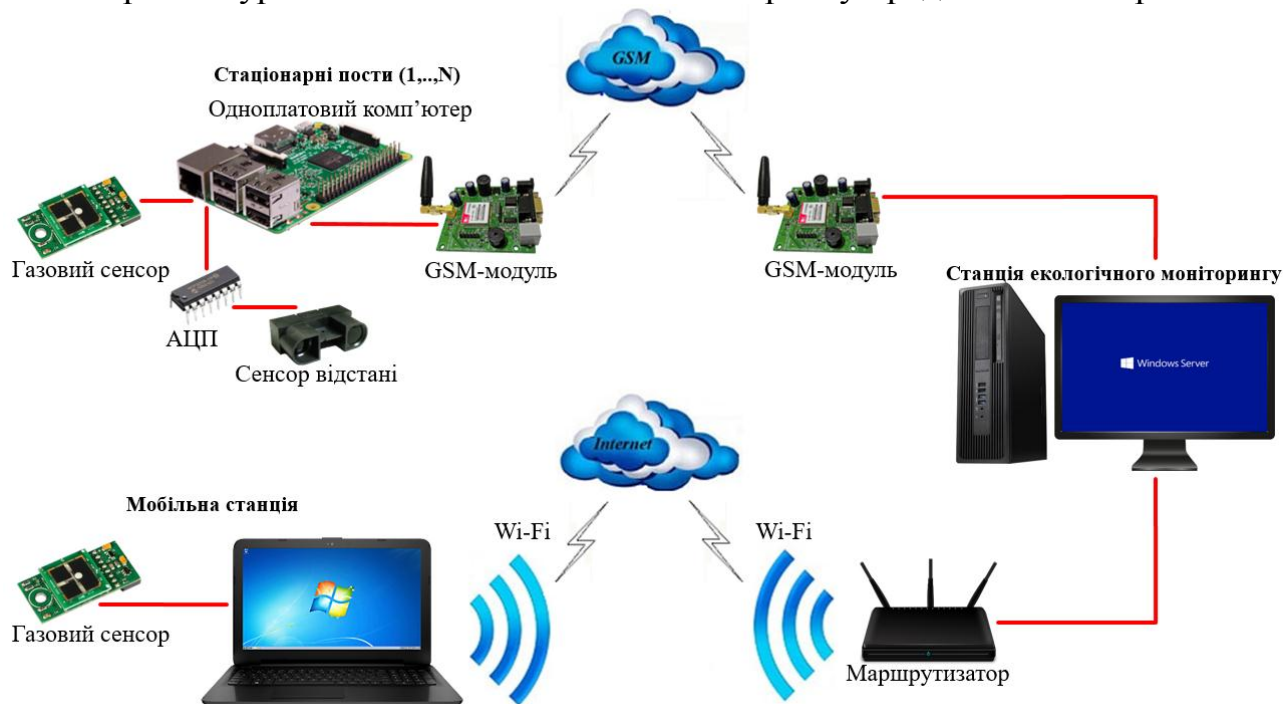


Рис. 1. Архітектура системи екологічного моніторингу.

Варто зауважити що представлена система на даній стадії розробки зорієнтована на контроль лише однієї з речовин – діоксиду азоту (хімічна формула –  $\text{NO}_2$ ). Такий вибір обумовлений, з одного боку, найбільшою концентрацією цієї речовини у вихлопних газах автотранспорту, а з іншого боку – приналежністю до другого класу небезпеки за класифікацією шкідливих речовин. В подальшому передбачено використання сенсорів також оксидів вуглецю та сірки. Розглянемо детальніше цю архітектуру.

*Стационарний пост* вимірювання рівня концентрацій  $\text{NO}_2$  побудований на основі одноплатового комп'ютера Raspberry Pi 3 [23], газового сенсора для вимірювання концентрацій  $\text{NO}_2$  «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037» [24] (в який вмонтовано сенсори визначення температури та вологості повітря) та сенсора визначення відстані «Sharp GP2Y0A710K» [25] для встановлення кількості автотранспортних одиниць, які перетинають ділянку дорожнього полотна, контрольовану даним сенсором. На комп'ютері встановлена операційна система Windows 10 IoT Core.

Сенсор для вимірювань концентрації  $\text{NO}_2$  укомплектований перехідником UART-to-USB, що дозволяє підключити його до комп'ютера через USB інтерфейс. Сенсор функціонує за допомогою встановлених драйвера та терміналу. Вимірювання миттєвих концентрацій  $\text{NO}_2$  проводяться щосекунди. Дані записуються у log-файл.

Сенсор визначення відстані під'єднується до плати Raspberry Pi 3 за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) «Microchip MCP3008» [26] (у плату не вмонтовано жодного аналогового входу).

Отримані дані відправляються на сервер за допомогою GSM для подальшої обробки.

*Мобільна станція* вимірювання рівня концентрацій NO<sub>2</sub> побудована на основі ноутбука зі встановленою операційною системою Windows та сенсора для вимірювання концентрацій NO<sub>2</sub>, температури та вологості «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037». Підключення сенсора здійснюється аналогічно до попереднього випадку – через USB інтерфейс. Для функціонування сенсора на ноутбуці встановлено драйвер та термінал. Вимірювання миттєвих концентрацій NO<sub>2</sub> проводяться щосекунди. Дані записуються у log-файл та передаються на сервер за допомогою Інтернет.

Визначення інтенсивності автотранспортного потоку в даному випадку здійснюється за допомогою веб-камер, розташованих на перехрестях міста.

*Станція екологічного моніторингу* являє собою серверне обладнання, на якому містяться: база даних вимірних концентрацій шкідливих викидів, програмне забезпечення для побудови математичних моделей з метою прогнозування часового та просторового розподілу вказаних концентрацій. Методи структурної та параметричної ідентифікації моделі, реалізовані в програмному забезпеченні, розроблені на основі індуктивного підходу [11, 13, 27, 28]. Також, на сервері реалізована веб-орієнтована система для відображення результатів моделювання та архівних даних рівня концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в атмосферному повітрі м. Тернополя.

## **2. Результати експерименту**

Розглянемо приклад застосування вище описаної системи екологічного моніторингу для моделювання динаміки концентрацій шкідливих викидів NO<sub>2</sub> на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича, м. Тернопіль. Для отримання даних використано вищеописаний мобільний вимірювальний пост на базі ноутбука та цифрового газового сенсора «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037», який одночасно вимірює температуру та вологість повітря. Вимірювання проводились кожну секунду. З метою компенсації випадкової похибки вимірювань, яка зазвичай є нормально розподіленою з нульовим математичним сподіванням, виміряні миттєві значення усереднювали у вікні тривалістю 20 хвилин. Одночасно фіксувалося інтенсивність автотранспортного потоку. Відносна похибка газового сенсора складає 15%. Похибки вимірювань температури та вологості повітря є настільки малими, що ними можна знехтувати. Інтенсивність автотранспортних потоків фіксувалась безпомилково. Результати вимірювань на вказаному перехресті представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань на перехресті Руська – Замкова – Шашкевича

№ спостереження	Час доби	Виміряні концентрації NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>		Інтенсивність транспортного потоку, од.	Відносна вологість повітря, %	Температура повітря, °С
		$z_k^-$	$z_k^+$			
N				$\bar{u}_{1,k}$	$\bar{u}_{2,k}$	$\bar{u}_{3,k}$
1	0:20	0,0336	0,045458	168	73,53	4
2	0:40	0,023263	0,031474	152	73,83	4
3	1:00	0,017822	0,024112	147	73,64	4
4	1:20	0,010728	0,014514	76	73,19	4
5	1:40	0,010074	0,01363	73	73,35	4
6	2:00	0,011038	0,014934	59	73,47	4
7	2:20	0,010648	0,014406	48	72,24	4
8	2:40	0,008484	0,011478	43	71,78	4
9	3:00	0,007548	0,010213	41	71,33	4
10	3:20	0,005784	0,007825	37	71,24	4
11	3:40	0,008973	0,012139	38	70,23	4
12	4:00	0,011821	0,015992	44	69,52	4,19
13	4:20	0,01409	0,019062	36	70,37	4,26
14	4:40	0,017976	0,024321	38	71,21	4,98
15	5:00	0,02388	0,032308	33	71,87	5
16	5:20	0,02226	0,030116	26	71,47	5
17	5:40	0,018508	0,02504	40	70,93	5
18	6:00	0,018267	0,024714	60	70,1	5
19	6:20	0,013492	0,018255	59	70,01	5
20	6:40	0,017039	0,023053	66	70,48	5
21	7:00	0,020966	0,028366	111	71,8	5
22	7:20	0,027949	0,037814	197	72,65	4,78
23	7:40	0,045566	0,061648	391	73,82	4,36
24	8:00	0,066311	0,089714	561	73,95	4,19
25	8:20	0,081538	0,110316	593	73,02	3,31
26	8:40	0,093422	0,126394	712	73,24	3
27	9:00	0,094928	0,128432	755	75,5	3
28	9:20	0,099368	0,13444	790	76,35	3
29	9:40	0,098484	0,133243	810	79,35	3
30	10:00	0,095786	0,129592	805	83,14	3,66
31	10:20	0,097487	0,131894	744	86,14	4
32	10:40	0,092085	0,124585	730	89,21	4
33	11:00	0,078601	0,106342	743	92,64	4,35
34	11:20	0,071951	0,097345	765	93,42	4,87

35	11:40	0,070825	0,095822	687	95,44	5,07
36	12:00	0,06925	0,093691	711	94,21	5
37	12:20	0,073373	0,09927	694	94,35	5

Продовження таблиці 1

38	12:40	0,074747	0,101128	681	96,34	4,76
39	13:00	0,073945	0,100043	779	95,85	4,54
40	13:20	0,075474	0,102112	741	95,72	4,18
41	13:40	0,079607	0,107704	662	94,82	4
42	14:00	0,081429	0,110169	726	94,13	3,63
43	14:20	0,085678	0,115918	685	92,12	3
44	14:40	0,087235	0,118024	771	91,01	3
45	15:00	0,090298	0,122168	778	88,51	3
46	15:20	0,094503	0,127857	738	86,46	3
47	15:40	0,099178	0,134182	778	84,13	3
48	16:00	0,102753	0,139019	758	83,12	3
49	16:20	0,103406	0,139903	777	81,9	3
50	16:40	0,098626	0,133436	728	81,61	3
51	17:00	0,094071	0,127273	682	80,84	3
52	17:20	0,090062	0,121849	751	80,43	3
53	17:40	0,085638	0,115863	749	80,44	3
54	18:00	0,074442	0,100716	726	80,84	2,82
55	18:20	0,073959	0,100062	761	81,48	2,32
56	18:40	0,069945	0,094631	719	81,11	2
57	19:00	0,067723	0,091625	713	82,92	2
58	19:20	0,065397	0,088478	531	82,78	2
59	19:40	0,059341	0,080285	512	82,15	2
60	20:00	0,056662	0,076661	465	82,13	2
61	20:20	0,056246	0,076098	468	81,49	2
62	20:40	0,055804	0,0755	252	82,84	2
63	21:00	0,054986	0,074393	234	82,11	2
64	21:20	0,054084	0,073173	201	82,68	2
65	21:40	0,053489	0,072368	247	81,85	2
66	22:00	0,051674	0,069912	243	80,87	2
67	22:20	0,049124	0,066462	252	80,23	2
68	22:40	0,046697	0,063178	231	80,08	2
69	23:00	0,046088	0,062355	254	77,45	2,42
70	23:20	0,044862	0,060695	219	77,99	2
71	23:40	0,044784	0,06059	196	78,33	2
72	0:00	0,044195	0,059793	172	78,14	2

### 3. Модель динаміки добового циклу концентрацій діоксиду азоту та її ідентифікація.

Нехай модель динаміки концентрацій забруднення шкідливою речовиною можливо представити у загальному вигляді таким різницеvim оператором (PO):

$$v_k = \vec{g}^T \cdot \vec{f}(v_0, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k), \quad k = d, \dots, N, \quad (1)$$

де  $\vec{f}(v_0, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k)$  – деякий фіксований вектор (розмірністю  $m \times 1$ ) базисних функцій, що задає структуру різницевого оператора;  $v_k$  – прогнозована концентрація шкідливої речовини в фіксованій точці в  $k$ -й дискретний момент часу;  $\vec{u}_k = (u_{1,k}, \dots, u_{p,k})^T$  – відомий вектор (розмірністю  $p \times 1$ ) вхідних змінних в  $k$ -й дискретний момент часу;  $d$  – порядок різницевого оператора;  $\vec{g}$  – невідомий вектор (розмірністю  $m \times 1$ ) параметрів різницевого оператора.  $N$  – кількість спостережень.

У зв'язку з наявністю похибок вимірювань з відомими межовими значеннями, результати спостережень в  $k$ -й момент часу представляємо в інтервальному вигляді:

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

де  $z_k$  – виміряне значення концентрації;  $[z_k^-; z_k^+]$  – гарантований інтервал вимірної концентрації;  $\varepsilon$  – відносна похибка вимірювань.

Невідомий вектор параметрів  $\vec{g}$  різницевого оператора оцінюється за умовами належності прогнозованих значень до відповідного інтервалу вимірних значень. Вказані умови представлені у такому вигляді:

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subseteq [z_k^-; z_k^+], \quad k = 0, \dots, N, \quad (3)$$

де  $[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$  – прогнозований інтервал в загальному випадку обчислюється за формулою РО:

$$[\hat{v}_k] = \hat{g}^T \cdot \vec{f}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k), \quad k = 0, \dots, N, \quad (4)$$

де  $\hat{g}$  – вектор оцінок параметрів різницевого оператора, який отримуємо із умов належності (3).

Оскільки для отримання інтервалу прогнозованої концентрації  $\hat{v}_k$  за формулою РО (4) необхідно проводити обчислення за правилами інтервальної арифметики, то такий оператор називатимемо інтервальним різницеvim оператором (ІРО).

Підставивши інтервальні оцінки  $[\hat{v}_k]$ , обчислені за формулою (4), за наявності початкових наближень  $[\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{d-1}]$  у вирази (3), отримаємо інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР) [28, 29] у такому вигляді:

$$v_k^- \leq \hat{g}^T \cdot \vec{f}([\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_0, \dots, \vec{u}_k) \leq v_k^+, \quad k = d, \dots, N. \quad (5)$$

Для знаходження хоча б одного розв'язку ІСНАР використовують методи параметричної ідентифікації [30], які, у свою чергу, ґрунтуються на методах випадкового пошуку, зокрема, з використанням напрямного конуса Растріґіна [31, 32].

Разом з тим, структура моделі у вигляді ІРО є не відомою.

Виберемо структурні елементи з елементів таких підмножин:

$U_p^s = \{ \vec{u}_k \in R^p \mid \{u_{1,0}, \dots, u_{p,k}\} \}$  – множина вхідних змінних (керувань);

$V_d^s = \{ \vec{v}_k \in R^d \mid \{[\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_k]\} \}$  – множина відомих дискретних інтервальних значень концентрацій  $NO_2$ , яка характеризує порядок різницевого оператора;

$G_m^s = \{ \vec{g}_m \in R^m \mid \{g_1, \dots, g_m\} \}$  – множина параметрів різницевого оператора;

$F_{m,d}^s = \{ \vec{f} \in R^m \mid \{f_1([\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_k), \dots, f_m([\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_k)\} \}$  – множина базисних функцій різницевого оператора;  $m$  – кількість базисних функцій та кількість параметрів різницевого оператора.

Отже, поточну структуру різницевого оператора можна описати у вигляді такого кортежу [33]:

$$\lambda_s : \langle U_p^s, V_d^s, G_m^s, F_{m,d}^s \rangle \quad (6)$$

Структурні елементи із множини  $U_p^s, V_d^s$  вказаного кортежу пов'язані вектором базисних функцій. Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку кортежу  $\lambda_s$  у вигляді (6), який забезпечує сумісність ІСНАР (5). Одним зі способів забезпечення сумісності вказаної системи є ускладнення структури. Але доцільнішим буде застосування більш раціонального алгоритму, який описано в праці [29]. Для цього використаємо показник якості структури, який вперше розглянуто у праці [34] та представлено в удосконаленому вигляді в працях [29, 33]:

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=d \dots N} \left\{ \left| \text{mid}([\hat{v}_k(\lambda_s)]) - \text{mid}([z_k]) \right| \right\} \quad (7)$$

$$\text{якщо } [\hat{v}_k(\lambda_s)] \cap [z_k] = \emptyset, \exists k = d, \dots, N;$$

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=d \dots N} \left\{ \left| \text{wid}([\hat{v}_k(\lambda_s)]) - \text{wid}([\hat{v}_k(\lambda_s)] \cap [z_k]) \right| \right\}, \quad (8)$$

$$\text{якщо } [\hat{v}_k(\lambda_s)] \cap [z_k] \neq \emptyset, \forall k = d, \dots, N,$$



де  $\left[ \hat{v}_k(\lambda_s) \right]$  – прогнозоване інтервальне значення концентрації шкідливої речовини на основі (4) зі структурою  $\lambda_s$ ;  $mid(\bullet)$  та  $wid(\bullet)$  – операції визначення центру та ширини інтервалу, відповідно.

Тоді загальна постановка задачі структурної ідентифікації формулюється у вигляді такої оптимізаційної задачі:

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\lambda_s} \min. \quad (9)$$

Метод структурної ідентифікації моделі побудований на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії [33, 35]. Поведінкові моделі бджолоїної колонії імітують поведінку медоносних бджіл під час пошуку якісних джерел нектару [35].

Застосування цього методу структурної ідентифікації IPO передбачає етап визначення початкових параметрів алгоритму його реалізації. Тому, спочатку задаються значення змінних  $M_{CN}$ ,  $LIMIT$ ,  $S$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}]$  та множина структурних елементів  $F$ . Після цього, випадковим чином формується початкова множина структур дискретних рівнянь  $\Lambda_0$  із кількістю елементів  $S$ .

Далі, застосування методу структурної ідентифікації передбачає перетворення структур інтервальних дискретних моделей за допомогою операторів  $P(\Lambda_{m_{cn}}, F)$ ,  $P_{\delta}(\Lambda_{m_{cn}}, F)$ ,  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  та шляхом проведення процедур селекції за допомогою операторів  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ ,  $D_2(\lambda_s, \lambda'_s)$  у такий спосіб, щоб забезпечити зменшення на кожній ітерації значень функції мети (9).

Розглянемо послідовність виконання цих операторів та принципи їх дії детальніше.

Оператор  $P(\Lambda_{m_{cn}}, F)$  реалізує синтез множини поточних структур IPO  $\Lambda'_{m_{cn}}$ . Механізм його дії полягає у перетворенні множини структур  $\Lambda_{m_{cn}}$  ( $m_{cn}$  – номер поточної ітерації) у множину структур  $\Lambda'_{m_{cn}}$  способом заміни випадковим чином  $n_s$  елементів кожної структури елементами із множини структурних елементів  $F$ . Зауважимо, що при обчисленні значення змінної  $n_s$  кількість елементів у поточній структурі моделі не враховується, при цьому фігурує лише значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , обчислене для поточної структури моделі  $\lambda_s$ . Показник  $n_s$  визначає кількість структурних елементів, що потрібно замінити у поточній структурі моделі, за таким принципом: чим нижча «якість» структури IPO, тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Разом з тим, для найкращої структури моделі замінити потрібно лише 1 елемент. Необхідність такої заміни у «кращій» структурі IPO в поточній множині структур  $\Lambda_{m_{cn}}$  обґрунтована потребою в перевірці критерію «вичерпаності» для кожної зі сформованих структур.

Далі проводиться попарна селекція структур IPO із застосуванням оператора  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$ . Таким чином отримуємо множину найкращих структур  $\Lambda^1_{mcs}$ .

За допомогою оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$  здійснюємо перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  із множини структур  $\Lambda^1_{mcs}$  у множину структур  $\Lambda'_s, s=1...S$ , шляхом заміни випадковим чином  $n_s$  елементів кожної структури  $\lambda_s^1$  елементами із набору  $F$ . Проте, на відміну від дії оператора  $P(\Lambda_{mcs}, F)$ , оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$  здійснює заміну лише для тих структур  $\lambda_s^1 \in \Lambda^1_{mcs}$ , для яких  $R_s > 0$ . Зауважимо,  $R_s$  – це кількість структур, які генеруються на основі  $s$ -ї структури із множини  $\Lambda^1_{mcs}$ , де елементи множини  $\Lambda^1_{mcs}$  повинні попередньо бути упорядкованими відповідно до спадання значення показника якості  $\delta(\lambda_s^1)$ .

Після застосування оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcs}, F)$  отримуємо множину  $\Lambda''_{mcs}$  таку, що  $\Lambda''_{mcs} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}, s=1...S$ .

Далі проводиться погрупова селекція поточних структур IPO, застосовуючи оператор  $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$ . Таким чином, отримуємо множину «найкращих» структур  $\Lambda^2_{mcs}$  із поточних множин  $\Lambda^1_{mcs}$  та  $\Lambda''_{mcs}$ .

Далі для усіх структур  $\lambda_s^2 \in \Lambda^2_{mcs}$ , перевіряється умова  $Limit_s \geq LIMIT$ . У контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії ця перевірка означає дослідження поточної якості відомого джерела нектару. Варто зауважити, що вичерпані джерела нектару бджоли покидають. Тобто, виконання умови  $Limit_s \geq LIMIT$  для конкретної структури IPO означає, що вона є «вичерпаною». Замість вичерпаних структур здійснюють генерування «нових» із застосуванням оператора  $P_N(F, I_{min}, I_{max})$ .

Якщо знайдено хоча б одну структуру, для якої  $\delta(\lambda_s^2) = 0$ , то завершуємо процедуру структурної ідентифікації, в іншому випадку повертаємося до другого кроку.

Спираючись на інтервальні дані, наведені у таблиці 1, побудовано ІСНАР із 72 інтервальних рівнянь. Із застосуванням описаного методу, отримано таку структуру IPO:

$$\hat{v}_k = g_0 + g_1 \cdot \hat{v}_{k-1} + g_2 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + g_3 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k} / u_{1,k-1} - \\ - g_4 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1} / u_{1,k+1}.$$

В результаті проведення параметричної ідентифікації моделі із застосуванням вищезгаданих процедур випадкового пошуку, отримано такі оцінки параметрів:

$$\hat{v}_k = 0,0365 + 0,3542 \cdot \hat{v}_{k-1} + 0,118 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot \hat{v}_{k-3} + 0,5059 \cdot \hat{v}_{k-1} \cdot u_{1,k} / u_{1,k-1} - 0,0154 \cdot \hat{v}_{k-2} \cdot u_{1,k-1} / u_{1,k+1}. \quad (10)$$

#### 4. Результати моделювання та верифікація моделі

Отримана математична модель (10) відображає динаміку концентрацій NO<sub>2</sub> на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя з дискретним значенням часу 20 хвилин. Для її використання достатньо задати початкові значення виміряних концентрацій та інтенсивності автотранспортного потоку. З огляду на те, що зміна значень вологості  $\bar{u}_{2,k}$  та температури повітря  $\bar{u}_{3,k}$ , наведених у таблиці 1, майже не впливає на результати моделювання, у моделі (10) враховується лише один з керуючих факторів – інтенсивність автотранспортного потоку  $\bar{u}_{1,k}$ . На основі таблиці 1, задаємо початкові дані для моделювання:

$[\hat{v}_0] = [0,039489; 0,039569]$ ;  $[\hat{v}_1] = [0,027341; 0,027396]$ ;  $[\hat{v}_2] = [0,020946; 0,020988]$ ;  $u_{1,0} = 168$ ;  $u_{1,1} = 152$ ;  $u_{1,2} = 147$ ;  $u_{1,3} = 76$ .

Результати моделювання представлено на рис. 2. При чому, штриховими лініями зображено інтервали виміряних значень концентрації NO<sub>2</sub>, а суцільними – інтервали прогнозованих значень.

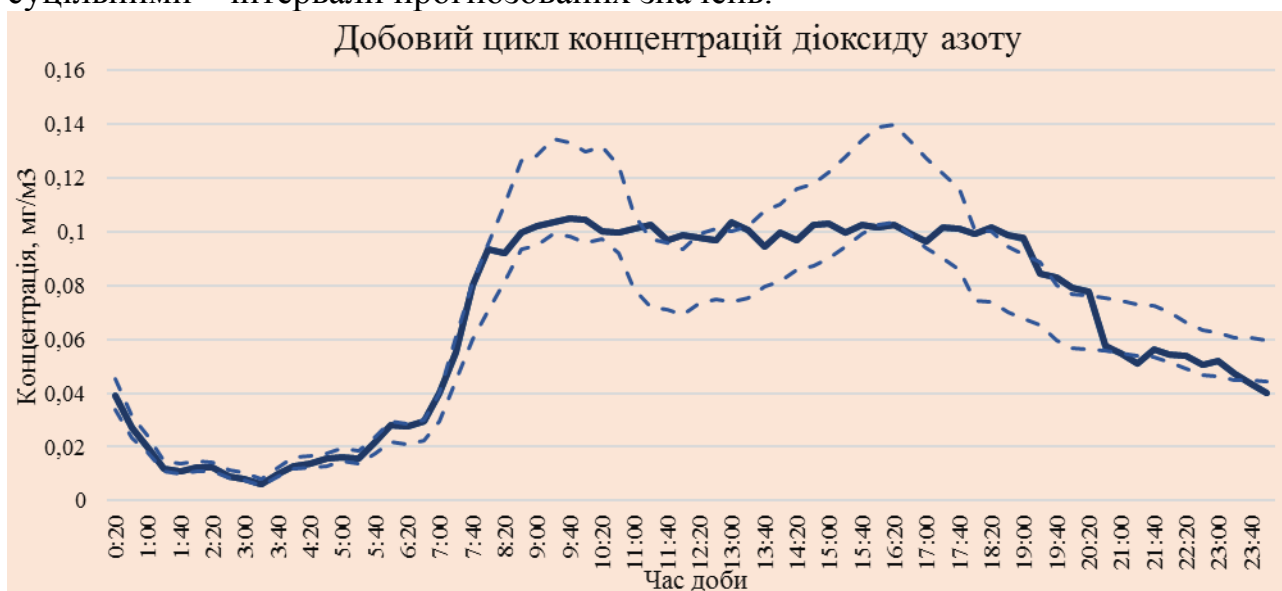


Рис. 2. Добовий цикл концентрацій NO<sub>2</sub> на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича, м. Тернопіль.

Для верифікації отриманої моделі використано дані вимірних концентрацій NO<sub>2</sub> на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя на десяти-годинному часовому інтервалі: з 11:00 до 21:00.

У таблиці 2 наведено дані для проведення верифікації отриманої моделі.

Таблиця 2

Результати вимірювань на перехресті Чехова – За Рудкою

№ спостереження	Час доби	Вимірні концентрації NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>		Інтенсивність транспортного потоку, од.
		$z_k^-$	$z_k^+$	
1	11:20	0,0935	0,1265	316
2	11:40	0,07248	0,098061	248
3	12:00	0,064031	0,08663	292
4	12:20	0,057877	0,078304	275
5	12:40	0,08353	0,113011	405
6	13:00	0,069505	0,094036	219
7	13:20	0,059432	0,080408	296
8	13:40	0,055097	0,074543	279
9	14:00	0,045178	0,061123	264
10	14:20	0,052462	0,070978	250
11	14:40	0,054715	0,074026	298
12	15:00	0,059407	0,080374	350
13	15:20	0,06035	0,08165	355
14	15:40	0,0612	0,0828	340
15	16:00	0,05865	0,07935	360
16	16:20	0,0578	0,0782	323
17	16:40	0,0612	0,0828	456
18	17:00	0,05525	0,07475	315
19	17:20	0,05185	0,07015	297
20	17:40	0,053975	0,073025	348
21	18:00	0,054485	0,073715	326
22	18:20	0,04692	0,06348	245
23	18:40	0,046495	0,062905	233
24	19:00	0,045815	0,061985	234
25	19:20	0,046155	0,062445	212

26	19:40	0,040035	0,054165	144
27	20:00	0,03485	0,04715	120
28	20:20	0,02805	0,03795	131
29	20:40	0,03162	0,04278	112
30	21:00	0,0255	0,0345	122

Спираючись на дані з таблиці 2, задаємо початкові дані для отриманої моделі:  $[\hat{v}_0]=[0,10989; 0,11011]$ ;  $[\hat{v}_1]=[0,085185; 0,085355]$ ;  $[\hat{v}_2]=[0,075255; 0,075405]$ ;  $u_{1,0}=316$ ;  $u_{1,1}=248$ ;  $u_{1,2}=292$ ;  $u_{1,3}=275$ .

На рис. 3 наведено результати вимірювань та результати моделювання рівня концентрацій  $\text{NO}_2$  на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя. Зокрема, штриховими лініями наведено інтервали вимірних значень  $\text{NO}_2$ , а суцільними – прогнозованих.

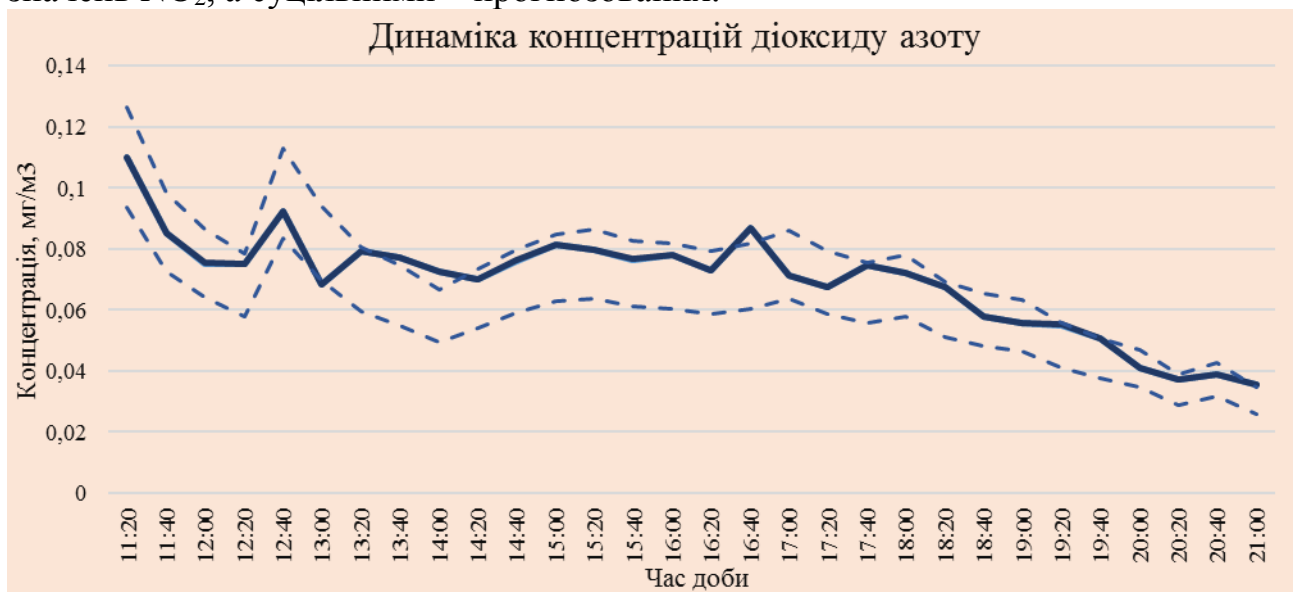


Рис. 3. Динаміка концентрацій  $\text{NO}_2$  на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою, м. Тернопіль.

Як бачимо, коридор інтервальних спрогнозованих концентрацій  $\text{NO}_2$  майже для всіх дискрет знаходиться в межах коридору вимірних концентрацій. Це, в свою чергу, засвідчує адекватність отриманої моделі.

**Подяка.** Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом», що виконується за рахунок коштів загального фонду державного бюджету. Номер державної реєстрації НДР: 0116U005507.

**Висновки.** Запропоновано архітектуру програмно-апаратного забезпечення системи екологічного моніторингу. Показано, що однією з основних задач системи є прогнозування забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту з використанням математичних моделей у вигляді різницевих операторів. Для побудови зазначених моделей запропоновано використання методу структурно-параметричної ідентифікації на основі

поєднання аналізу інтервальних даних та поведінкових моделей бджолоїної колонії. Розглянуто приклад застосування розробленої моделі для прогнозування добової динаміки концентрацій діоксиду азоту в залежності від інтенсивності транспортних потоків. Показано, що отримана модель динаміки забруднень в одній точці міста після незначних налаштувань придатна для прогнозування забруднень в іншій точці.

## Література

1. <http://www.oblses-kiev.com.ua/clients/kievoblses.nsf/0/8C3C3E61F40617AAC22580B9002A3D5F?OpenDocument&>
2. <http://www.zhiva-planeta.org.ua/upload/vpluv-a-p-na-zdorovie-ludey.pdf>
3. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер – М. : – Мир, 1987. – 360 с.
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 : зб. праць. – Київ : МННЦ ІТС, 2008. – № 4. – С. 79-91.
5. Дивак М.П. Інтервальне моделювання динаміки збитків внаслідок забруднення автотранспортом / М.П. Дивак // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія, №3, 2008. – С. 13.
6. 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. – 2011. – Вип. 34, №110. – С. 86-94.
7. Дивак М. Багатокритеріальний підхід структурної ідентифікації інтервальних моделей статичних систем / М. Дивак, В. Манжула // Міжнародний науково-технічний журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія», №2, 2005. – С. 37-44.
8. Дивак М.П. 2002. Проектування інтервальних моделей соціально-екологічних систем на основі нечітких даних / М.П. Дивак, Г.М. Гладій, С.В. Волощук // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах: Зб. наук. праць. – 2002. – Вип. 9, С. 130-135.
9. Вощинин А. П. Интервальный анализ: развитие и перспективы / А. П. Вощинин // Заводская лаборатория. – 2002. – №1. – С. 118–126.

10. Дивак М.П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак. – Тернопіль : Економічна думка, 2011. – 216 с.

11. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко // – Київ: Наукова думка, 1981. – 296 с.

12. Ивахненко А.Г. Регуляризация решающих функций в методе группового учета аргументов / А. Г. Ивахненко, Ю. В. Коппа // Автоматика. – 1970. – №2. – С. 19 – 23.

13. Степашко В. С. Гібридні алгоритми самоорганізації моделей для прогнозування складних процесів / В. С. Степашко, О. С. Булгакова, В. В. Зосімов // Індуктивне моделювання складних систем. – Вип. 2. – 2010. – С. 236-246.

14. Степашко В. С. Элементы теории индуктивного моделирования. – Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія / Кол. авторів. – Київ: Наукова думка, 2010. – С. 481-496.

15. Степашко В.С. Обобщенный итерационный алгоритм метода группового учета аргументов / В. С. Степашко, О. С. Булгакова // Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2. – С. 5-17.

16. Akaike H. Fitting autoregressive models for prediction / H. Akaike // Ann. Inst. Stat. Math., vol. 21, pp. 243-247, 1969.

17. Ljung L. Theory and practice of recursive identification // L. Ljung, T. Soderstrom // Cambr., Mass: MIT Press, 1983. –529 p.

18. Ljung L. System identification: Theory for the User / L. Ljung // Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ., 1987.

19. Rissanen J. Stochastic complexity / J. Rissanen // J. Roy. Statist. Soc. Ser. B, 49, 1987. – pp. 223-265.

20. Pollard D. Convergency of stochastic processes / D. Pollard // Springer-Verlag, New York, 1984.

21. Лычак М. М. Синтез дискретных адаптивных систем управления на основе теоретико-множественных моделей неопределенности / М. М. Лычак // Дис. докт. физ.-мат. наук.– Киев : Ин-т киб., 1995.

22. Бакан Г. М. Теоретико-множественная идентификация линейных объектов в классе размытых эллипсоидальных множеств / Г. М. Бакан, Н. Н. Кукуль // Автоматика. – 1990. –№4. – С. 72–78.

23. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/#buy-now-modal>

24. <https://www.maritex.com.pl/product/attachment/104299/07a19995eabcd474afb54d5a01f97454>

25. <https://www.dfrobot.com/product-447.html>

26. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21295C.pdf>

27. Ивахненко А. Г. Обзор задач, решаемых по алгоритмам Метода Группового Учета Аргументов / А. Г. Ивахненко, Г. А. Ивахненко // <http://www.gmdh.net/>

28. Дивак М. П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С.Степашко. – Київ : МННЦ ІТС, 2009. – Вип. 1. – 236 с. – С. 35–43.

29. Voytyuk I. Research of quality characteristics of models structure in kind of interval difference operator / I. Voytyuk, M. Dyvak, V. Spilchuk // Proc. 11th Int. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2011, Ukraine, 2011, p. 87.

30. Дивак М. П. Ідентифікація параметрів різницевого оператора в задачах моделювання процесів поширення забруднень методами аналізу інтервальних даних / М. П. Дивак, А. В. Пукас, Т. М. Дивак // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – 2009. – Вип. 10. – С. 224-229.

31. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем / Л.А. Растрингин – Рига: Зинатне, 1981,- 359 с.

32. Растрингин Л.А. Введение в идентификацию объектов управления / Л.А. Растрингин, Н.Е. Маджаров – М.: Энергия, 1987. – 216 с.

33. Porplytsya N. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony / N. Porplytsya, M. Dyvak, I. Spivak, I. Voytyuk // Proc. 13th Int. Conf. on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2015, Ukraine, 2015, pp. 196-199.

34. Merkisz J. Exhaust emissions from modes of transport under actual traffic conditions / J. Merkisz, M. Jacyna, A. Merkisz-Guranowska, J. Pielecha // Energy Production and Management in the 21st Century, Vol. 2, 2014, pp. 1139-1150.

35. Karaboga D. A comprehensive survey: artificial bee colony (ABC) algorithm and applications / D. Karaboga, B. Gorkemli, C. Ozturk, N. Karaboga // Artificial Intelligence Review, vol. 42 no. 1, 2014. – pp. 21-57.