

ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

Масляк Юрій Богданович

УДК 519.24

ДИСЕРТАЦІЯ

**Інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими  
викидами автотранспорту та методи їх ідентифікації**

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи  
05 «Технічні науки»

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ Ю.Б. Масляк

Науковий керівник  
**Дивак Микола Петрович,**  
доктор технічних наук, професор,  
заслужений діяч науки і техніки  
України

**Ідентичність всіх примірників дисертації  
ЗАСВІДЧУЮ**

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

/Р.А. Бунь/

Львів – 2019

## АНОТАЦІЯ

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

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Підготовка здійснювалась на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Міністерства освіти і науки України.

Спеціалізована вчена рада Д35.052.05 при Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Дисертаційна робота присвячена розв'язуванню актуального науково-прикладного завдання розвитку методів структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей (ІДДМ) у вигляді різницевих рівнянь, а також засобів їх реалізації, інтегрованих в єдине середовище для математичного та комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в умовах використання інтервальних даних.

У першому розділі проведено аналіз математичних моделей процесів забруднення атмосфери та методів їх ідентифікації.

Проведений аналіз показав, що основним джерелом забруднення довкілля міста шкідливими викидами є автомобільний транспорт. Для зменшення негативного впливу автотранспорту на довкілля необхідно розробити систему моніторингу, основою якої є математичні моделі динаміки концентрацій шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту. Серед існуючих моделей поширення забруднюючих речовин

в атмосферному повітрі виділяють три найбільш поширених типи: емпірично-статистичні (модель Гаусса та ін.); статистичні (регресійні та ін.); моделі турбулентної дифузії (моделі математичної фізики). Застосування моделей першого типу для моделювання сукупного забруднення автотранспортом є проблемним, оскільки транспорт є розподіленим джерелом забруднення з невідомими для дослідника параметрами. До того ж, у цих моделях необхідно враховувати велику кількість чинників, які мають миттєву дію, що не можливо зафіксувати вимірювальними приладами і, відповідно, перевірити. Недоліком другого виду (статистичних моделей) є великі значення похибок при довгострокових прогнозах внаслідок значних відхилень всередині вибірки даних та нестаціонарності процесу. Подібними недоліками, як у моделях першого виду, характеризуються моделі турбулентної дифузії. Окрім цього, іншим недоліком вказаного типу моделей є складність урахування інтенсивності джерел шкідливих викидів для такого розподіленого об'єкта, яким є автотранспорт. Варто також зазначити, що моделі турбулентної дифузії є диференціальними рівняннями в частинних похідних. Тому, для їх застосування необхідно використовувати чисельні методи. Звідси витікає просте рішення: замість запису складного диференціального рівняння і подальшої його дискретизації, доцільно отримати різницеве рівняння з невідомими на початку структурою та параметрами, та налаштувати їх з використанням вибірки даних. При цьому, дані експерименту доцільно представляти у вигляді інтервалів.

Складність розв'язання такої задачі залежить як від кількості параметрів, так і від кількості дискрет. За своєю суттю, така задача є NP-складною. Тому, для її розв'язання використовують метод випадкового пошуку хоча б одного розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь. У роботі обґрунтовано, що найбільш ефективним з точки зору обчислювальної складності є випадковий пошук із використанням направляючого конуса Растрігіна, який прийнято за основу для

розв'язування задачі параметричної ідентифікації ІДДМ у дисертаційній роботі.

Важливо зазначити, що задача структурної ідентифікації ІДДМ полягає у багаторазовому формуванні набору структурних елементів та розв'язуванні задачі параметричної ідентифікації.

Для розв'язування вказаної задачі проаналізовано ряд методів: редукції структури математичної моделі; «нарощування» структури; метод групового урахування аргументів (МГУА); генетичні алгоритми та метод, який базується на поведінковій моделі бджолої колонії (ПМБК).

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

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

У завершальній частині розділу здійснено постановку завдань дисертаційного дослідження.

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



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

У результаті проведених досліджень зроблено висновок: до зростання часової складності призводить наявність у процедурі структурної ідентифікації можливих обчислень по двох зовнішніх циклах. Перший цикл пов'язаний із потребою вибору нових структурних елементів із множини, коли інші структури «вичерпані», а другий цикл передбачає оновлення початкового набору структурних елементів.

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

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

У завершальній частині розділу наведено приклади формування початкової множини структурних елементів для побудови ІДДМ у задачі

структурної ідентифікації на прикладі моделювання добового циклу динаміки концентрацій діоксиду азоту.

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

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

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

В інформаційній технології також інтегровано технічні засоби та відповідні програмні модулі: сенсори концентрацій шкідливих викидів автотранспорту, сенсори для вимірювання інтенсивності автотранспортних потоків, які разом із сенсорами для вимірювання концентрацій шкідливих викидів підключено до одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3, що здійснюють попередню обробку результатів вимірювань. Кожен одноплатний комп'ютер обладнаний також GSM-модулем, через який здійснюється передача даних до центрального сервера.

Далі у цьому розділі обґрунтовано архітектуру програмно-апаратної системи для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту.

Автоматизована система моніторингу шкідливих викидів автотранспорту виконує такі завдання: збір, накопичення та обробку інформації про забруднюючі атмосферу речовини, що є продуктами викиду відпрацьованих газів автомобілів, в залежності від інтенсивності транспортного потоку; моделювання ситуації щодо стану забруднення атмосферного повітря; прогнозування забруднення атмосферного повітря шкідливими викидами автотранспорту; забезпечення підтримки оперативних управлінських рішень, від виконання яких безпосередньо залежить здоров'я та екологічна безпека населення.

На стороні користувача розгорнуто клієнтську частину веб-орієнтованої системи, яка дозволяє в режимі реального часу слідкувати за викидами шкідливих речовин у повітря.

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

Розроблена інформаційна технологія, в основі якої лежать методи структурної та параметричної ідентифікації, дає можливість розв'язувати задачу встановлення добового циклу концентрацій шкідливих викидів автотранспорту з врахуванням інтенсивності автотранспортних потоків.

Наступними в цьому розділі розглянуто комплекс моделей для прогнозування динаміки концентрацій шкідливих речовин.

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

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:*

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

2. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyak Y., Shynkaryk M. Method of parametric identification for interval discrete dynamic models and the computational scheme of its implementation // Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. 2018. Vol. 689. P. 101-112.

3. Дивак М.П., Порплиця Н.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Мельник А.М. Метод ідентифікації моделей об'єктів із розподіленими параметрами з просторово розподіленим керуванням на основі аналізу інтервальних даних // Радіoeлектроніка, інформатика, управління. 2017. № 2. С. 150-159.

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

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

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

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

7. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Kasatkina N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control // Proc. Of the 14th Intern. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017). 2017. P. 50-54.

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

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

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

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

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

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

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

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

*Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації*

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

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

## ABSTRACT

*Maslyiak Y.B.* Interval models of processes of atmosphere pollution by harmful motorvehicle emissions and methods of their identification.

Thesis for a Ph.D. degree in Technical Sciences in specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods. Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

Preparation has been carried out at the Department of Computer Science of the Ternopil National Economic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Specialized Academic Council D 35.052.05 at the Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine.

The dissertation is devoted to solving of actual scientific and applied task of developing of structural identification methods for interval discrete dynamic models (IDDM) in the form of difference equations as well as their realization tools integrated into a single environment for mathematical and computer modeling of atmospheric pollution by harmful emissions of motorvehicles under condition of interval data.

In the first chapter, an analysis of mathematical models of atmospheric pollution processes by harmful substances and methods of their identification has been conducted.

The analysis showed that motortransport is the main source of environmental pollutant in a city. In order to reduce the negative impact of motorvehicles on the environment, it is necessary to develop a monitoring system based on mathematical models of dynamics of pollution concentrations. Among the existing models of the air pollutants distribution, three of the most common types are distinguished: empirical-statistical (Gauss model, etc.); statistical (regression, etc.); models of turbulent diffusion (model of mathematical physics). The use of models of the first type for modeling of total pollution from

motorvehicles is problematic, since transport is a distributed pollution source with unknown parameters for a researcher. In addition, these models need to take into account a large number of factors that have an instantaneous effect that cannot be fixed by measuring devices and therefore verified. The disadvantage of the second type of models (statistical ones) is the large values of errors in long-term predictions due to significant deviations within the data sample and the unsteadiness of the process. Turbulent diffusion models are characterized by disadvantages that are similar to the first type models. In addition, another disadvantage of the considered type of the models is difficulty in taking into account of intensity of harmful emission sources for such a distributed object which motortransport is. It is also worth to note that turbulent diffusion models are differential equations in partial derivatives. Therefore, numerical methods should be used for their application. Hence, a simple solution follows, instead of recording of a complex differential equation and its subsequent discretization, it is advisable to obtain a difference equation with initially unknown structure and parameters, and identify them using a sample of data. In this case, the experimental data should be represented in the form of intervals.

The complexity of solving of such a problem depends both on the number of parameters and on the number of discretizes. In its essence, such a task is NP-complex one. Therefore, to solve it, the method of random search of at least one solution of interval system of nonlinear algebraic equations is used. The paper substantiates that the random search with the use of the Rustigin's director cone is the most effective one in terms of computational complexity.

It is important to note that the task of structural identification of interval discrete dynamic models consists in multiple formation of a structural elements set and solving of parametric identification task.

To solve this task, a number of methods have been analyzed: reduction of a mathematical model structure; "Build-up" of a structure; Group method of data



handling (GMDH); genetic algorithms and the method based on the bee colony behavioral model (BCBM).

As the result of conducted analysis of all methods of structural identification, it has been established that these methods are complicated for implementation by a user, contain complex procedures of parametric identification and require creation of information technology for computer modeling of atmospheric pollution by harmful emissions from motorvehicles which would integrate methods and tools for obtaining of data, their preliminary analysis, as well as methods and tools for structural and parametric identification to build an adequate IDDM of the indicated processes.

Considering the above mentioned facts, the scientific and applied task of developing of structural identification methods for IDDM in the form of difference equations, as well as tools for their realization, integrated into a single environment for mathematical and computer modeling of atmospheric pollution by harmful emissions from motorvehicles under condition of interval data obtained by sensors is actual.

In the final section of the chapter, the tasks of the dissertation research have been set.

The second chapter of the dissertation reveals the essence of improved structural identification method of IDDM based on the bee colony behavioral model.

Further, in this chapter, the detailed analysis of complexity of computing implementation of operators and procedures of the above mentioned method has been carried out. For this, the relation for the required number of operations of adding and multiplying has been obtained.

As a result of conducted research, it has been concluded: the presence of two possible external computational loops (each of which requires the largest number of implementation of parametric identification method in the procedure of structural identification) leads to the highest computational complexity. The first

loop is related to the need of selection of new structural elements from the set when other structures are “exhausted”. And, the second loop involves updating of initial set of structural elements.

Thus, it is substantiated that the quality of formation of the initial set of structural elements (which is usually carried out empirically in the existing method) is the crucial factor for computational complexity of implementation of the method of structural identification of IDDM on the basis of BCBM. Therefore, it is proposed to automate this procedure based on preliminary cluster analysis of interval data sample.

As it is known, the uncertainty and inaccuracy of data leads to the need of interval representation. For example, the interval representation of the observation results in the task of building of IDDM of concentrations of harmful emissions from motorvehicles is related to two groups of factors. These are measurement errors, the boundaries of which are determined by the characteristics of the measuring devices, and the errors related to impossibility of taking into account the effects of various factors including random ones. Such important factors for this task class are the different characteristics of the point for which a dynamic model is built, for example: natural ventilation; the presence of vertical and horizontal air flows, etc.

In the final section of the chapter, the example of the initial set formation for IDDM building in the task of structural identification is shown by the example of modeling of the daily cycle of nitrogen dioxide concentrations.

Thus, the method of structural identification of IDDM based on BCBM is improved. In contrast to the existing one, it contains procedures of automated formation of the initial structural elements set based on the method of subtractive clustering of the input data sample. It ensures reduce of computational complexity of the method’s implementation.

The third chapter presents the results of development of tools for modeling of processes of atmospheric pollution by harmful emissions from motorvehicles.

Information technology integrates the following methods: methods of representation of physical and chemical properties of the air using parameters of electrical signals, method of interval data obtaining, method of data clustering, methods of structural and parametric identification of mathematical models of atmospheric pollution, as well as method of visualization of the modeling results.

Information technology also integrates technical equipment and related software modules: motorvehicle emissions sensors, traffic measuring sensors, together with sensors for measuring of harmful emissions are connected to single-board computer Raspberry Pi 3 that performs preprocessing of measurement results. Each single-board computer is also equipped with a GSM module, through which, the data is sent to the central server.

Further in this chapter, the architecture of the software and hardware system for monitoring of harmful emissions from motorvehicles is substantiated.

Automated system for monitoring of harmful emissions of motorvehicles completes the following tasks: collecting, storing and processing of information on polluting substances, which are the product of the exhaust gases of cars, depending on the intensity of traffic flow; modeling of situation regarding atmospheric pollution; predicting of air pollution by harmful emissions of motorvehicles; ensuring of decision making support which directly affects the health and environmental safety of the population.

The client side of web-based system is deployed for a user. It allows real-time monitoring of harmful emissions in the air.

In the fourth section, on the basis of developed software tools for implementation of methods of structural and parametric identification of IDDM, a complex of interval models of atmospheric pollution processes by harmful emissions of motorvehicles has been built.

The developed information technology, based on the methods of structural and parametric identification, makes it possible to solve the problem of establishing of daily cycle of concentrations of harmful motorvehicle emissions

taking into account the influence of various weather factors, as well as the traffic flow intensity.

Further, the complex of models for prediction of dynamics of harmful substances is considered in the chapter. Complex of mathematical models of different harmful emissions are represented. Also, the results of their application on the example of Ternopil city crossroads are given as well as the results of their verification.

The result of application of input data pre-processing based on the cluster analysis for computational complexity reduction is represented further in the final section of the chapter.

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

## PUBLICATION LIST BY THE DISSERTATION SUBJECT

*Publications in which the main scientific results of the dissertation has been published:*

1. Dyvak M., Stakhiv P., Pukas A., Voytyuk I., Porplytsya N., Maslyiak Y. Interval model of dynamics of dispersion of harmful pollution from vehicular traffic // Journal of Applied Computer Science. 2016. Vol. 24, № 3. P. 49-60.
2. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyak Y., Shynkaryk M. Method of parametric identification for interval discrete dynamic models and the computational scheme of its implementation // Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. 2018. Vol. 689. P. 101-112.
3. Dyvak M.P, Porplytsya N.P., Maslyiak Y.B., Pukas A.V., Melnyk A.M. Method of identification of models of objects with distributed parameters and spatially distributed control based on interval data analysis // Radioelectronics, informatics, control. 2017. № 2. P. 150-159.
4. Dyvak M.P, Maslyiak Y.B., Pukas A.V., Porplytsya N.P., Voytyuk I.F., Tymchyshyn V.S. Architecture of the environmental monitoring system and example of its application for modeling of concentrations of harmful motorvehicle emissions // Inductive modeling of complex systems: col. of sci. works Kyiv, 2017. Vol. 9. P. 69-84.
5. Maslyiak Y.B. Method of modeling of distribution of harmful motorvehicle emissions using clustering and interval data analysis // Scientific works of Donetsk National Technical University. Series: Informatics, Cybernetics and Computing Machines. 2018. № 1 (26). P. 34-40.

*Publications certifying the approbation of the dissertation materials:*

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

7. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Kasatkina N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control // Proc. Of the 14th Intern. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017). 2017. P. 50-54.

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

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

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

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

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

13. Maslyiak Y.B. Dynamic model of power generation on "Topolky" SHEPS // Advanced Computer Information Technologies: Proceedings of IV All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students. 2014. P. 29-30.

14. Maslyiak Y.B. Imitation model for envistigation of distribution of drywall humidity under different temperature fields of its drying process // All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students: Proceedings of VI All-Ukrainian school-seminar of young scientists and students (ACIT'2016). 2016. P. 25-26.

15. Maslyiak Y.B., Zayets V.O. An approach to building of mathematical model of atmosphere pollution by motorvehicles depending on traffic flow intensity // Advanced Computer Information Technologies: Proceedings of All-Ukrainian conference with International participation (ACIT'2017). 2017. P. 231-232.

*Publications additionally reflecting the scientific results of the dissertation:*

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

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

## ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ .....	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	22
ВСТУП .....	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ ТА МЕТОДІВ ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ.....	31
1.1. Аналіз методів математичного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.....	33
1.2. Інтервальні дискретні динамічні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту на основі різницевих рівнянь та методи їх параметричної ідентифікації.....	38
1.3. Методи структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей .....	45
1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження.....	54
Висновки до розділу 1 .....	59
РОЗДІЛ 2. УДОСКОНАЛЕНИЙ ЗА КРИТЕРІЄМ ЧАСОВОЇ СКЛАДНОСТІ МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ.....	61
2.1. Часова складність методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі ПМБК.....	62
2.2. Метод формування початкової множини структурних елементів на основі кластерного аналізу вибірки інтервальних даних.....	76
2.3. Алгоритм формування початкової множини структурних елементів.....	83
Висновки до розділу 2.....	99



РОЗДІЛ 3. ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ.....	101
3.1. Інформаційна технологія для моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.....	101
3.2. Архітектура програмно-апаратної системи для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту.....	111
3.3. Архітектура програмної системи.....	117
Висновки до розділу 3.....	122
РОЗДІЛ 4. ІНТЕРВАЛЬНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ.....	124
4.1. Моделі динаміки добового циклу концентрацій оксиду вуглецю...	125
4.2. Моделі динаміки добового циклу концентрацій діоксиду азоту....	129
4.3. Уніфікована модель динаміки добового циклу концентрацій діоксиду азоту та часова складність її ідентифікації.....	139
Висновки до розділу 4.....	147
ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	151
Додаток А.....	166
Додаток Б.....	170

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДДМ – дискретна динамічна модель.

ІДДМ – інтервальна дискретна динамічна модель.

ІСНАР – інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь.

ПЗ – програмне забезпечення.

ПМБК – поведінкові моделі бджолої колонії.

## ВСТУП

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

З точки зору теорії систем автомобільний транспорт, як джерело забруднень, слід розглядати як об'єкт з розподіленими параметрами, а для задач екологічного моніторингу важливим є моделювання динаміки забруднень атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. В цьому випадку використовують звичайні диференціальні рівняння. Найбільш ефективні методи для моделювання зазначених процесів наведено у працях таких українських та зарубіжних вчених: Р.А. Бунь, О.В. Громова, Р. Zannetti. Разом з тим, у математичних моделях, які наведено у працях зазначених вчених, необхідно враховувати значну кількість чинників. Зокрема, неоднорідність середовища поширення шкідливих викидів, різні фізичні процеси, такі як провітрюваність, вертикальні та горизонтальні теплові потоки повітря тощо. Це призводить до суттєвого ускладнення математичних моделей. Іншим підходом до математичного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту є індуктивний підхід. У цьому випадку, на основі даних спостережень, будують різницеві рівняння, які є аналогами диференціальних рівнянь. Для побудови цих дискретних рівнянь необхідно розв'язувати задачі їх структурної та параметричної ідентифікації. Найбільш ефективні методи розв'язування цих задач наведено у працях таких українських та зарубіжних вчених: В.С. Степашко, О.Г. Івахненко, Д. Гроп, Я.З. Ципкін, R. Haber, H. Akaike,

L. Ljung, J.P. Norton, E. Vicino, D. Pollard. Проте, зазначені методи орієнтовані на випадки точного представлення результатів спостережень і не враховують невизначеності у вигляді похибок, значення яких часто є обмеженими. В цих випадках доцільно використовувати методи аналізу інтервальних даних, тобто даних з обмеженими за значенням похибками. У результаті отримуємо інтервальні дискретні динамічні моделі (ІДДМ), які описують динаміку забруднень.

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

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

Виходячи із вище зазначеного, актуальною є науково-прикладна задача розвитку методів структурної ідентифікації ІДДМ у вигляді різницевих

рівнянь, а також засобів їх реалізації, інтегрованих в єдине середовище для математичного та комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в умовах використання інтервальних даних, отриманих за допомогою сенсорів для вимірювання концентрацій шкідливих викидів.

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

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

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

Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено такі завдання:

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

ідентифікації математичних моделей у вигляді різницевих рівнянь для моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту;

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

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

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

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

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

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

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

викидами автотранспорту використано методи теорії ідентифікації та інтервального аналізу. Для створення програмного забезпечення використано об'єктно-орієнтований підхід.

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

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

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

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

**Практичне значення одержаних результатів.** На основі розробленої інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту створено програмно-апаратну систему для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту. Основними компонентами архітектури створеної системи є мобільні та стаціонарні пункти для вимірювання концентрацій шкідливих

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

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

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, автором: [16] – розроблено ІДДМ денного циклу оксиду вуглецю; [11] – проаналізовано обчислювальну схему реалізації методу параметричної ідентифікації ІДДМ; [68] – проаналізовано проблеми методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії; [67] – запропоновано та обґрунтовано архітектуру системи екологічного моніторингу; [7] – проаналізовано вплив додаткових чинників ІДДМ на ускладнення процедури ідентифікації; [12] – запропоновано модифікацію методу структурної ідентифікації на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії; [14] – запропоновано модифікований метод кластерного аналізу на основі алгоритму субтрактивної кластеризації з модифікованою процедурою обрання радіусу кластера; [30] – запропоновано та обґрунтовано елементи інформаційної технології для комп'ютерного



моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та архітектуру програмної системи; [13] – удосконалено схему реалізації методу структурної ідентифікації; [8] – розроблено інформаційну технологію для моделювання процесів забруднення атмосфери автотранспортом; [9] – запропоновано модифікований метод субтрактивної кластеризації; [87] – розроблено ІДДМ забруднення атмосфери автотранспортом; [6] – модифіковано метод кластерного та інтервального аналізу в умовах неоднорідної вибірки даних; [10] – встановлено взаємозв'язок між інтенсивністю автотранспортних потоків та рівнем концентрацій шкідливих викидів.

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

- 13-й та 14-й міжнародних конференціях “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” TCSET (Львів–Славське, 2016, 2018.);
- 12-й та 13-й міжнародних науково-технічних конференціях “Computer Science and Information Technologies” CSIT (Львів, 2017, 2018);
- 14-й та 15-й міжнародних конференціях “The Experience of Designing and Application of CAD Systems” CADSM (Львів–Поляна, 2017, 2019);
- 18-й міжнародній конференції “Computational Problems of Electrical Engineering” CPEE (Кутна Гора, Чеська Республіка, 2017);
- 14-й міжнародній конференції “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH (Львів–Поляна, 2018);
- 1-й науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль, 2011);
- 4-й, 6-й Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів та 7-й Всеукраїнській конференції з міжнародною участю

“Advanced Computer Information Technology” ACIT (Тернопіль, 2014, 2016, 2017);

- міжнародній конференції “Advanced Computer Information Technology” ACIT (Чеське Будейовіце, Чеська Республіка, 2018); наукових семінарах кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2015-2019 рр.).

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

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

## РОЗДІЛ 1

# АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ ТА МЕТОДІВ ЇХ ІДЕНТИФІКАЦІЇ

Погіршення екологічної ситуації є однією з основних проблем великих міст [1, 3]. Основними джерелами забруднень довкілля міста шкідливими викидами є промисловість та автомобільний транспорт. Останнім часом частка забруднень автотранспортом збільшується внаслідок суттєвого зростання інтенсивності транспортних потоків. Для оцінки забруднення конкретного району міста необхідно врахувати такі фактори, як ступінь провітрювання певних частин міста, погодні умови, тривалість дії шкідливих викидів, а особливо, біосферні процеси поширення забруднень.

Забруднена атмосфера вкрай негативно впливає на здоров'я людини. Викиди потрапляють в легені і викликають проблеми в роботі дихальної системи, важкі алергічні реакції. Разом з кров'ю, небезпечні сполуки разносяться по організму і сильно його «зношують». А деякі елементи здатні навіть провокувати мутацію і переродження клітин.

Це призводить до збільшення захворювань як органів дихання, так і серцево-судинної системи. Майже 20% всіх хвороб органів дихання і 10% хвороб системи кровообігу пов'язані із забрудненням атмосфери. В даний час промислові міста, де зосереджено більше 50% населення, можна віднести до екологічно небезпечних зон, так як вміст забруднюючих речовин в їх атмосфері значно перевищує гранично допустимі концентрації. Велику роль в цьому відіграє і забруднення атмосфери викидами від автотранспорту [1, 3, 17-19], в тому числі, викидами свинцю, який володіє значною токсичністю і здатністю накопичуватися в організмі. Накопичуючись в організмі людини, ці шкідливі викиди можуть стати причиною несприятливих віддалених

наслідків, так як мають мутагенні, канцерогенні, тератогенні та ембріотоксичні властивості.

Причин надмірного забруднення автотранспортом багато, зокрема: неякісне пальне, старі автомобілі, неякісне дорожнє покриття та інше.

Як правило, найбільше забруднення автотранспорт спричиняє у центральних, найбільш густонаселених районах міст. Як результат, від забруднення атмосфери автомобільними викидами страждає здоров'я сотень тисяч жителів кожного великого міста України. Найбільшу небезпеку вихлопні гази представляють для маленьких дітей, оскільки висота автомобільних викидів зазвичай сягає 1 м.

Щоб зменшити шкідливі викиди з вихлопних труб автомобілів, встановлюють фільтри, каталітичні нейтралізатори, використовують добавки до пального без вмісту свинцю, випускають нові автомобілі з низьким рівнем шкідливих викидів, встановлюють газобалонне обладнання, контролюють якість палива, збільшують частку електрифікованого пасажирського транспорту. Рух транспортних засобів організовується так, щоб можна було обійтися без частого перемикавання режимів роботи двигуна.

Отже, бачимо, що кількість та якість автомобілів суттєво впливає на забруднення повітря [37]. Тому необхідно виявити залежність величини забруднення від кількості автотранспорту. Для розв'язування цієї задачі необхідно побудувати математичні моделі [26, 27, 34, 35, 39, 50, 80, 81, 92, 116] динаміки концентрацій забруднень, ґрунтуючись на результатах реальних вимірювань. Такий підхід вимагає розв'язування задач структурної та параметричної ідентифікації зазначених моделей. Проблеми побудови зазначеного класу моделей та проблеми методів їх ідентифікації є предметом аналізу в цьому розділі. Результати досліджень у цьому розділі опубліковано у працях автора [10, 11, 13, 16, 84, 85, 87].

## 1.1. Аналіз методів математичного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту

Джерела викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря традиційно ділять на два типи: стаціонарні джерела викидів та автотранспортні засоби. Проблема викидів від автотранспортних засобів є переважаючою в містах з високою щільністю населення та високим рівнем розвитку і сягає до 80% усіх забруднюючих речовин міста. Забруднюючі речовини, які входять до складу вихлопних газів (табл. 1.1), можуть утворювати смог за певних погодних умов. Також, вони містять оксиди сірки, вуглецю та азоту, які є небезпечними для здоров'я людини.

Таблиця 1.1

Склад вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання [63]

	Бензинові двигуни	Дизельні двигуни
Азот N <sub>2</sub> , %	74—77	76—78
Кисень O <sub>2</sub> , %	0,3—8,0	2,0—18,0
Вода H <sub>2</sub> O (пара), %	3,0—5,5	0,5—4,0
Вуглекислий газ CO <sub>2</sub> , %	0,0—16,0	1,0—10,0
Оксид вуглецю CO, %	0,1—5,0	0,01—0,5
Оксиди азоту NO <sub>x</sub> , %	0,0—0,8	0,0002—0,5
Вуглеводні C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> , %	0,2—3,0	0,09—0,5
Альдегіди, %	0,0—0,2	0,001—0,009
Сажа, г/м <sup>3</sup>	0,0—0,04	0,01—1,1
Бензопірен-3,4, г/м <sup>3</sup>	10—20×10 <sup>-6</sup>	10×10 <sup>-6</sup>

У зв'язку із реформою санітарно-епідеміологічних служб, контроль за цими забрудненнями здійснюють структурні підрозділи новостворених центрів охорони здоров'я в муніципальних органах самоврядування. Методики та періодичність виконання досліджень часто не відповідають

стану розвитку інфраструктури міст та їх завантаженості. Враховуючи такі умови, створення технології, яка дозволить точніше, швидше та ефективніше оцінити інтенсивність джерел забруднення, є досить актуальним завданням. При цьому, важливо оцінити вплив саме автотранспорту, як джерела забруднення довкілля.

Математичне моделювання при цьому є основним інструментом [102, 106, 114, 115, 117], який суттєво знижує витрати на екологічний моніторинг, зокрема, знижує потреби у високовартісних вимірюваннях за допомогою газоаналізаторів.

Для моделювання поширення забруднюючих речовин в атмосфері враховують параметри джерел забруднення та характеристики процесу переносу хімічних речовин в атмосферному повітрі, динаміку різних хімічних реакцій сполук, погодні умови тощо. Чим точнішими будуть дані щодо вказаних характеристик, тим точнішим буде результат моделювання. Хоча, не всі результати спостережень можуть бути достовірними.

Отже, вибір моделі для описування процесу поширення забруднюючих речовин в атмосфері повинен базуватися на врахуванні як умов задачі, так і обсягу наявних (достовірних) вхідних даних для побудови такої моделі.

Моделі поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі розділяють на такі [4, 20, 21, 22, 31, 35, 40, 52, 54-57, 61, 63, 70, 71, 79, 83, 90, 95, 105, 110, 111, 122] типи:

1. Емпірично-статистичні моделі (модель Гаусса та ін.).
2. Статистичні моделі (регресійні та ін.).
3. Моделі турбулентної дифузії (математичної фізики).
4. Математичні моделі у вигляді різницевих рівнянь.

Найбільш поширеними на практиці є такі класи моделей поширення забруднюючих речовин в атмосфері: емпірично-статистичні та статистичні моделі. Для їх використання необхідно, щоб були відомі метеорологічні параметри та характеристики рельєфу. Статистичні моделі, в свою чергу,

розділяють на регресійні та авторегресійні. Їх використовують, зазвичай, для розрахунку середнього ступеня забрудненості атмосферного повітря. Такі моделі є переважно спрощені і не дають можливості забезпечити необхідну точність оцінки стану атмосфери. Проте, їх можна використати для аналізу середньорічного рівня забруднення в місті і з їх допомогою можна визначити необхідність подальшого точнішого екологічного оцінювання вибраної ділянки. Однією з найбільш поширених у світі з-поміж вказаних моделей є модель розсіювання забруднюючих речовин Гаусса [19, 21-23, 31, 54]. Спираючись на цю модель, концентрація забруднюючої речовини визначається за формулою [22]:

$$C(x, y, z) = \frac{QKV}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \cdot \exp\left(-0,5 \frac{y^2}{\sigma_y^2}\right), \quad (1.1)$$

де  $C(x, y, z)$  – концентрація забруднюючої речовини, що викидається, в точці з координатами  $x, y, z$ , мкг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – обсяг викиду речовини, г/с;  $K$  – коефіцієнт перерахунку –  $1 \cdot 10^6$ ;  $V$  – вертикальні умови розсіювання;  $u_s$  – швидкість вітру на ефективній висоті джерела викидів, м/с;  $\sigma_y$  – стандартне відхилення розсіювання по горизонталі, м;  $\sigma_z$  – стандартне відхилення розсіювання по вертикалі, м;  $y$  – бокове відхилення від осі джерела, м.

Проте, застосування такої моделі для моделювання сукупного забруднення автотранспорту є проблемним, оскільки транспорт є розподіленим джерелом забруднення з невідомими для дослідника параметрами. Разом з тим, у цій моделі необхідно враховувати велику кількість чинників, які мають миттєву дію, що не можливо зафіксувати вимірювальними приладами і, відповідно, перевірити. Наприклад, стабільність атмосфери, яка розрізняється, в основному, інтенсивністю вертикального перемішування повітря [38]. Стабільність атмосфери підвищується зі зростанням швидкості вітру і зниженням інтенсивності

сонячного випромінювання. Хмарність впливає по-різному. Вночі її зниження посилює охолодження Землі, а вдень – навпаки. Іншою проблемою застосування такої моделі є урахування підстилаючої поверхні, яка у межах міста є достатньо складною.

Іншим класом цих моделей є авторегресії, які можуть бути лінійними чи нелінійними за параметрами [89]. Такі моделі використовують із урахуванням зміни у часі метеорологічних параметрів, показників забруднення атмосфери, значення яких в поточний момент часу залежить від значень цих показників в попередні моменти часу.

До переваг статистичних методів можна віднести відносно простий математичний апарат та низьку обчислювальну складність. З метою уточнення вихідних даних та підвищення репрезентативності результатів статистичних моделей можна ввести граничні умови. Такі граничні умови будуть специфічними для кожної конкретної задачі прогнозування поширення шкідливих речовин в атмосфері.

Недоліком вказаних методів є великі значення похибок при довгострокових прогнозах внаслідок значних відхилень всередині вибірки даних та нестационарності процесу.

Третім класом серед зазначених моделей є турбулентно-дифузійні моделі поширення забруднень в приземистому шарі атмосфери. Вказані моделі, з однієї сторони, базуються на апріорній інформації у вигляді рівнянь турбулентного переносу шкідливих речовин і припущеннях про незмінні швидкість вітру та поле коефіцієнта турбулентної дифузії в межах території, для якої здійснюється прогнозування. З іншої сторони, такі моделі базуються на супутному прогнозі оперативних даних про концентрації забруднюючих речовин в деяких опорних точках. У загальному вигляді задача прогнозування забруднення атмосфери математично може бути задана задачею розв'язання диференціального рівняння при певних початкових і граничних умовах [62]:



$$\frac{\partial q}{\partial t} + \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 u_i \frac{\partial}{\partial x_i} K_i \frac{\partial q}{\partial x_i} - \alpha q \quad (1.2)$$

де  $q$  – концентрація забруднюючої речовини;  $t$  – час;  $x_i$  – координати ( $i=\overline{1,3}$ ) уздовж однієї із трьох осей.

Рівняння (1.2) описує просторовий розподіл середніх концентрацій, а також їхні зміни у часі. Проте, для забезпечення точності таких моделей необхідно врахування значної кількості чинників, турбулентних процесів у атмосфері. До того, невідомими є ряд коефіцієнтів у цій моделі:  $u_i$ ,  $K_i$  – складові середньої швидкості переміщення забруднюючих речовин і коефіцієнта обміну, що відносяться до напрямку осі  $x_i$  ( $i=\overline{1,3}$ );  $\alpha$  – коефіцієнт, що визначає зміну концентрації за рахунок перетворення домішок під дією різних процесів. Іншим недоліком, розглянутого типу моделей є складність урахування інтенсивності джерел концентрацій для такого розподіленого об'єкта, яким є автотранспорт. З іншого боку, така математична модель є диференціальним рівнянням в частинних похідних. Тому для її застосування необхідно використовувати чисельні методи. Звідси витікає просте рішення, що замість запису складного диференціального рівняння і подальшої його дискретизації виглядає доцільним отримання різницевого рівняння з невідомими на початку структурою та параметрами, та їх налаштування з використанням вибірки даних.

Зазначені рівняння мають переваги вище розглянутих другого (авторегресійних) та третього класів (турбулентно-дифузійних) моделей.

Розглянемо їх детальніше у наступному підрозділі.

## 1.2. Інтервальні дискретні динамічні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту на основі різницевих рівнянь та методи їх параметричної ідентифікації

Розглянуті у попередньому підрозділі математичні моделі динаміки та поширення шкідливих викидів автотранспорту у вигляді диференціальних рівнянь є достатньо складними для налаштування, характеризуються великими значеннями похибок при довгостроковому прогнозі та вимагають складних обчислювальних процедур для їх розв'язування. Тому, доцільно використовувати їх різницеві аналоги, побудовані на основі реальних вимірювань концентрацій шкідливих викидів, а також параметрів середовища їх динаміки. Варто зазначити, що точність таких даних може бути низькою, відносна похибка вимірювань може сягати 50%. З іншого боку, однією із задач екологічного моніторингу є виявлення такої концентрації шкідливої речовини, значення якої перевищує гранично допустиму, встановлену санітарними чи екологічними нормами. З огляду на це, достатньо побудувати математичну модель із точністю, яка відповідає точності вимірювального експерименту. При цьому, дані експерименту доцільно представляти у вигляді інтервалів [28, 33, 68, 118] можливих значень характеристики, що моделюється:

$$[z_k^-; z_k^+], \quad k = 1, \dots, K, \quad (1.3)$$

де  $z_k^-, z_k^+$  – нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірюваної концентрації шкідливих речовин в момент часу  $k = 1, \dots, K$ , відповідно.

Зауважимо, що у вимірювальному експерименті нижню та верхню межі можемо встановити за відносною похибкою вимірювального пристрою:

$z_k^- = z_k - z_k \cdot \varepsilon$  та  $z_k^+ = z_k + z_k \cdot \varepsilon$ , де  $z_k$  – виміряне значення концентрації шкідливої речовини;  $\varepsilon$  – відносна похибка вимірювань.

Математичну модель процесу динаміки забруднення в точці у загальному випадку представлятимемо у вигляді такого різницевого рівняння (PP) [7, 41, 42, 45, 58, 69]:

$$v_k = F(v_{k-d}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k} \cdot \vec{g}), \quad k = d, \dots, K, \quad (1.4)$$

де  $F(\bullet)$  – деяке нелінійне перетворення;

$v_k$  – модельована характеристика в момент (період) часу  $k = d, \dots, K$ ;

$\vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$  – відомий вектор вхідних змінних (керувань) з порядковим номером  $p = 1, \dots, P$  в момент (період) часу  $k = d, \dots, K$ ;

$d$  – порядок різницевого рівняння;

$\vec{g}$  – невідомий вектор параметрів різницевого рівняння.

Вираз для лінійного за параметрами різницевого рівняння матиме такий вигляд [7, 41, 58]:

$$v_k = \vec{f}^T(v_{k-d}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \vec{g}, \quad k = d, \dots, K \quad (1.5)$$

де  $\vec{f}^T(\bullet)$  – вектор базисних функцій, у загальному випадку нелінійних, за допомогою яких виконують перетворення значень модельованої характеристики, а також вхідних змінних у дискретні моменти (періоди) часу.

Таким чином, суть основного підходу до побудови дискретної динамічної моделі забруднення шкідливими речовинами автотранспорту в точці полягає у використанні теорії індуктивного моделювання, розкритої у працях Івахненка О.Г. [72-78]. Її основна ідея полягає у визначенні деякої різницевої схеми шляхом її налаштування у спосіб узгодження з даними експерименту. Саму різницеву схему, яка, фактично, перетворює значення вхідних змінних у значення вихідних, називають різницеvim рівнянням, а

процес налаштування цієї схеми – структурно-параметричною ідентифікацією [7, 10-12, 58, 59, 65, 66, 68, 96, 97, 99, 108].

У результаті виконання процедури структурної ідентифікації встановлюємо різницеву обчислювальну схему, зокрема: вектор базисних функцій  $\vec{f}^T(\bullet)$ ; набори та розмірність векторів вхідних змінних (керувань)  $\vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$ ; порядок різницевої схеми, який, як відомо, є еквівалентним порядку диференціального рівняння – аналогу різницевої схеми. Для реалізації різницевої схеми також необхідно встановити значення компонент вектора параметрів  $\vec{g}$  і задати початкові умови, тобто значення кожного елементу із набору  $v_{k-d}, \dots, v_{k-1}, \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$  для певних дискрет, як правило – початкових. Для задачі параметричної ідентифікації структуру різницевого рівняння вважаємо відомою.

На основі вимоги забезпечення точності математичної моделі в межах точності вимірювального експерименту – для математичної моделі процесів динаміки концентрацій забруднюючих речовин в задачі екологічного моніторингу – умови узгодження експериментальних даних, представлених в інтервальному вигляді (1.3), із даними, отриманими на основі математичної моделі у вигляді РР (1.5), можемо сформулювати у такому вигляді:

$$v_k \in [z_k^-, z_k^+], \forall k = 1, \dots, K. \quad (1.6)$$

Умови (1.6) забезпечують отримання модельованої характеристики процесу в межах інтервалів можливих значень характеристики, отриманих експериментально.

Припустимо, що вектор оцінок  $\hat{\vec{g}}$  параметрів  $\vec{g}$  у різницевому рівнянні (1.5) отримано на основі аналізу інтервальних даних. Підставляючи вектор оцінок параметрів  $\hat{\vec{g}}$  різницевого рівняння замість вектора їх істинних значень  $\vec{g}$  у вираз (1.5) разом із заданими початковими інтервальними

значеннями кожного елементу із набору  $[\hat{v}_0], \dots, [\hat{v}_{k-1}]$  та заданими векторами вхідних змінних  $\vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$ , отримаємо інтервальну оцінку модельованої характеристики  $[\hat{v}_k]$  у момент (період) часу  $k=d, \dots, K$ :

$$[\hat{v}_k] = [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \vec{f}^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \vec{g}, \quad k = d, \dots, K, \quad (1.7)$$

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

Отже, динаміку концентрацій шкідливих викидів у конкретній точці для задачі екологічного моніторингу описуватимемо інтервальним різницеvim рівнянням у загальному вигляді (1.7). Враховуючи, що усі обчислення у виразі (1.7) проводять із використанням інтервальної арифметики, дискретну динамічну модель (ДДМ) (1.7) будемо називати інтервальною дискретною динамічною моделлю (ІДДМ).

Тепер математично сформулюємо задачу параметричної ідентифікації ІДДМ на основі аналізу інтервальних даних.

Умови узгодження інтервальних даних (1.3) із результатами моделювання, отриманими на основі моделі у вигляді ІДДМ (1.7), сформулюємо у такому вигляді:

$$[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] \subset [z_k^-; z_k^+], \quad \forall k = 1, \dots, K. \quad (1.8)$$

Умови (1.8) забезпечують отримання інтервальних оцінок модельованої характеристики процесу в межах похибок вимірювань, тобто, в межах числових інтервалів, отриманих експериментально.

Підставимо у виразі (1.8) замість інтервальних оцінок  $[\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+]$  вираз для їхнього обчислення на основі ІДДМ (1.7) разом із урахуванням заданих початкових числових інтервалів кожного елементу із набору

$$[\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [z_0^-; z_0^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \subseteq [z_{k-1}^-; z_{k-1}^+] \quad (1.9)$$

та заданими векторами вхідних змінних  $\bar{u}_{p,0}, \dots, \bar{u}_{p,k}$ . У результаті отримаємо таку інтервальну систему нелінійних алгебричних рівнянь (ІСНАР):

$$\begin{cases} [\hat{v}_0^-; \hat{v}_0^+] \subseteq [z_0^-; z_0^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+] \subseteq [z_{k-1}^-; z_{k-1}^+]; \\ [\hat{v}_k^-; \hat{v}_k^+] = \bar{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-; \hat{v}_{k-d}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \bar{u}_{p,0}, \dots, \bar{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}; \\ z_k^- \leq \bar{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-; \hat{v}_{k-d}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \bar{u}_{p,0}, \dots, \bar{u}_{p,k}) \cdot \hat{g} \leq z_k^+; \\ k = d, \dots, K. \end{cases} \quad (1.10)$$

Звідси, задача ідентифікації параметрів ІДДМ (1.7) за умов (1.8) є задачею розв'язування ІСНАР у вигляді (1.10).

Слід зауважити, що ІСНАР (1.10) формуємо рекурентно на основі послідовного нелінійного перетворення базисними функціями на дискретній сітці:

$$z_k^- \leq \bar{f}^T([\hat{v}_{k-d}^-; \hat{v}_{k-d}^+], \dots, [\hat{v}_{k-1}^-; \hat{v}_{k-1}^+], \bar{u}_{p,0}, \dots, \bar{u}_{p,k}) \cdot \hat{g} \leq z_k^+. \quad (1.11)$$

Отже, загальна кількість інтервальних алгебричних рівнянь дорівнює кількості часових дискрет  $K$ . Як бачимо з (1.11), отримане інтервальне рівняння (двостороння нерівність) є нелінійним відносно вектора  $\hat{g}$  параметрів ІДДМ. Складність розв'язання такої системи залежить як від кількості параметрів, так і від кількості дискрет.

За своєю суттю, така задача є NP-складною. Тому, для її розв'язування (задачі параметричної ідентифікації моделі у вигляді ІДДМ) використовують метод випадкового пошуку хоча б одного розв'язку ІСНАР.

Розглянемо загальні особливості існуючих обчислювальних схем для розв'язування цієї задачі [11, 15].

В основу зазначених обчислювальних схем реалізації методу ідентифікації параметрів ІДДМ покладено процедури, які складаються з чотирьох основних кроків:

Крок 1. Задання початкових умов у вигляді (1.9).

Крок 2. Задання початкової  $\hat{g}_0$  чи формування випадковим чином поточної  $\hat{g}_l$  оцінки вектора параметрів РР:

$$\hat{g}_l = \hat{g}_{l-1} + r \cdot \vec{\xi}_l, \quad (1.2)$$

згенеровані відповідно до певного закону розподілу випадкових чисел на інтервалі  $[-1;1]$ .

Крок 3. Обчислення інтервальних оцінок модельованої характеристики  $[\hat{v}_k]$  в часових дискретах  $k=d, \dots, K$  із застосуванням рекурентної схеми (1.10).

Крок 4. Перевірка «якості»  $\delta(\hat{g}_l)$  поточного наближення оцінки вектора параметрів  $\hat{g}$  ІДДМ.

На цьому кроці приймаємо, що «якість» наближення буде тим вищою, чим ближче буде прогнозований коридор (побудований на основі даного наближення вектора параметрів) до отриманого експериментально. Якість наближення у відомих методах визначають у вигляді різниці центрів найбільш віддалених між собою прогнозного та експериментального інтервалів – у випадку, коли ці інтервали не перетинаються. Таку оцінку називають «грубою». Якщо ж прогнозований та експериментальний інтервали для усіх дискрет перетинаються, то якість наближення параметрів ІДДМ визначають найменшою шириною перетину серед прогнозних та експериментальних інтервалів. Таку оцінку параметрів називають уточненою. Формально обидві умови записують у такому вигляді, відповідно:

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{k=d, \dots, K} \{mid([\hat{v}_k]) - mid([z_k])\}, \text{ якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k] = \emptyset, \exists k = d, \dots, K; \quad (1.13)$$

$$\delta(\hat{g}_l) = \max_{k=d, \dots, K} \{wid([\hat{v}_k]) - wid([\hat{v}_k] \cap [z_k])\}, \text{ якщо } [\hat{v}_k] \cap [z_k] \neq \emptyset, \forall k = d, \dots, K, \quad (1.14)$$

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

Якщо обчислене значення «якості»  $\delta(\hat{g}_l)$  поточного наближення оцінки  $\hat{g}_l$  вектора параметрів ІДДМ на поточній ітерації дорівнює нулю ( $\delta(\hat{g}_l) = 0$ ), то процедура вважається завершеною, у протилежному випадку переходимо до кроку 2.

Застосування процедури випадкового пошуку для розв'язування задачі параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді задачі мінімізації функції мети

$$\delta(\hat{g}) \xrightarrow{\hat{g}} \min \quad (1.15)$$

забезпечує знаходження послідовності оцінок параметрів  $\hat{g}_1, \hat{g}_2, \dots, \hat{g}_l$  і відповідної послідовності значень функції мети  $\delta(\hat{g}_1), \delta(\hat{g}_2), \dots, \delta(\hat{g}_l)$ , обчислених за виразом (1.13) або (1.14). При цьому, процедуру випадкового пошуку необхідно організувати у такий спосіб, щоб забезпечити умови зменшення значень функції мети  $\delta(\hat{g}_1) > \delta(\hat{g}_2) > \dots > \delta(\hat{g}_l) > \dots > \delta(\hat{g}_{l=L} = \hat{g} \in \Omega)$  за скінченну та якомога меншу кількість ітерацій  $l=L$ .

Для розв'язування задачі параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді задачі оптимізації (1.15) у праці розглянуто різні процедури формування випадкового вектора (1.12) на кроці 2 [91]: випадковий пошук із лінійною тактикою; випадковий пошук по найкращій спробі; випадковий пошук із використанням направляючого конуса; випадковий пошук із адаптацією розподілу випадкового кроку.



У працях [69, 91] обґрунтовано, що найбільш ефективним з точки зору обчислювальної складності є випадковий пошук із використанням направляючого конуса, який і буде прийнятий за основу для розв'язування задачі параметричної ідентифікації ІДДМ у дисертаційній роботі.

Підсумовуючи проведений аналіз методів параметричної ідентифікації ІДДМ у формі різницевих рівнянь, варто зазначити, що ці методи є складними для реалізації користувачем і вимагають створення спеціальних засобів комп'ютерного моделювання динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

### 1.3. Методи структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей

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

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\}, \quad (1.16)$$

де  $\lambda_s$  – набір елементів поточної структури ІДДМ;

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

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

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

$$[v_k(\lambda_0)] = [f_1^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_1^0 + [f_2^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_2^0 + \dots + [f_{m_0}^0(\bullet)] \cdot \hat{g}_{m_0}^0, \quad (1.17)$$

для якої виконувалися б умови (1.8). Тобто, було б забезпечено належність інтервальних оцінок прогнозованих значень до інтервалів вимірних значень для усіх дискрет.

Для оцінки якості поточної структури ІДДМ використовуємо значення показника  $\delta(\lambda_s)$ , який кількісно виражає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (1.8). Показник  $\delta(\lambda_s)$  називатимемо функцією мети оптимізаційної задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

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

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=d, \dots, K} \left\{ \left| \text{mid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}^s) - \text{mid}([z_k]) \right| \right\}, \quad (1.18)$$

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

$$\delta(\lambda_s) = \max_{k=d, \dots, K} \left\{ \text{wid}(\vec{f}_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}^s) - \text{wid}((\vec{f}_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], \vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}) \cdot \hat{g}^s) \cap [z_k]) \right\}, \quad (1.19)$$

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

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

$$\delta(\lambda_s) \xrightarrow{\hat{g}^s, \vec{f}_s(\bullet)} \min, m_s \in [I_{\min}; I_{\max}], \vec{f}_s(\bullet) \in F. \quad (1.20)$$

Важливо зазначити, що задача структурної ідентифікації ІДДМ полягає у багаторазовому формуванні набору структурних елементів та розв'язуванні задачі параметричної ідентифікації, тобто, розв'язуванні ІСНАР (1.10).

Розглянемо відомі методи розв'язування цієї задачі.

**Метод редукції структури математичної моделі.** Вказаний метод базується на заданні початкової структури математичної моделі з подальшим послідовним вилученням її незначущих елементів [64]. Математичну модель у вигляді різницевого рівняння досліджують на можливість її спрощення шляхом вилучення її окремих структурних елементів [88]. Для того, щоб виявити незначущі структурні елементи математичної моделі, використовують деякі критерії [64]. Незначущі структурні елементи моделі означають такі елементи, вилучення яких призведе до зменшення значення функції мети (1.20). При цьому, кожен раз при вилученні незначущих параметрів необхідно проводити параметричну ідентифікацію ІДДМ [88]. Процедуру редукції здійснюють до тих пір, поки буде забезпечено обнулення функції мети у задачі (1.20). При застосуванні методу редукції математичної моделі адекватною вважають таку модель, для якої ІСНАР (1.10) виявиться сумісною.

Однак, метод редукції характеризується рядом недоліків. А саме, порядок та степінь різницевого рівняння є невідомі, а їх необхідно визначити для формування початкової структури математичної моделі. Це може призвести до того, що знаходження розв'язку задачі структурної ідентифікації виявиться неможливим, або призведе до суттєвого збільшення обчислювальної складності. Ще одним недоліком даного методу є те, що при вилученні структурних елементів математичної моделі не враховують їх взаємодію з іншими компонентами моделі [64]. Це, в свою чергу, може призвести до втрати значущих структурних елементів ІДДМ.

**Метод «нарощування» структури математичної моделі.** Вказаний метод базується на формуванні початкової структури математичної моделі в простому вигляді [64]. Зазвичай, структуру математичної моделі задають у вигляді РР першого порядку, яке містить структурні елементи не вище другого степеня. Далі структуру математичної моделі ускладнюють у спосіб додавання нових структурних елементів, проводячи ідентифікацію

параметрів. Здійснення такого ускладнення структури математичної моделі повторюють доти, доки буде забезпечено обнулення значення функції мети у виразі (1.20), що, своєю чергою, означає забезпечення сумісності ІСНАР (1.10).

До очевидних недоліків такого підходу можна віднести переускладнення структури такої моделі з причини неможливості виявлення важливих структурних елементів [64] та високу обчислювальну складність його реалізації.

**Метод групового урахування аргументів (МГУА).** Автором вказаного методу є видатний вчений українського походження О.Г. Івахненко [75]. МГУА [49, 51, 82, 93, 94, 107, 112] є індуктивним методом, який передбачає пошук математичної моделі на основі даних експерименту, які були отримані в умовах неповноти інформації. Він є одним з найефективніших методів структурно-параметричної ідентифікації математичних моделей і ґрунтується на такому твердженні: математична модель має бути тим простішою, чим менш точні дані, на основі яких вона будується [75]. В основу МГУА покладено проведення багаторядної селекції моделей-претендентів за допомогою зовнішніх критеріїв та налаштування їх параметрів на основі внутрішніх критеріїв.

Оцінювання «якості» моделей-претендентів у МГУА, як уже зазначалося, здійснюють на основі зовнішніх критеріїв. Вибірку результатів для застосування таких зовнішніх критеріїв розділяють на дві або більше частин у таких можливих співвідношеннях: наприклад, 50% та 50% чи 40%, 40%, та 20%. При цьому отримують початкову та контрольну вибірки. На основі першої здійснюють пошук параметрів моделі, а на основі останньої – вибір «кращої» моделі-претендента [113].

Враховуючи той факт, що МГУА ґрунтується на таких зовнішніх критеріях, як, наприклад, критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними (які є не

придатними у випадку, коли експериментальні дані подано в інтервальному вигляді), метод не забезпечує побудови моделей із гарантованими прогностичними властивостями.

Якщо ж здійснювати ідентифікацію математичної моделі з гарантованими прогностичними властивостями та, водночас, застосовувати принципи МГУА, то це призведе до необхідності багаторазового розв'язування задачі параметричної ідентифікації, тобто розв'язування ІСНАР (1.10). З огляду на це, метод структурної ідентифікації, побудований на основі наведеного підходу, буде характеризуватися високою обчислювальною складністю.

### *Генетичні алгоритми (ГА)*

Іншими відомими методами та алгоритмами для розв'язування вказаної задачі є еволюційні алгоритми. Зокрема, генетичні алгоритми [58, 100, 119, 60], які ґрунтуються на еволюційних принципах спадковості, мінливості і природного відбору. Генетичний алгоритм працює з популяцією особин, в хромосомі (генотип) кожної з яких закодовано можливий розв'язок задачі (фенотип). В контексті задачі структурної ідентифікації інтервального РР основні терміни ГА означають наступне: ген – структурний елемент (базисна функція); хромосома – поточна структура інтервального різницевого рівняння (ІРР); популяція – множина структур ІРР на поточній ітерації генетичного алгоритму [58]. В загальному випадку, для реалізації ГА необхідно виконати процедуру, яка складається з послідовності таких етапів [119]: кодування інформації і формування початкової популяції; оцінювання популяції (на основі виразів (1.18) чи (1.19)); селекція (за критерієм (1.20)); схрещування і формування нового покоління з відібраних особин; мутація – для внесення випадкових змін в особини.

Основним недоліком генетичних алгоритмів при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації ІДДМ є надзвичайно висока обчислювальна складність, яка спричинена лінійністю покриття простору розв'язків –

наборів можливих структур. Також ці методи мають низьку ступінь самоадаптації та самоорганізації.

Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації ІДДМ застосовують методи та алгоритми, які ґрунтуються на основі самоорганізації мультиагентних систем. Одним з таких методів є метод, який базується на поведінковій моделі бджолоїної колонії (ПМБК) [2, 24, 25, 42-44, 47, 98]. Тому, аналіз цих методів та виявлення можливості їх застосування для розв'язування задачі структурної ідентифікації (які, з математичної точки зору, є задачами дискретної оптимізації) є важливим завданням.

***Метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії.***

Бджоли – це високоорганізований вид комах. Йому притаманна властивість спільно організовувати та ефективно здійснювати такі види діяльності, як пошук їжі, пошук житла тощо. Відомо, що колонія медоносних бджіл функціонує за принципом розподілу обов'язків відповідно до приналежності тієї чи іншої особини до певної групи/касти в колонії.

У живій природі із вулика спочатку вилітають бджоли-розвідники у певній кількості для пошуку нових джерел нектару. При цьому, напрямок польоту – випадковий. Після повернення бджоли-розвідники інформують інших дорослих робочих бджіл про знайдені ними джерела нектару. Інформація у вулику передається у спосіб здійснення «танцю». Таким чином решті бджіл повідомляється про напрямок та відстань до джерела їжі, а також про кількість знайденого нектару. Потім бджоли здійснюють порівняння цінності нових джерел нектару за відстанню від вулика та якістю їжі з іншими джерелами нектару. Чим якісніше джерело їжі, тим більше бджіл туди летітиме. Важливо зазначити, що мобілізовані бджоли на основі інформації з «танцю» дістаються лише в окіл джерела нектару, а далі бджоли застосовують інший спосіб пошуку: за кольором та запахом. Про це свідчать результати експериментів, що описані у таких статтях [2, 47, 98, 99].

Після знаходження мобілізованими бджолами розташування джерела їжі, вони збирають нектар та повертаються до вулика, де також можуть почати «танцювати». Ділянки з вичерпаними джерелами нектару медоносні бджоли покидають. Бджоли-розвідники знову летять у пошуку нових джерел їжі. Потім описаний процес повторюється знову.

На основі розглянутого біологічного підґрунтя організації колективного пошуку та забезпечення їжею колонії медоносних бджіл виділимо основні компоненти поведінкової моделі та встановимо відповідні зв'язки між ними.

Усіх бджіл колонії, які зайняті пошуком джерел їжі, умовно поділяють на три групи: *робочі бджоли* – проводять пошук їжі в околі вже відомих джерел нектару та інформують бджіл-дослідників про якість досліджуваних джерел; *бджоли-дослідники* – знаходяться у вулику, де отримують інформацію від робочих бджіл, після чого вилітають для пошуків нектару в окіл знайдених робочими бджолами джерел; *бджоли-розвідники* – здійснюють пошук нових джерел нектару випадковим чином.

Розглянемо детальніше процедури та модулі поведінкової моделі бджолоїної колонії. Механізм прийняття рішення робочою бджолою про те, чи досліджуване нею джерело є вичерпаним, реалізується процедурою виявлення вичерпаних джерел нектару. Якщо відоме джерело ще не вичерпане, то далі відбувається виклик процедури дослідження околу відомого джерела нектару. Ця процедура реалізовує політ бджоли в окіл відомого джерела нектару із подальшим викликом процедури визначення його якості та процедури запам'ятовування його якості й координат. Процедура вибору відомого джерела нектару бджолами-дослідниками означає те, що вони летять в окіл відомого джерела нектару, обраного на основі інформації, отриманої із «танців» робочих бджіл.

Насправді, біологічні механізми, якими бджола-дослідник керується при виборі тої робочої бджоли, за якою полетить, досліджені недостатньо.

Однак, вважають, що з математичної точки зору кількість «завербованих» бджіл-дослідників завжди є функцією від якості джерела нектару. Тобто, в окіл «кращих» джерел нектару летить більше бджіл-дослідників, а в окіл «гірших» може не полетіти жодної.

Процедура випадкового пошуку нового джерела нектару реалізовує політ бджіл-розвідників у випадковому напрямку для пошуку нових джерел нектару з подальшим викликом процедури визначення його якості та процедури запам'ятовування його координат і якості. Процедура запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл означає механізм прийняття рішення про те місцезнаходження, якого із джерел нектару потрібно запам'ятати – знайденого в околі чи відомого. Робоча бджола фіксує координати «кращого» джерела нектару. Модуль комунікації та мобільності бджіл колонії забезпечує передачу інформації між бджолами колонії та мобільність бджіл між різними групами. Мобільність бджіл означає можливість переходу бджоли з однієї групи в іншу. Наприклад, якщо робоча бджола прийняла рішення про те, що досліджуване нею джерело нектару є вичерпаним, то вона переходить у групу бджіл-розвідників. Правила прийняття рішень різними групами бджіл визначають кількісні критерії, на основі яких бджоли обирають, яку процедуру виконати наступною.

Тепер доцільно встановити основні аналогії між поведінковою моделлю і основними процедурами методу структурної ідентифікації математичних моделей у вигляді ІДДМ. Зокрема, у контексті задачі структурної ідентифікації ІДДМ, *поведінка бджоли* при виборі місцезнаходження джерела нектару безпосередньо реалізує сам алгоритм синтезу поточної структури ІДДМ; *область пошуку нектару* – множина всіх можливих структур ІДДМ з відомими оцінками компонентів вектора параметрів  $\hat{g}$ ; *оکیل джерела нектару* – множина структур ІДДМ, що можуть бути згенеровані на основі поточної шляхом часткової заміни її структурних



елементів; *координати джерела нектару* – поточна структура ІДДМ  $\lambda_s$ ; *якість джерела нектару* визначається значенням функції мети  $\delta(\lambda_s)$  для поточної структури ІДДМ  $\lambda_s$ , яке задає точність математичної моделі, побудованої на основі поточної структури  $\lambda_s$ .

Спираючись на біологічне підґрунтя, авторами праць [24, 25, 42, 43] розроблено ряд ефективних алгоритмів для пошуку оптимальних структур ІДДМ. Для цього задачу структурної ідентифікації сформульовано як деяку оптимізаційну задачу (1.20), формально представлену у працях [42-44], у якій розв'язком є набір структурних елементів ІДДМ. Розв'язок цієї задачі знаходять на основі маніпулювання координатами джерел нектару, які відображають структурні елементи ІДДМ. Процеси маніпулювання з джерелами нектару (структурними елементами) здійснюють за допомогою уведених математичних перетворень, які побудовані за аналогією з поведінкою бджіл при виборі місцезнаходження джерела нектару.

Разом з тим, уведена послідовність математичних перетворень, які реалізують зазначений метод та його обчислювальна схема відзначаються рядом недоліків, основним із яких є висока обчислювальна складність, причини якої досліджено слабо. Метод також дуже чутливий до якості та повноти сформованої початкової множини структурних елементів, на основі яких будують структуру ІДДМ. При вичерпанні можливостей поточних структур (вичерпання джерел нектару) щодо знаходження адекватної моделі, відома обчислювальна схеми призводить до зациклювання.

Усі зазначені недоліки спонукають до ґрунтовного дослідження часових характеристик методу структурної ідентифікації ІДДМ, який ґрунтується на поведінковій моделі бджолоїної колонії, та до його удосконалення.

Підсумовуючи проведений аналіз методів структурної ідентифікації ІДДМ у формі різницевих рівнянь, варто зазначити, що ці методи є

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

#### **1.4. Постановка задач дисертаційного дослідження**

Таким чином, проведений аналіз показав, що основним джерелом забруднення довкілля міста шкідливими викидами є автомобільний транспорт. Останнім часом частка забруднень автотранспортом збільшується внаслідок суттєвого зростання інтенсивності транспортних потоків. Для оцінки забруднення конкретного району міста необхідно врахування таких факторів, як ступінь провітрювання певних частин міста, погодних умов, тривалості дії шкідливих викидів, а особливо, біосферних процесів поширення забруднень.

Для зменшення негативного впливу автотранспорту на довкілля необхідно розробити систему моніторингу, основою якої є математичні моделі динаміки концентрацій забруднень внаслідок шкідливих викидів у вихлопних газах автотранспорту. Серед існуючих моделей поширення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі виділяють три найбільш поширених типи: емпірично-статистичні (модель Гаусса та ін.); статистичні (регресійні та ін.); моделі турбулентної дифузії (моделі математичної фізики). Застосування моделей першого типу для моделювання сукупного забруднення автотранспорту є проблемним, оскільки транспорт є розподіленим джерелом забруднення з невідомими для дослідника параметрами. До того, у цих моделях необхідно враховувати велику кількість

чинників, які мають миттєву дію, що не можливо зафіксувати вимірювальними приладами і, відповідно, перевірити. Наприклад: стабільність атмосфери, інтенсивність вертикального перемішування повітря та інші.

Недоліком другого виду (статистичних) моделей є великі значення похибок при довгострокових прогнозах внаслідок значних відхилень всередині вибірки даних та нестационарності процесу.

Подібними недоліками, як у моделях першого виду, характеризуються моделі турбулентної дифузії. Окрім цього, іншим недоліком розглянутого типу моделей є складність урахування інтенсивності джерел концентрацій для такого розподіленого об'єкта, яким є автотранспорт. Варто також зазначити, що моделі турбулентної дифузії є диференціальними рівняннями в частинних похідних. Тому, для їх застосування необхідно використовувати чисельні методи. Звідси витікає просте рішення, що замість запису складного диференціального рівняння і подальшої його дискретизації, доцільно отримати різницеве рівняння з невідомими на початку структурою та параметрами, та налаштувати їх з використанням вибірки даних.

Зазначені рівняння мають переваги розглянутих у цьому розділі другого (авторегресійні) та третього класу (турбулентно-дифузійні) моделей.

На основі проведеного аналізу математичних моделей для моделювання процесів забруднення атмосфери вихлопними газами автотранспорту обґрунтовано застосування ІДДМ на основі різницевих рівнянь. Проте, для побудови зазначених моделей необхідним є застосування складних процедур структурної та параметричної ідентифікації на основі вимірювань з межовими значеннями похибок, представлених в інтервальному вигляді.

Для розв'язування задачі параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді задачі оптимізації розглянуто різні процедури: випадковий пошук із лінійною тактикою; випадковий пошук по найкращій спробі; випадковий пошук із

використанням направляючого конуса; випадковий пошук із адаптацією розподілу випадкового кроку. Спираючись на дослідження цих методів, обґрунтовано, що найбільш ефективним з точки зору обчислювальної складності є випадковий пошук із використанням направляючого конуса, який у дисертаційній роботі прийнято за основу для розв'язування параметричної ідентифікації ІДДМ.

У підсумку аналізу методів параметричної ідентифікації ІДДМ у формі різницевого рівняння, зазначено, що ці методи є складними для реалізації користувачем і вимагають створення спеціальних засобів комп'ютерного моделювання динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

Зроблено постановку задачі структурної ідентифікації ІДДМ у формі різницевого рівняння, які описують динаміку процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. Для розв'язування цієї задачі у вигляді оптимізаційної, проаналізовано спектр методів: редукції структури математичної моделі; «нарощування» структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів (МГУА) та генетичні алгоритми.

Однак, метод редукції характеризується рядом недоліків. А саме, порядок та степінь різницевого рівняння є невідомі, а їх необхідно визначити для формування початкової структури математичної моделі. Це може призвести до того, що знаходження розв'язку задачі структурної ідентифікації виявиться неможливим або призведе до суттєвого збільшення обчислювальної складності. Ще одним недоліком даного методу є те, що при вилученні структурних елементів математичної моделі не враховують їх взаємодію з іншими компонентами моделі. До очевидних недоліків методу «нарощування» структури ІДДМ відносять можливе переускладнення структури математичної моделі через неможливість виявлення важливих структурних елементів математичної моделі та високу обчислювальну складність його реалізації.

Недоліками МГУА є те, що він не забезпечує побудову моделей із гарантованими прогностичними властивостями, оскільки він ґрунтується на таких зовнішніх критеріях, як, наприклад, критерій мінімізації середньоквадратичного відхилення між прогнозованими та експериментальними даними, які є непридатними у випадку, коли експериментальні дані подано в інтервальному вигляді.

Основним недоліком генетичних алгоритмів при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації ІДДМ є надзвичайно висока обчислювальна складність, яка спричинена лінійністю покриття простору розв'язків – наборів можливих структур. Також ці методи мають низьку ступінь самоадаптації та самоорганізації.

Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації ІДДМ застосовують метод, який базується на поведінковій моделі бджолоїної колонії. Разом з тим, існуючий метод та обчислювальна схема його реалізації відзначаються рядом недоліків, основним із яких є висока обчислювальна складність, причини якої досліджено слабо. Метод також дуже чутливий до якості та повноти сформованої початкової множини структурних елементів, на основі яких будують структуру ІДДМ. При вичерпанні можливостей поточних структур (вичерпання джерел нектару) щодо знаходження адекватної моделі, відомі обчислювальні схеми призводять до зациклювання.

Усі зазначені недоліки спонукають до ґрунтовного дослідження часових характеристик методу структурної ідентифікації ІДДМ, який ґрунтується на поведінковій моделі бджолоїної колонії, та до його удосконалення.

У підсумку проведеного аналізу усіх методів структурної ідентифікації ІДДМ у формі різницевих рівнянь, встановлено, що ці методи є складними для реалізації користувачем, містять складні процедури параметричної ідентифікації і вимагають створення інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими

викидами автотранспорту, яка б інтегрувала як методи та засоби отримання даних, їх попереднього аналізу, так і методи і засоби структурної та параметричної ідентифікації для побудови адекватних ІДДМ процесів забруднення атмосфери.

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

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

Для досягнення цієї мети у дисертаційній роботі поставлено такі завдання:

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

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

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

- розробити інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту в

умовах використання інтервальних даних, отриманих за допомогою сенсорів;

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

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

## Висновки до розділу 1

1. Проведено аналіз особливостей існуючих математичних моделей та методів моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту. Встановлено їх чотири поширених типи: емпірично-статистичні (модель Гаусса та ін.); статистичні (регресійні та ін.); моделі турбулентної дифузії (моделі математичної фізики) та математичні моделі у вигляді різницевих рівнянь із налаштуванням на основі результатів експерименту. На основі проведеного аналізу математичних моделей, для моделювання процесів забруднення атмосфери вихлопними газами автотранспорту обґрунтовано застосування ІДДМ на основі різницевих рівнянь і показано, що для їх налаштування необхідним є застосування складних процедур структурної та параметричної ідентифікації на основі вимірювань з межовими значеннями похибок. Результати вимірювань представлені в інтервальному вигляді.

2. Досліджено задачу параметричної ідентифікації ІДДМ у вигляді задачі оптимізації. Розглянуто існуючі методи її розв'язування та встановлено, що найбільш ефективним з точки зору обчислювальної складності є випадковий пошук із використанням направляючого конуса, який прийнято за основу для розв'язування параметричної ідентифікації ІДДМ. Встановлено, що методи параметричної ідентифікації ІДДМ у формі

різницевих рівнянь є NP-складними та непридатними для застосування користувачем без створення спеціальних засобів для комп'ютерного моделювання динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

3. Досліджено задачу структурної ідентифікації ІДДМ у вигляді задачі дискретної нелінійної оптимізації. Встановлено основні методи розв'язування цієї задачі: редукція структури математичної моделі; «наращування» структури математичної моделі; метод групового урахування аргументів; генетичні алгоритми та метод, який базується на поведінкових моделях бджолоїної колонії. У підсумку, цей метод обґрунтовано, як базовий, в дисертаційній роботі.

4. Аналіз властивостей методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі ПМБК показав ряд його недоліків: висока обчислювальна складність, причини якої досліджено слабо; чутливість до якості та повноти сформованої початкової множини структурних елементів, на основі яких будують структуру ІДДМ. Зазначені недоліки спонукають до ґрунтовного дослідження часових характеристик зазначеного методу структурної ідентифікації ІДДМ, та до його удосконалення.

5. Аналіз методів структурної та параметричної ідентифікації ІДДМ у формі різницевих рівнянь показав, що ці методи є складними для реалізації користувачем, містять складні процедури і вимагають створення інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, яка б інтегрувала як методи та засоби отримання даних, їх попереднього аналізу, так і методи і засоби структурної та параметричної ідентифікації для побудови адекватних ІДДМ процесів забруднення атмосфери.



## РОЗДІЛ 2

### УДОСКОНАЛЕНИЙ ЗА КРИТЕРІЄМ ЧАСОВОЇ СКЛАДНОСТІ МЕТОД СТРУКТУРНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДИСКРЕТНИХ ДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

У низці робіт, наведених в оглядовій частині роботи, розглянуто достатньо ефективний метод структурної ідентифікації, який ґрунтується на поведінковій моделі бджолиної колонії. Разом з тим, зазначений метод характеризується високою часовою складністю реалізації. Практика застосування цього методу для розв'язування задач моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту показує, що для побудови ІДДМ забруднень атмосфери в деякій точці приземистого шару атмосфери в залежності від інтенсивності автотранспортного потоку доводилося використовувати до декількох тижнів обчислювального часу із використанням ПК з середньою продуктивністю. Основною проблемою тут є багаторазове розв'язування ІСНАР в процесі структурної ідентифікації. У деяких випадках така кількість сягала десятків мільйонів разів. Очевидно, що удосконалення зазначеного методу з метою зниження часової складності його реалізації є актуальним. Для розв'язування цього завдання у даному розділі проведено аналіз функціональної структури обчислювального методу структурної ідентифікації ІДДМ з точки зору його часової складності. Обґрунтовано основні складові часової складності та виокремлено найбільш критичну. На цій основі запропоновано можливі удосконалення відомого методу структурної ідентифікації за рахунок попередньої обробки вхідних даних для структурної ідентифікації із застосуванням методу субтрактивної кластеризації. Останній також модифікований із використанням аналізу інтервальних даних.

Матеріали цього розділу опубліковано автором у працях [6, 7, 9, 12-14, 16, 30, 68].

## 2.1. Часова складність методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі ПМБК

У попередньому розділі розглянуто ряд методів структурної ідентифікації ІДДМ. Особливу увагу акцентовано на методі, схема якого побудована на поведінковій моделі бджолоїної колонії. Розглянемо структуру організації обчислень в цьому методі, виходячи із часової складності реалізації її компонент. Спираючись на результати аналізу цього методу у попередньому розділі, виокремимо основні обчислювальні процедури, результатом яких є оптимальна структура ІДДМ.

Отже, відповідно до задачі (1.20), структуру ІДДМ  $\lambda_s$  задамо у вигляді деякого набору структурних елементів із множини  $F$ , як показано у виразі (1.16). Для оперування структурами ІДДМ, пропонуємо, залишити, як і в більшості реалізацій цього методу, десяткове кодування структурних елементів. Тоді, якщо початкову множину  $F$  усіх структурних елементів (базисних функцій різницевих рівнянь) згенерувати у вигляді впорядкованого набору  $f_1(\bullet), f_2(\bullet), f_{L-1}(\bullet), f_L(\bullet)$  і використати десяткове кодування на основі їх порядкового номера, то поточну структуру ІДДМ  $\lambda_s$  отримаємо у вигляді набору  $\{N_1, N_2, \dots, N_{m_s}\}$ , де  $N$  – порядковий номер структурного елемента.

Тепер перейдемо до опису основних операторів, які здійснюють перетворення наборів структурних елементів, щоб отримати кінцевий розв'язок оптимізаційної задачі (1.20).

Спочатку розглянемо оператор  $P(\Lambda_{mcn}, F)$ , який здійснює перетворення структури ІДДМ (починаючи із початково заданих, коли

лічильник ітерацій  $msp=0$ ) у вигляді (1.16) відповідно до процедури дослідження околу відомого джерела нектару робочими бджолами.

У контексті задачі ідентифікації ІДДМ це означає, що на поточній ітерації  $msp$  застосування методу структурної ідентифікації потрібно, на основі кожної з поточних структур математичної моделі  $\lambda_s$ , які своєю чергою задають координати відомих джерел нектару, згенерувати по одній «новій» структурі  $\lambda'_s$ , які задаватимуть координати нових точок джерел їжі в околі поточних точок джерел нектару. Оскільки отримана «нова» структура означає окіл поточного джерела нектару, тому має бути «близькою» до поточної структури ІДДМ  $\lambda_s$ .

Отже, підсумовуючи вище зазначене, бачимо, що оператор  $P(\Lambda_{msp}, F)$  здійснює перетворення множини поточних структур ІДДМ  $\Lambda_{msp}$ , згенерованих на ітерації алгоритму  $msp$  у множину нових структур ІДДМ  $\Lambda'_{msp}$ , але близьких до поточних. Детально ці перетворення із отриманням «нової» структури  $\lambda'_s$  виконуємо у спосіб заміни випадковим чином частини елементів поточної структури  $\lambda_s$ . При цьому, заміну частини елементів здійснюємо за правилом: чим гірша структура  $\lambda_s$  (за критерієм (1.20) із урахуванням виразів для оцінювання якості структури (1.18) чи (1.19)), тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Для цих цілей обчислюємо показник  $n_s$  [97, 98], який визначає кількість елементів, які необхідно замінити у поточній структурі ІДДМ  $\lambda_s$ , в залежності від її якості в межах поточної множини структур  $\Lambda_{msp}$ .

Варто зауважити, що в задачі структурної ідентифікації у загальному випадку кількість структурних елементів у шуканій структурі ІДДМ є невідомою. Проте, для алгоритму реалізації розв'язування цієї задачі нами мають бути задані межі діапазону  $[I_{\min}; I_{\max}]$ , які визначають, відповідно, мінімальну та максимальну кількість структурних елементів у поточній

структурі ІДДМ  $\lambda_s$ . Таким чином, складність задачі полягає ще і в тому, що структури ІДДМ, отримані на поточній ітерації застосування методу, можуть мати різну кількість елементів. Проте такий підхід дозволяє розширити область пошуку оптимальних структур. Разом з тим, при обчисленні кількості елементів  $n_s$ , які будемо замінювати у поточній структурі, необхідно враховувати не тільки якість поточної структури  $\lambda_s$ , але і кількість її елементів  $m_s$ . Цей вираз задаємо емпірично, спираючись на обернену лінійну залежність між якістю структури та кількістю елементів, які необхідно замінити. Також враховуємо, що чим більше в поточній структурі елементів, тим більша частка елементів буде замінена у цій структурі. Взагалі, вирази для обчислення даного показника мало досліджені і можуть суттєво впливати на складність та ефективність процедур пошуку розв'язків задачі структурної ідентифікації ІДДМ.

Таким чином, визначивши кількість структурних елементів  $n_s$  поточної структури ІДДМ  $\lambda_s$ , які необхідно замінити для формування нової структури, самі елементи для заміни обираємо випадковим чином.

Розглянемо схематичний приклад реалізації цього оператора. Нехай поточну структуру ІДДМ  $\lambda_s$  задає набір номерів структурних елементів, представлених десятковими числами:  $\{3, 5, 8, 13, 14, 22\}$ , а кількість елементів поточної структури, які потрібно замінити,  $n_s = 2$ . Тоді випадковим чином на основі рівномірного закону розподілу обираємо елементи поточної структури  $\lambda_s$ , які необхідно замінити. Наприклад, за рівномірним законом з шести відомих номерів (3, 5, 8, 13, 14, 22) було згенеровано такі номери : «8» та «13». Також, з множини  $F$ , яка включає номери усіх потенційних структурних елементів, за виключенням вже обраних, було згенеровано номери «19», «23», на які їх будуть замінювати. Після заміни отримуємо «нову» структуру  $\lambda'_s$ , задану набором  $\{3, 5, 14,$

19, 22, 23}.

Отримана «нова» структура ІДДМ  $\lambda'_s$  у контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії задає координати точки в околі відомого джерела нектару.

Як вже зазначалося вище, у контексті структурної ідентифікації математичної моделі, *процедура визначення якості джерела нектару* означає проведення етапу параметричної ідентифікації структури ІДДМ  $\lambda_s$  та визначення її якості  $\delta(\lambda_s)$  із застосуванням виразу (1.18) чи (1.19).

Наступним математичним перетворенням в алгоритмі структурної ідентифікації є оператор попарної селекції  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  «кращої» із поточних структур ІДДМ  $\lambda_s$  та  $\lambda'_s$ . Оператор селекції реалізовано на підставі аналізу значень функції мети у виразі (1.20), відповідно до *процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару* для робочих бджіл. Оператор  $D_1(\lambda_s, \lambda'_s)$  реалізовує процес синтезу множини «кращих» структур ІДДМ  $\Lambda^1_{mcp}$  із поточних множин  $\Lambda_{mcp}$ ,  $\Lambda'_{mcp}$ .

Таким чином, отримуємо множину структур ІДДМ першого ряду формування  $\lambda_s^1 \in \Lambda^1_{mcp}$ ,  $s = 1 \dots S$ .

Далі, відповідно до поведінкової моделі бджолоїної колонії, важливо визначити кількість бджіл-дослідників, які обрали відоме джерело нектару з координатами  $\lambda_s^1$ . У контексті задачі структурної ідентифікації ця кількість бджіл задається показником  $R_s$ , який визначає кількість структур, які, своєю чергою, будуть згенеровані на основі  $s$ -ї структури із множини  $\Lambda^1_{mcp}$  першого ряду формування, відповідно до *процедури вибору відомого джерела нектару* бджолами-дослідниками. Його значення обчислюють на основі такого припущення: кількість бджіл-дослідників, що летить в окіл джерела нектару, про яке повідомила робоча бджола, прямо пропорційно залежить від його якості [44, 98, 99]. Нижче буде наведено та обґрунтовано

вираз для його обчислення, а також проаналізовано складність обчислень.

Кількість робочих бджіл задають параметрами алгоритму – кількістю структур, наявних на поточній ітерації реалізації методу. Кількість структур, які повинні бути згенеровані на їх основі, тобто, кількість бджіл-дослідників – така ж. Питання розподілу бджіл у популяції на робочих та бджіл-дослідників залишається відкритим і невідомо як він вплине на обчислювальну складність та ефективність методу. У відомих працях, де описано реалізації методу структурної ідентифікації, цей розподіл задають у співвідношенні половина на половину [97, 98].

Наступний оператор  $P_{\delta}(\Lambda_{mcs}, F)$  здійснює перетворення структури ІДДМ у вигляді (1.16) відповідно до *процедури дослідження околу відомого джерела нектару* бджолами-дослідниками. У контексті поведінкової моделі бджолиної колонії процедура польоту до відомого джерела нектару означає політ бджіл-дослідників в окіл відомих джерел їжі.

Оператор  $P_{\delta}(\Lambda_{mcs}, F)$  означає перетворення кожної структури  $\lambda_s^1$  з множини структур  $\Lambda_{mcs}^1$  першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму *mcs*, у множини структур ІДДМ  $\Lambda'_s$  (де  $s = 1 \dots S$ ) в спосіб заміни випадковим чином  $n_s$  елементів кожної структури  $\lambda_s^1$  елементами із множини структурних елементів  $F$ . Операції формування нових структур у спосіб заміни структурних елементів проводимо аналогічно, як для оператора  $P(\Lambda_{mcs}, F)$ , тільки для множини іншого ряду формування.

Далі знову застосовуємо оператор погрупової селекції  $D_2(\lambda_s^1, \Lambda'_s)$  «кращої» структури ІДДМ із  $\lambda_s^1$  та множини  $\Lambda'_s = \{\lambda_1 \dots \lambda_r \dots \lambda_{R_s}\}$  за значеннями функції мети (1.20), відповідно до *процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару* для бджіл-дослідників.

Оператор погрупової селекції  $D_2(\lambda_s, \Lambda'_s)$  реалізовує процес синтезу множини «кращих» (за критерієм (1.20) із урахуванням виразів для

оцінювання якості структури (1.18) чи (1.19)) структур ІДДМ  $\Lambda^2_{mcs}$  із поточних множин  $\Lambda^1_{mcs}$  та  $\Lambda''_{mcs}$  у спосіб селекції структур ІДДМ  $\lambda^2_s$  за показниками якості, де  $\Lambda''_{mcs} = \{\Lambda'_1 \cup \Lambda'_2 \dots \cup \dots \Lambda'_s \dots \cup \Lambda'_S\}$ ,  $s = 1 \dots S$ . Таким чином, отримуємо множину структур ІДДМ другого ряду формування  $\Lambda^2_{mcs}$ .

Структури ІДДМ  $\lambda^2_s$  другого ряду формування на наступній ітерації застосування методу задають координати множини відомих джерел нектару  $\Lambda^2_{mcs}$ , за якими закріплені робочі бджоли популяції.

Для кожної поточної структури ІДДМ  $\lambda_s$  необхідно задати потенційну кількість можливих згенерованих структур, а поточну кількість контролювати за допомогою лічильника  $Limit_s$ . Зміна значень цього лічильника імітує процес зменшення кількості нектару відповідно до процедури виявлення вичерпаних джерел нектару. Значення лічильника  $Limit_s$  інкрементують кожного разу, коли під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася». У випадку «оновлення» поточної структури значення лічильника обнулюють, оскільки це означає появу нового джерела нектару.

Як вже зазначалося, збільшення значення лічильника  $Limit_s$  імітує процес вичерпання джерела нектару, а константа  $LIMIT$ , значення якої дослідник задає, як один із параметрів методу структурної ідентифікації перед його застосуванням, означає вичерпаність джерела нектару.

Таким чином, кожне джерело нектару (структура ІДДМ  $\lambda^2_s$ ), для якого виконується умова  $Limit_s = LIMIT$ , вважають вичерпаним. У такому випадку робоча бджола, закріплена за ним, стає бджолою-розвідником та здійснює випадковий пошук «нового» джерела нектару.

На наступному етапі обчислень застосовуємо оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ , який генерує випадковим чином структури  $\lambda^2_s$  із множини усіх структурних елементів  $F$ , з кількістю структурних елементів, що

визначаємо у заздалегідь заданому діапазоні  $m_s \in [I_{\min}; I_{\max}]$ . Варто зазначити, що при формуванні «нової» структури ІДДМ оператором  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  вибираємо будь-які структурні елементи із наперед сформованої множини  $F$ .

В обчислювальній схемі необхідно створити також *модуль комунікації та мобільності бджіл колонії*, який реалізує набір правил прийняття рішень різними типами бджіл. Цей модуль керує взаємодією між операторами генерування та селекції структур ІДДМ.

*Правила прийняття рішень різними групами бджіл*, які визначають процедури у поведінковій моделі для різних груп бджіл, у методі структурної ідентифікації ІДДМ означають попередньо введені оператори. Використовують їх для інтерпретації значень змінних  $n_s$ ,  $R_s$  та  $Limit_s$ .

На рис. 2.1 наведено отриману узагальнену структурну схему організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ.

Як бачимо зі схеми на рис. 2.1, реалізація методу структурної ідентифікації вимагає багаторазового виконання ряду циклів з метою синтезу поточних структур ІДДМ

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

які, своєю чергою, є комбінацією у певний спосіб обраних структурних елементів  $f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s \in F$ . Останні мають множники  $g_i^s$ , які є параметрами ІДДМ і обчислюються в результаті розв'язування задачі параметричної ідентифікації. Далі, для кожної структури обчислюють значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , яке визначає якість поточної структури, і порівнюють «якість» поточних структур за цими значеннями щоб визначити «найкращі». У випадку знаходження оптимальної структури, для якої  $\delta(\lambda_s) = 0$ , зупиняють обчислювальну процедуру. У протилежному випадку – продовжують процедури комбінування компонент «найкращих» структур.



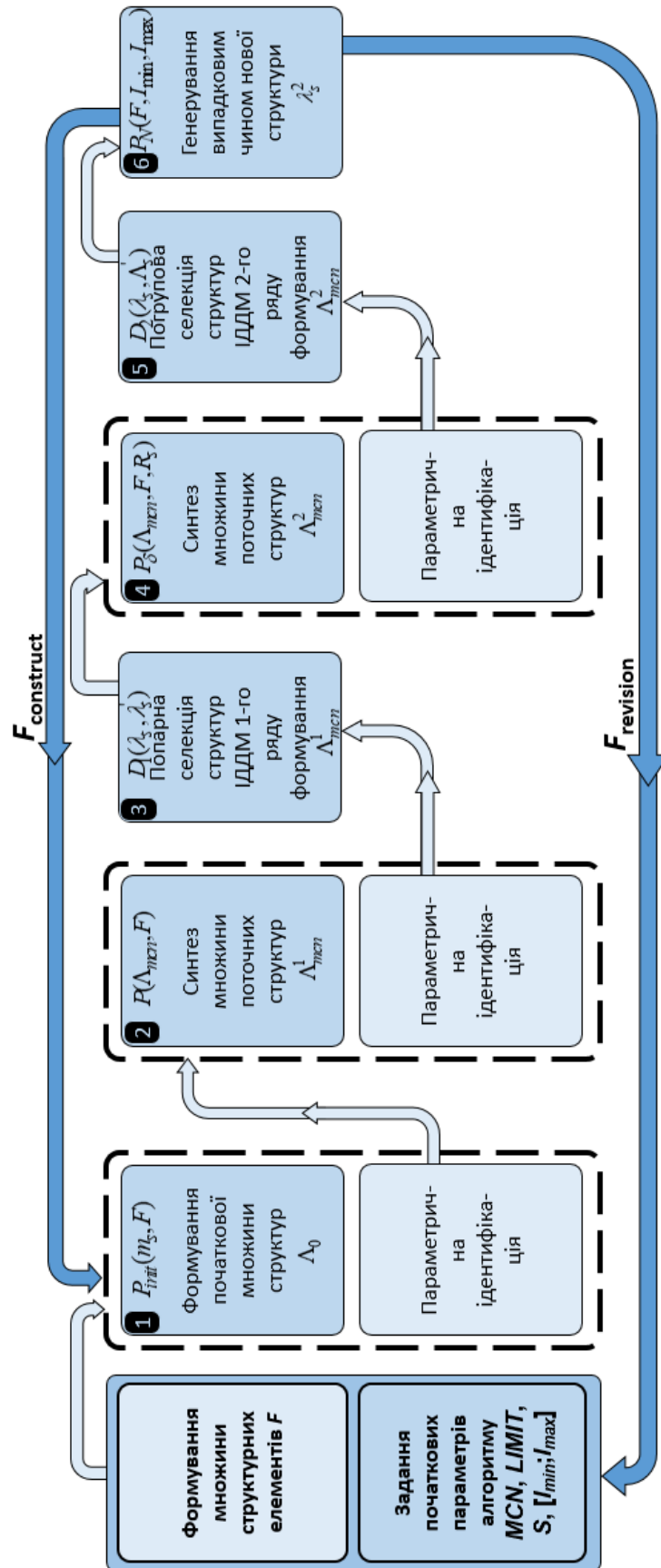


Рисунок 2.1 – Структурна схема організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ

Розглянемо детально кожен компоненту схеми організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ, характеризуючи її за часовою складністю.

Як бачимо, спочатку формується множина структурних елементів  $F$  та задаються значення параметрів алгоритму:  $MCN$ ,  $LIMIT$ ,  $S$ ,  $[I_{\min}; I_{\max}]$ . Після цього виконуються процедури обчислення (позначені блоками 1-6), безпосередньо спрямовані на знаходження такої структури ІДДМ у загальному вигляді (1.7), яка б забезпечувала виконання вимог (1.8).

Блок 1: із застосуванням оператора  $P_{init}(m_s, F)$  формуємо початкову множину структур  $\Lambda_{mcn}$ , для якої  $MCN=0$ , та оцінюємо їх «якість» на основі значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . Початкову множину структур формуємо шляхом випадкового вибору структурних елементів із множини  $F$  у кількості  $m_s$ .

Блок 2: використовуючи оператор  $P(\Lambda_{mcn}, F)$ , здійснюємо синтез множини поточних структур. В контексті ПМБК цей оператор означає дослідження околу відомого джерела нектару робочими бджолами.

Блок 3: з використанням оператора  $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$ , здійснюємо попарну селекцію множини структур ІДДМ першого ряду формування  $\Lambda_{mcn}^1$ . Оператор  $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$  реалізує процедуру синтезу «кращої» структури, виходячи зі значень функції мети. В контексті ПМБК цей оператор означає запам'ятовування координат та якості джерела нектару робочими бджолами.

Блок 4: застосовуючи оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ , здійснюємо синтез множини поточних структур. В контексті ПМБК це означає дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками.

Блок 5: оператор  $D_2(\lambda_s, \Lambda_s^1)$  реалізує процес синтезу множини «кращих» структур ІДДМ за значеннями функції мети. Тобто, проводимо погрупову селекцію множини структур ІДДМ другого ряду формування  $\Lambda_{mcn}^2$ . У

контексті ПМБК це означає запам'ятовування координат та якості джерела нектару для бджіл-дослідників.

Блок 6: використовуючи оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ , здійснюємо генерування «нової» структури ІДДМ  $\lambda_s^2$ . Генерування «нової» структури ІДДМ здійснюється випадковим чином з множини всіх структурних елементів при умові, що усі структури, для яких  $Limit_s=LIMIT$ , вважаються «вичерпанними». В контексті ПМБК це означає пошук нового джерела нектару.

Варто зазначити, що значення функції мети змінюється в залежності від «якості» структури обернено пропорційно, тобто чим «краща» структура, тим менше значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . У випадку якщо  $\delta(\lambda_s) = 0$ , то така структура вважається оптимальною.

Як бачимо зі схеми організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ, на першому етапі задаються параметри алгоритму та початкова множина структурних елементів. Після кожного формування набору структур необхідно для кожної поточної структури проводити процедуру параметричної ідентифікації ІДДМ, тобто обчислювати значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ . Отже, обчислювальна складність методу структурної ідентифікації ІДДМ, в основному, визначається двома процедурами: формуванням набору структур та параметричною ідентифікацією цих новостворених структур. Варто зауважити, що з точки зору обчислювальної складності, не приймаємо до уваги процедури селекції, оскільки вони в обчислювальному плані найменш витратні по часу (просто порівняння обчислених значень функції мети для кожної сформованої структури).

Із рис. 2.1 бачимо, що для формування набору структур використовують три різних оператори: оператор  $P_{init}(m_s, F)$  – для формування початкової множини структур  $\Lambda_{mcs}$ , випадковим чином комбінуючи структурні елементи із множини  $F$  за умови  $MCN=0$  та заданої

кількості  $m_s$  структурних елементів зі встановленого діапазону; оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$  – для синтезу множини поточних структур другого ряду формування, який перетворює структури-предки у вигляді різницевих рівнянь у набір інших структур, кількість яких обчислюємо як показник  $R_s$  для кожної «структури-предка» за формулою:

$$R_s = \text{ToInt} \left( \frac{S \cdot \left( 2 \cdot \max \left\{ \left( \delta(\lambda_s^1) \right)^2 \mid s = 1 \dots S \right\} - \left( \delta(\lambda_s^1) \right)^2 - \left( \delta(\lambda_{s-1}^1) \right)^2 \right)}{\sum_{s=1}^S \left( \max \left\{ \left( \delta(\lambda_s^1) \right)^2 \mid s = 1 \dots S \right\} - \left( \delta(\lambda_s^1) \right)^2 \right)} - R_{s-1} \right), s = 2 \dots S, \quad (2.1)$$

і третій оператор  $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$  – для генерування випадковим чином «нових» структур ІДДМ  $\lambda_s$  з множини всіх структурних елементів при умові, що усі структури, для яких  $Limit_s = LIMIT$  вважаються «вичерпаними» (цей оператор в контексті ПМБК означає пошук нового джерела нектару. Аналіз складності обчислювальної реалізації вище зазначених операторів показує достатньо очевидний факт, що найскладнішим для формування структур зі структурних елементів є оператор «інтенсивності пошуку джерел нектару»  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ , оскільки, на відміну від двох інших, де структури генерують випадковим чином, вимагає обчислення показника  $R_s$  для кожної «структури-предка». Тому, можемо вважати його обчислювальну складність критичною у порівнянні з іншими операторами обчислювальної схеми.

Тепер проведемо порівняння обчислювальної складності параметричної ідентифікації ІДДМ, тобто складності обчислень значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$  та найскладнішого за обчисленнями оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару»  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ , який використовують для формування структур зі структурних елементів. Для цих цілей у праці [69] запропоновано використовувати інваріанту – кількість операцій процесора множення та додавання. У цій же праці встановлено, що

для оцінювання якості поточного наближення оцінок параметрів, тобто, при одноразовому обчисленні значення функції мети  $\delta(\hat{g}_l)$ , кількість операцій множення задають такою залежністю:

$$Nmul_F = (N - d) \cdot (2m_s + 15), \quad (2.2)$$

а кількість операцій додавання – такою:

$$Nadd_F = (N - d) \cdot (4 \cdot m_s - 1), \quad (2.3)$$

де  $N$  – кількість інтервальних даних,  $d$  – порядок різницевого рівняння,  $m_s$  – кількість параметрів у поточній структурі ІДДМ.

Зауважимо, що усі арифметичні операції обчислення значення функції мети виконуємо за правилами інтервальної арифметики, на відміну від формул для формування поточної структури ІДДМ в методі структурної ідентифікації оператором  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ .

Як витікає із результатів обчислювальних експериментів, наведених у праці [69], кількість циклів обчислення значення функції мети у задачі одноразової параметричної ідентифікації ІДДМ на основі методів стохастичної оптимізації з направляючим конусом Растрігіна, сягає від 9000 ітерацій для простих моделей з  $m_s=2$ ,  $N=15$  та до 200000 ітерацій – для складніших моделей, з  $m_s=9$ ,  $N=100$ . Позначимо кількість ітерацій, на кожній з яких обчислюють одне значення функції мети  $\delta(\lambda_s)$ , як задачу параметричної ідентифікації, – за  $Q(m_s, N)$ . Тоді загальну кількість множень для однієї задачі параметричної ідентифікації обчислюємо за формулою:

$$Nmul_{PI} = Q(m_s, N) \cdot (N - d) \cdot (2m_s + 15), \quad (2.4)$$

а операцій додавання – за формулою:

$$Nadd_{PI} = Q(m_s, N) \cdot (N - d) \cdot (4 \cdot m_s - 1). \quad (2.5)$$

Розглянемо подібні показники для процедури найскладнішого за обчисленнями оператора «інтенсивності пошуку джерел нектару»  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ , який використовують для формування структур зі структурних елементів.

Як відомо, процедура формування структур ІДДМ із застосуванням оператора  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$  складається з операції визначення для кожної поточної «структури-предка» кількості «структур-нащадків» за формулою (2.1) та наступної ітерації – генерування нових «структур-нащадків» у спосіб випадкової заміни частини структурних елементів, обраних з множини  $F$ . Тому обчислювальна складність реалізації цього оператора визначається складністю обчислень за формулою (2.1). Позначимо наближене значення кількості арифметичних операцій множення для виконання цього оператора за  $Nmul(P_\delta)$ , а кількість операцій додавання для цього оператора за  $Nadd(P_\delta)$ . Тоді, спираючись на формулу (2.1), отримаємо:

$$Nmul(P_\delta) \approx 4 \cdot S + 9, \quad (2.6)$$

$$Nadd(P_\delta) \approx S + 4, \quad (2.7)$$

де  $S$  – кількість поточних структур.

Як бачимо, процедура формування структур майже не залежить від кількості елементів в структурі ІДДМ і зовсім не залежить від кількості експериментальних інтервальних даних.

Під час експериментальних досліджень часової складності реалізації методу структурної ідентифікації, в залежності від значення  $m_s$  та значення  $N$ , значення  $S$  обирали в діапазоні від 8 до 30. Зокрема, чим більший добуток  $m_s$  на  $N$ , тим більше значення  $S$ . Спираючись на проведений аналіз, можемо стверджувати, що у будь-якому випадку:

$$Nmul_F \gg Nmul(P_\delta) \text{ та одночасно } Nadd_F \gg Nadd(P_\delta) \quad (2.8)$$

Більше того, справедливими є такі відношення:

$$Nmul_{PI} \gg Nmul(P_\delta), \quad (2.9)$$

$$Nadd_{PI} \gg Nadd(P_\delta). \quad (2.10)$$

З відношень (2.9) та (2.10) витікає, що основні обчислювальні витрати в методі структурної ідентифікації ІДДМ на основі ПМБК безпосередньо визначаються кількістю ітерацій процедур параметричної ідентифікації.

Аналізуючи тепер структурну схему організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ на рис. 2.1, приходимо до висновку, що до найбільшої часової складності призводить наявність в процедурі структурної ідентифікації можливого ходу обчислень по двох зовнішніх циклах, позначених на схемі відповідно  $F_{\text{construct}}$  та  $F_{\text{revision}}$ . Кожен з них вимагає найбільшої кількості реалізацій методу параметричної ідентифікації. Перший цикл  $F_{\text{construct}}$  пов'язаний із потребою вибору нових структурних елементів із множини  $F$ , коли інші структури «вичерпані», а другий цикл  $F_{\text{revision}}$  передбачає оновлення початкового набору структурних елементів.

Таким чином, спираючись на проведений аналіз, можемо стверджувати, що визначальним щодо обчислюваної складності реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкових моделей бджолої колонії є якість формування початкової множини структурних елементів, яку в існуючому методі формували емпірично. Тому актуальною є розробка методу формування множини структурних елементів із використанням обґрунтованих процедур попереднього аналізу вибірки інтервальних даних.

## 2.2. Метод формування початкової множини структурних елементів на основі кластерного аналізу вибірки інтервальних даних

Як було вказано вище, часова складність реалізації методу структурної ідентифікації найбільшим чином залежить від «якості» та повноти сформованого набору структурних елементів. Тому важливим є забезпечення формування, з одного боку, повного набору структурних елементів, а з іншого – варто забезпечити якомога меншу кількість структурних елементів.

У цьому підрозділі вирішуватимемо зазначену задачу на основі попереднього аналізу інтервальних даних, спираючись на гіпотезу про те, що при побудові ІДДМ на основі різницевих рівнянь доцільно в набір структурних елементів включити такі, які забезпечують однозначну залежність між вихідними характеристиками процесу та чинниками, які впливають на ці характеристики.

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

$$[\hat{v}_k(\lambda_s)] = \sum_{i=1}^m f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s + G(\lambda_s), \quad (2.11)$$



де  $f_i^s(\bullet)$  – компоненти вектора базисних функцій

$$f_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], u_{p,0}, \dots, u_{p,k}), k = d, \dots, K. \quad (2.12)$$

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

Як бачимо з виразу (2.12), компоненти вектора базисних функцій  $f_i^s(\bullet)$  можуть бути залежними від вхідних (врахованих) чинників  $u_{p,0}, \dots, u_{p,k}$ . Також бачимо, що залежність між вихідною характеристикою  $[\hat{v}_k(\lambda_s)]$  та вхідними (врахованими) чинниками  $u_{p,0}, \dots, u_{p,k}$  є неоднозначною через інтервальне представлення компонент вектора  $f_s^T([\hat{v}_{k-d}], \dots, [\hat{v}_{k-1}], u_{p,0}, \dots, u_{p,k})$ . Таку неоднозначність (вона може бути пов'язана із похибками вимірювань вихідної характеристики) представляємо інтервалами можливих значень вихідної характеристики для заданих значень вхідних змінних. Разом з тим, наявність невідомої функції  $G(\lambda_s)$  в структурі РР (2.11) суттєво ускладнює задачу структурної ідентифікації, оскільки суттєво підвищує неоднозначність зв'язку між вихідною характеристикою  $[\hat{v}_k(\lambda_s)]$  та вхідними (врахованими) чинниками. Одним зі способів урахування цієї невизначеності може бути розширення інтервалів у вибірці інтервальних даних, що обов'язково призведе до втрати у точності моделі, тобто, до розширення інтервалу оцінок для вихідної характеристики  $[\hat{v}_k(\lambda_s)]$ . Отже, такий підхід не завжди є прийнятним. Інший підхід полягає в усуненні невизначеності, пов'язаної із адитивною компонентою  $G(\lambda_s)$  в процесі попередньої обробки інтервальних даних. Наприклад, такий підхід можемо реалізувати за рахунок таких перетворень:

$$\frac{\partial v_k(\lambda_s)}{\partial u_{p,k}} = \frac{\partial(\sum_{i=1}^m f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s)}{\partial u_{p,k}} + \frac{\partial G(\lambda_s)}{\partial u_{p,k}}. \quad (2.13)$$

Припускаючи, що незалежність між  $G(\lambda_s)$  та компонентами вектора вхідних (врахованих) чинників  $u_{p,0}, \dots, u_{p,k}$  відсутня, отримаємо нуль у другому доданку (2.13).

На підставі зроблених припущень та проведеного аналізу невизначеності та неоднозначності у випадку структурної ідентифікації ІДДМ, можемо сформулювати вимоги до проведення попереднього аналізу вибірки вхідних даних з метою забезпечення «якості» та повноти сформованого набору структурних елементів. А саме, доцільно здійснити перевірку наявності однозначної залежності між вихідними характеристиками процесу та чинниками, які впливають на ці характеристики, на основі попереднього аналізу вибірки даних. У випадку відсутності цієї однозначної залежності необхідно, спираючись на вираз (2.14) в процесі попередньої обробки інтервальних даних, забезпечити усунення адитивної компоненти  $G(\lambda_s)$ , яка визначає частину структури різницевого рівняння (2.11).

У випадку використання дискретної вибірки даних процедура (2.13) наближено може бути виконана у такий спосіб:

$$\frac{\partial v_k(\lambda_s)}{\partial u_{p,k}} \approx \frac{z_k - z_{k-1}}{u_{p,k} - u_{p,k-1}}, k = 1, \dots, K, \quad (2.14)$$

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

Важливим завданням є встановлення факту наявності неоднозначності зв'язку між вихідною характеристикою процесу та чинниками, які впливають

на цю характеристику на основі попереднього аналізу даних. Для цього скористаємося модифікованим методом кластерного аналізу.

Нехай задано набір вхідних даних для проведення структурної ідентифікації:

$$[z_k^-; z_k^+], u_{p,k}, p=1, \dots, P, k=1, \dots, K, \quad (2.15)$$

де  $z_k^-, z_k^+$  – відповідно, нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірної вихідної характеристики з дискретно заданими часовими дискретами  $k=0, \dots, K$ ,  $z_k^- = z_k - z_k \cdot \varepsilon$  та  $z_k^+ = z_k + z_k \cdot \varepsilon$ , де  $z_k$  – вимірне значення вихідної характеристики;  $\varepsilon$  – відносна похибка вимірювань;  $u_{p,k}$  – значення вхідних змінних із часовими дискретами  $k=1, \dots, K; p=1, \dots, P$  – номер вхідної змінної.

В якості основи для кластеризації вхідних даних використаємо субтрактивний метод [9, 29, 36, 53]. Цей метод не вимагає великої вибірки експериментальних даних та встановленої заздалегідь кількості кластерів, що значно скорочує час для його реалізації. Варто також зазначити, що кількість кластерів на основі цього методу регулюється єдиним параметром, а саме – радіусом кластера [9]. У подальшому розгляді будемо опускати індекс  $p$  при позначенні вхідних змінних з набору  $p=1, \dots, P$ .

Відповідно до методу кластеризації, спочатку формуємо потенційні центри кластерів з рядків матриці даних для кластеризації вхідних змінних та обчислюємо потенціал потенційних центрів кластерів за допомогою виразу [9]:

$$P_h(c_h) = \sum_{k=1}^K \exp(-\alpha \cdot \|\bar{c}_h - \bar{x}_k\|), \quad (2.16)$$

де  $\bar{c}_h = (c_{1,h}, c_{2,h})$  – потенційний центр  $h$ -го кластера;  $\bar{x}_k = (z_k, u_k)$  – вхідні

експериментальні дані:  $z_k = \frac{z_k^+ + z_k^-}{2}$  – центр інтервалу вимірної концентрації шкідливої речовини у період часу  $k$ ,  $u_k$  – відповідна кількість автотранспорту, які перетнули дорожнє полотно у даній точці за період часу  $k$ ;  $\alpha$  – додатна константа;  $\|\vec{c}_h - \vec{x}_k\|$  – відстань між потенційним центром  $h$ -го кластера  $\vec{c}_h$ ,  $h = 1, \dots, H$ , та вхідними експериментальними даними  $\vec{x}_k$ ,  $k = 1, \dots, K$ ;  $H$  – кількість потенційних кластерів.

За центри кластерів вибираємо координати «вершин гір», тобто центр кластера – це точка, яка визначається характерною концентрацією на відрізьку часу  $k$  та відповідною кількістю автотранспортних засобів, з найбільшим значенням потенціалу [9]:

$$(\vec{c}_h) = \arg \max_{h=1, \dots, H} P_h(z_k, u_k). \quad (2.17)$$

Щоб уникнути формування подібних кластерів, ми повинні перерахувати значення потенціалів для інших потенційних центрів кластерів [9]:

$$P_{h+1}(\vec{c}_{h+1}) = P_{h+1}(\vec{c}_h) - P_h(\vec{c}_h) \times \exp(-\beta \cdot \|\vec{c}_{h+1} - \vec{c}_h\|), h = 1, \dots, H, \quad (2.18)$$

де  $P_h(\vec{c}_h)$  – потенціал потенційного центру  $h$ -го кластера на  $h$ -ій ітерації;  $P_{h+1}(\vec{c}_h)$  – потенціал потенційного центру  $h$ -го кластера на  $h+1$  ітерації;  $\beta$  – додатна константа;  $\|\vec{c}_{h+1} - \vec{c}_h\|$  – відстань між потенційним центром  $h+1$  кластера та центром сформованого  $h$ -го кластера.

Процес розрахунку центрів кластерів здійснюється до тих пір, доки будуть виключені всі рядки вхідної змінної матриці  $X$ , яка представлена набором:

$$z_k, u_k, k=1, \dots, K.$$

Варто зазначити, що на відміну від існуючого методу субтрактивної кластеризації, у запропонованому радіус кластера є фіксованим і визначається невизначенністю у даних (2.15). Це обумовлено метою застосування кластеризації, а саме – забезпеченням однозначного зв'язку між вихідною характеристикою і чинниками впливу на неї у спосіб перетворення вибірки вхідних даних до вибірки їх диференціальних характеристик. Таким чином, радіус кластера визначатимемо із виразу:

$$r = \frac{\max_{k=1, \dots, K} (z_k^+ - z_k^-)}{2} \quad (2.19)$$

У результаті проведеної кластеризації отримаємо  $H$  кластерів. Однозначною залежністю між вихідною характеристикою процесу та чинниками, які впливають на цю характеристику, будемо вважати випадок, коли проєкції кластерів не перетинаються на осі незалежних змінних. Це означає можливість знаходження однозначної залежності у межах початково заданої ширини інтервалів для вихідної характеристики, тобто радіусу кластера, для кластерів номер  $h$  та номер  $j$ . Математично зазначену умову запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \exists [u_{proj.h}^-; u_{proj.h}^+] \cap [u_{proj.j}^-; u_{proj.j}^+] = \emptyset, \\ h = 1, \dots, H; j = 1, \dots, J; h \neq j. \end{aligned} \quad (2.20)$$

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

В протилежному випадку, застосовуємо для усіх дискрет вибірки перетворення (2.14) і для перетвореної вибірки повторюємо процедуру кластеризації.

Якщо зазначена процедура виконана на одній ітерації і при цьому забезпечено виконання умови (2.20), то можемо стверджувати, що у множину структурних елементів для задачі структурної ідентифікації необхідно ввести такий елемент:

$$f_i^s(\bullet) = \frac{z_k - z_{k-1}}{u_k - u_{k-1}}. \quad (2.21)$$

При цьому, новосформована вибірка вхідних даних набуває вигляду:

$$\left( \frac{z_k - z_{k-1}}{u_k - u_{k-1}}, u_k \right). \quad (2.22)$$

Якщо для перетвореної вибірки умова (2.20) не виконується, то очевидно, що в цьому випадку не виконується гіпотеза про адитивність компоненти  $G(\lambda_s)$  у формулі (2.11). Ітерації з перетворенням вибірки даних повторюємо до тих пір, доки отримаємо однозначний зв'язок, тобто забезпечення виконання умови (2.20). Наприклад, у результаті виконання другої ітерації у множину структурних елементів для задачі структурної ідентифікації необхідно ввести такий елемент різницевого рівняння:

$$f_i^s(\bullet) = \frac{z_k - 2z_{k-1} + z_{k-2}}{u_{p,k} - 2u_{p,k-1} + u_{p,k-2}}. \quad (2.23)$$

Таким чином, продовжуючи ітерації з перетворенням вибірки даних маємо для перетвореної вибірки забезпечити умову (2.20). При цьому, у множину структурних елементів для задачі структурної ідентифікації за результатами

кожної ітерації додаємо до початкової множини структурних елементів елементи (2.22), (2.23) і, за необхідності, скінченні різниці вищих порядків.

### **2.3. Алгоритм формування початкової множини структурних елементів**

Розглянемо детально алгоритм формування початкової множини структурних елементів для побудови ІДДМ концентрацій шкідливих викидів автотранспорту. Блок-схема даного алгоритму, яку зображено на рис. 2.2, розкриває послідовність виконання дій у контексті задачі побудови вказаної математичної моделі.

Як бачимо, спочатку задаємо набір вхідних даних у вигляді (2.15). Далі, спираючись на формули (2.16) – (2.18), проводимо описану у попередньому підрозділі процедуру кластеризації заданої на попередньому кроці вибірки даних. Радіус потенційних кластерів задаємо за допомогою виразу (2.19). Після проведення процедури кластеризації вхідного набору даних перевіряємо умову однозначності залежності між вихідною характеристикою процесу та чинниками, які впливають на неї (2.20).

Варто зазначити, що виконання умови (2.20) є необхідним для того, щоб прийняти остаточне рішення щодо множини початкових структурних елементів для задачі структурної ідентифікації. Як було показано у 2 підрозділі, така умова викликана неоднорідністю середовища для різних точок, в яких моделюється динаміка концентрацій шкідливих викидів. Зокрема, неоднозначна залежність між вхідними і вихідними змінними (концентраціями шкідливих викидів) буде визначатися не тільки інтенсивністю автотранспортних потоків, а також умовами провітрювання даної частини міста, наявністю горизонтальних і вертикальних теплових потоків та іншими відмінними умовами. У другому підрозділі висловлено припущення про адитивну дію зазначених чинників. Якщо гіпотеза не буде

справджуватися, тоді процедура структурної ідентифікації ІДДМ ускладнюється, навіть для випадку перетворення вибірки шляхом застосування перетворення (2.14).

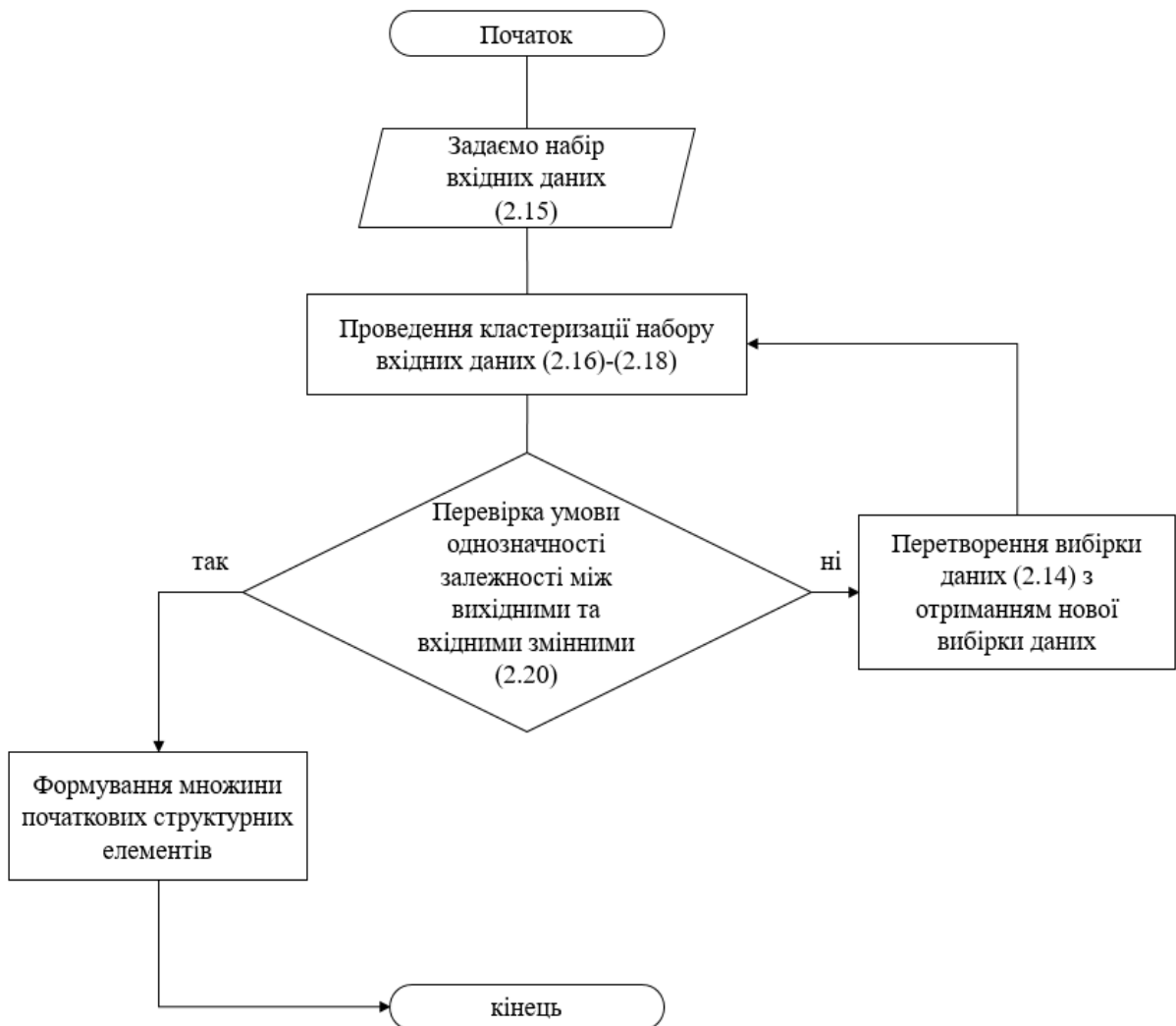


Рисунок 2.2 – Блок-схема алгоритму формування початкової множини структурних елементів для побудови ІДДМ

Якщо вказана умова виконується, переходимо до формування множини початкових структурних елементів для побудови ІДДМ концентрацій шкідливих викидів автотранспорту.

У протилежному випадку здійснюємо перетворення вибірки вхідних даних у спосіб (2.14). В результаті отримуємо нову вибірку у вигляді (2.22) та знову переходимо до процедури кластеризації вхідного набору даних для



виявлення однозначності зв'язку між вихідною характеристикою та вхідними чинниками впливу на неї. Іншими словами, виконуємо вказані перетворення доти, доки буде виконана умова (2.20).

В результаті отримуємо елементи структури різницевого рівняння у вигляді (2.21), що є основою для проведення процедури структурної ідентифікації ІДДМ концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в залежності від інтенсивності його потоку.

Розглянемо основні перетворення вибірки вхідних даних з метою визначення необхідних структурних елементів для задачі структурної ідентифікації ІДДМ на прикладі моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя та перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя на десяти-годинному часовому інтервалі: з 11:00 до 21:00 [67]. Як показано в праці [67], спроби авторів побудувати єдину модель для дослідження динаміки концентрацій  $\text{NO}_2$  на цих перехрестях внаслідок забруднень автотранспортом, не мали успіху. Варто зазначити, що початкова таблиця структурних елементів мала такий вигляд:

Таблиця 2.1

Початкова таблиця структурних елементів

Номер з/п	Структурний елемент	Номер з/п	Структурний елемент	Номер з/п	Структурний елемент
1	$v_{k-3}$	8	$v_{k-3} \cdot v_{k-2}$	15	$v_{k-1} \cdot u_{k-2} / u_k$
2	$v_{k-2}$	9	$v_{k-2} \cdot v_{k-1}$	16	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_{k-2}$
3	$v_{k-1}$	10	$v_{k-1} \cdot u_{k-3} / u_{k-1}$	17	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_{k-3}$
4	$v_{k-3}^2$	11	$v_{k-1} \cdot u_{k-3} / u_{k-2}$	18	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_k$
5	$v_{k-2}^2$	12	$v_{k-1} \cdot u_{k-3} / u_k$	19	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_k$
6	$v_{k-1}^2$	13	$v_{k-1} \cdot u_{k-2} / u_{k-1}$	20	$v_{k-1} \cdot u_k / u_{k-3}$
7	$v_{k-3} \cdot v_{k-1}$	14	$v_{k-1} \cdot u_{k-2} / u_{k-3}$	21	$v_{k-1} \cdot u_k / u_{k-1}$

## Продовження таблиці 2.1

22	$v_{k-3} \cdot u_{k-3} / u_k$	30	$v_{k-3} \cdot u_{k-1} / u_k$	38	$v_{k-2} \cdot u_{k-2} / u_{k-3}$
23	$v_{k-3} \cdot u_{k-3} / u_{k-2}$	31	$v_{k-3} \cdot u_k / u_{k-2}$	39	$v_{k-2} \cdot u_{k-2} / u_k$
24	$v_{k-3} \cdot u_{k-3} / u_k$	32	$v_{k-3} \cdot u_k / u_{k-3}$	40	$v_{k-2} \cdot u_{k-1} / u_{k-2}$
25	$v_{k-3} \cdot u_{k-2} / u_{k-1}$	33	$v_{k-3} \cdot u_k / u_{k-1}$	41	$v_{k-2} \cdot u_{k-1} / u_{k-3}$
26	$v_{k-3} \cdot u_{k-2} / u_{k-3}$	34	$v_{k-2} \cdot u_{k-3} / u_{k-1}$	42	$v_{k-2} \cdot u_{k-1} / u_k$
27	$v_{k-3} \cdot u_{k-2} / u_{k-3}$	35	$v_{k-2} \cdot u_{k-3} / u_{k-2}$	43	$v_{k-2} \cdot u_k / u_{k-2}$
28	$v_{k-3} \cdot u_{k-1} / u_{k-2}$	36	$v_{k-2} \cdot u_{k-3} / u_k$	44	$v_{k-2} \cdot u_k / u_{k-3}$
29	$v_{k-3} \cdot u_{k-1} / u_{k-3}$	37	$v_{k-2} \cdot u_{k-2} / u_{k-1}$	45	$v_{k-2} \cdot u_k / u_{k-1}$

Спираючись на проведені теоретичні обґрунтування та запропонований алгоритм на основі кластерного аналізу, з'ясуємо суть проблеми і визначимо необхідні структурні елементи для успішного розв'язування задачі структурної ідентифікації зазначеної математичної моделі. У цих прикладах 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 фіксувалася 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 фіксувалася безпомилково. Результати вимірювань на перехресті Руська – Замкова – Шашкевича представлено в табл. 2.2, а на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою – в табл. 2.3.

Варто зазначити, що обидві точки на зазначених перехрестях характеризуються різними умовами. Перш за все, провітрюваність на перехресті Руська – Замкова – Шашкевича є вищою через орієнтацію цього перехрестя. На перехресті вулиць Чехова – За Рудкою провітрюваність є

нижчою через щільну забудову. Також, на цьому перехресті наявні вертикальні теплові потоки через наближеність дороги до будівель.

Таблиця 2.2

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
		$z_k^-$	$z_k^+$	$\vec{u}_{1,k}$	$\vec{u}_{2,k}$	$\vec{u}_{3,k}$
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

## Продовження таблиці 2.2

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
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

Продовження таблиці 2.2

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

Таблиця 2.3

## Результати вимірювань на перехресті Чехова – За Рудкою

№ спостереження	Час доби	Виміряні концентрації NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>		Інтенсивність транспортного потоку, од.
		$z_k^-$	$z_k^+$	$\bar{u}_{1,k}$
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

Продовження таблиці 2.3

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

Спочатку проведемо нормування усіх даних вибірки до інтервалу  $[0,1]$ .  
У результаті отримаємо вибірку даних, представлену графічно на рис. 2.3.

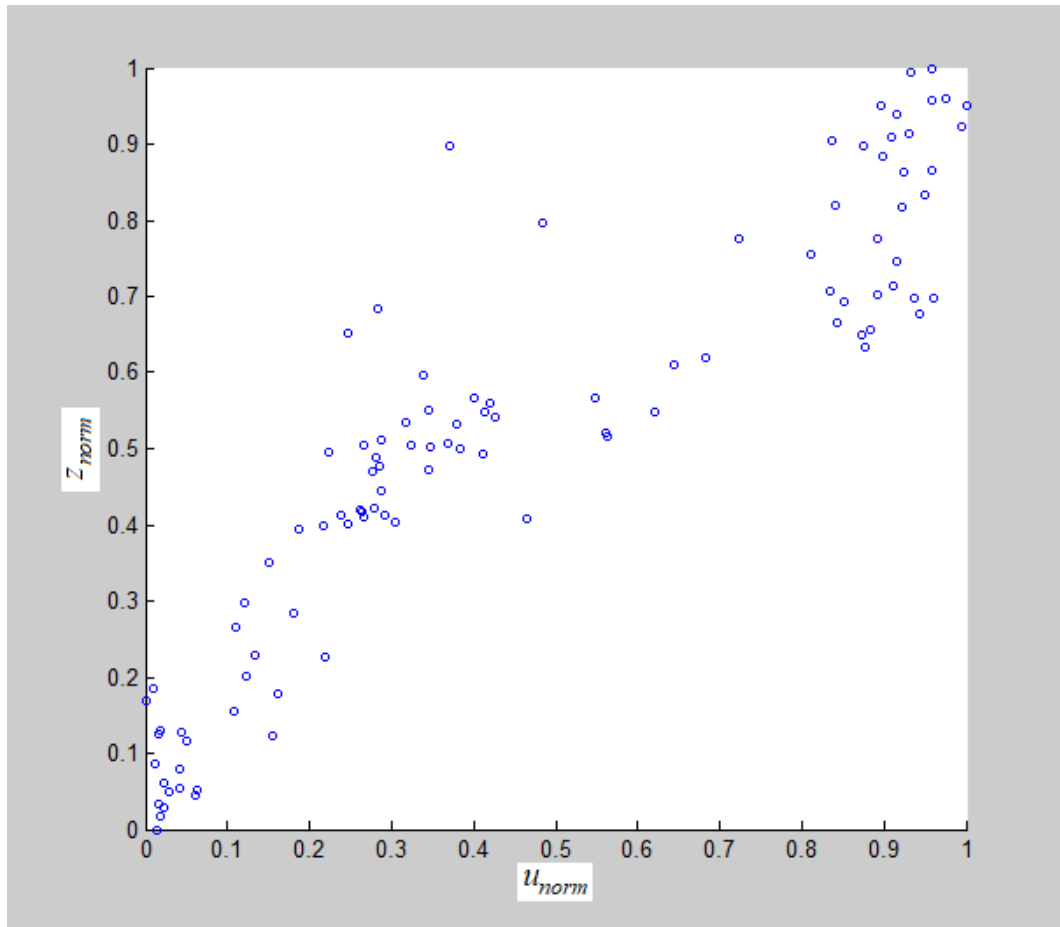


Рисунок 2.3 – Ілюстрація об'єднаної вибірки нормованих результатів вимірювань на перехрестях вулиць Руська – Замкова – Шашкевича та Чехова – За Рудкою

На рис. 2.3 по осі абсцис відкладено нормовані значення вимірюної інтенсивності автотранспортних потоків, обчислені за такою формулою:

$$u_{norm} = \frac{u_k - u_{min}}{u_{max} - u_{min}},$$

по осі ординат відкладено нормовані значення центрів інтервалів вимірюної концентрації діоксиду азоту, обчислені за такою формулою:

$$z_{norm} = \frac{z_k - z_{min}}{z_{max} - z_{min}}.$$

Провівши кластерний аналіз цієї вибірки відповідно до вище описаного методу субтрактивної кластеризації із застосуванням функції “subclust” програмно-прикладного пакету MATLAB та однойменної мови програмування, отримаємо результат, який наведено на рис. 2.4.

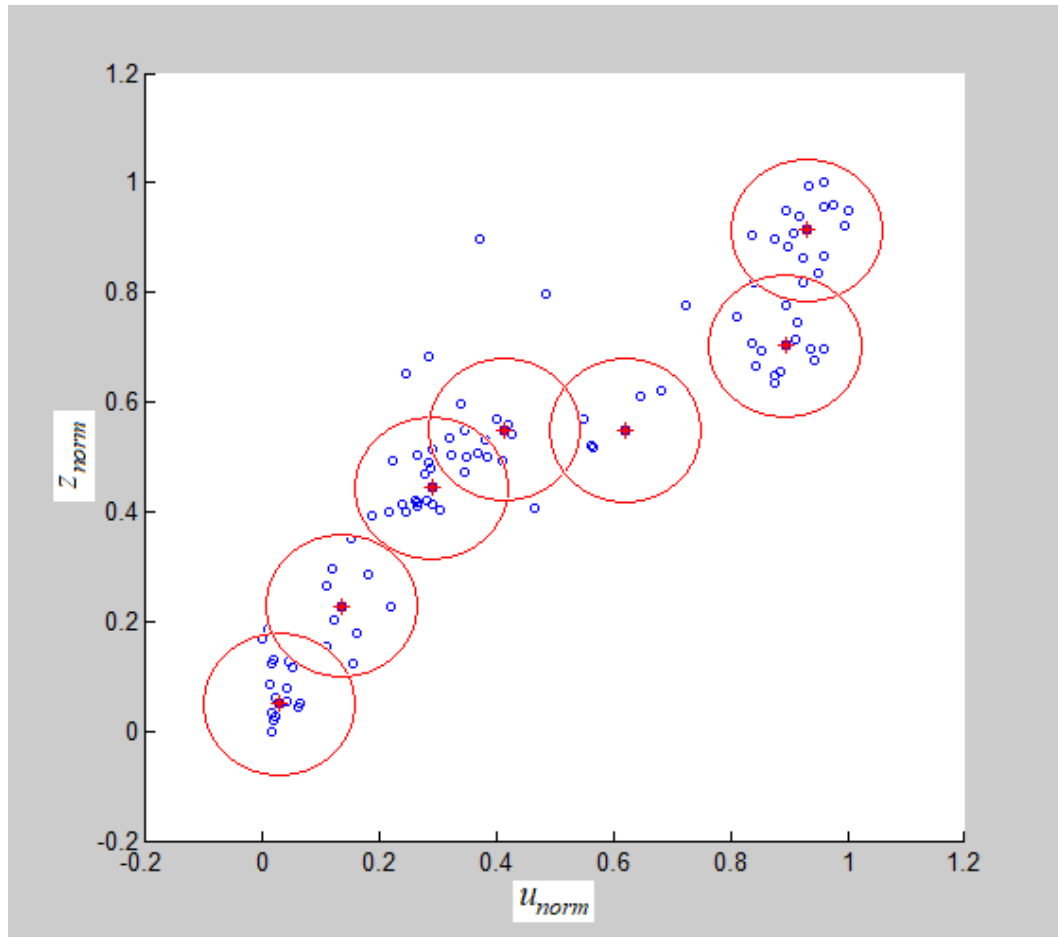


Рисунок 2.4 – Результат кластерного аналізу вибірки нормованих результатів вимірювань на перехрестях вулиць Руська – Замкова – Шашкевича та Чехова – За Рудкою

Зауважимо, що при цьому радіус усіх кластерів однаковий, розрахований на основі аналізу нормованої вибірки інтервальних даних за формулою (2.19):

$$r = \frac{\max_{k=1, \dots, K} (z_k^+ - z_k^-)}{2} = 0,135.$$



Як бачимо з рис. 2.4, отримані кластери перетинаються. Більше того, на рис. 2.5 показано, що проєкції кластерів на вісь вхідної змінної (інтенсивності автотранспортного потоку), які є інтервалами, також перетинаються. Це означає, що умова (2.20) не виконується. Тому застосовуємо для усіх дискрет вибірки перетворення (2.14) і для перетвореної вибірки повторюємо процедуру кластеризації.

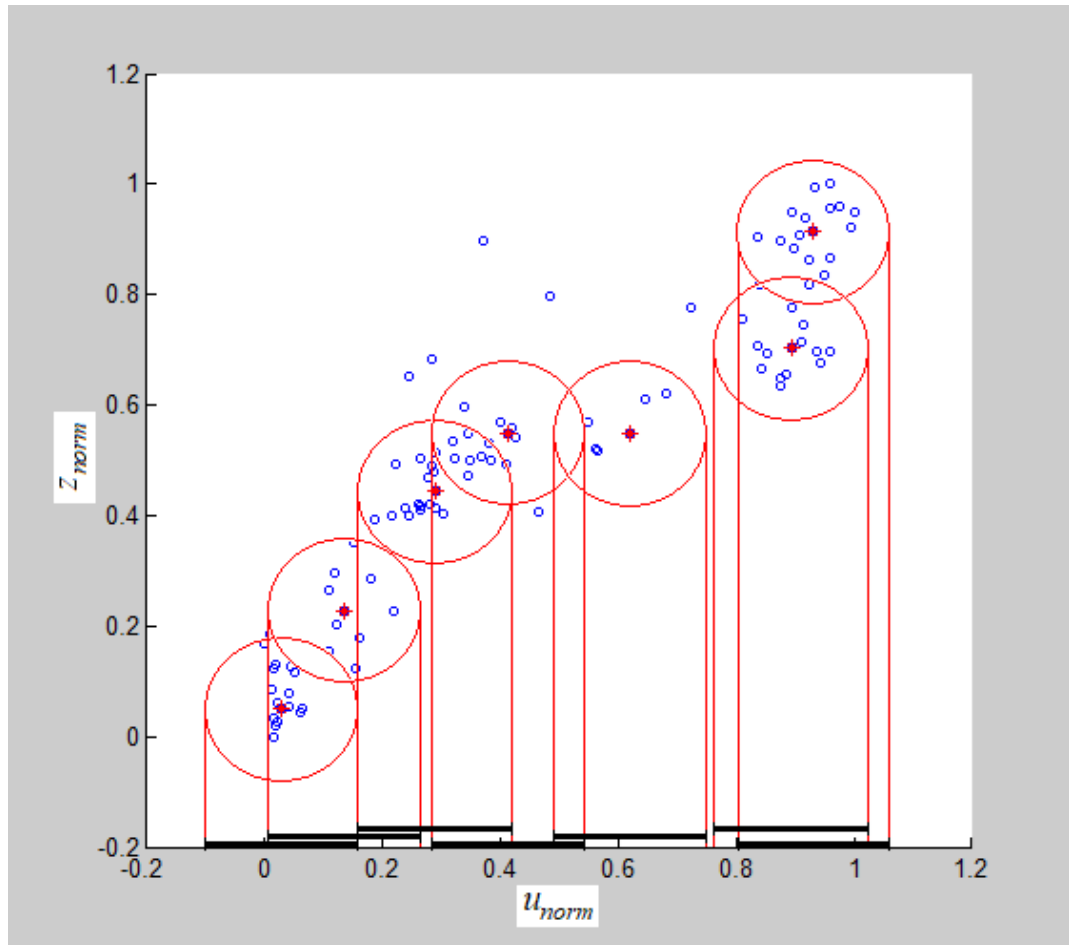


Рисунок 2.5 – Інтервали проєкцій кластерів на вісь вхідної змінної для вихідної вибірки

Результати перетворення (2.14) усіх дискрет вибірки та результати кластеризації цієї вибірки наведено відповідно на рис. 2.6 та рис. 2.7.

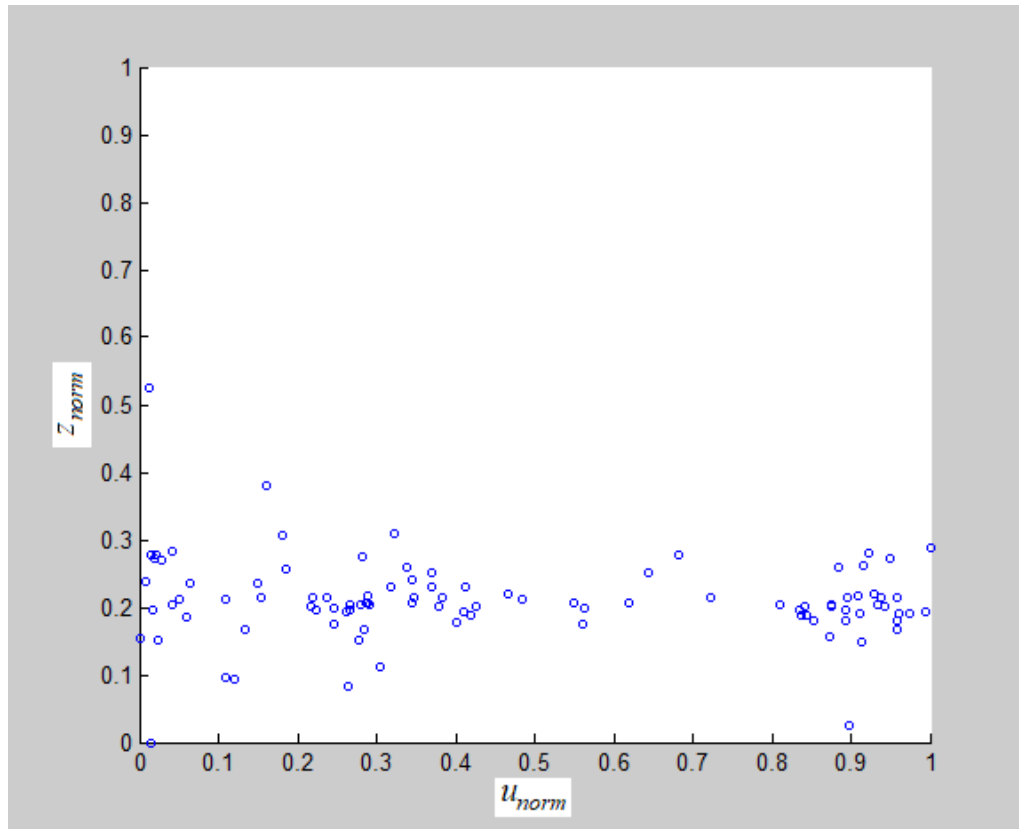


Рисунок 2.6 – Результати перетворення усіх дискрет вибірки (перша ітерація)

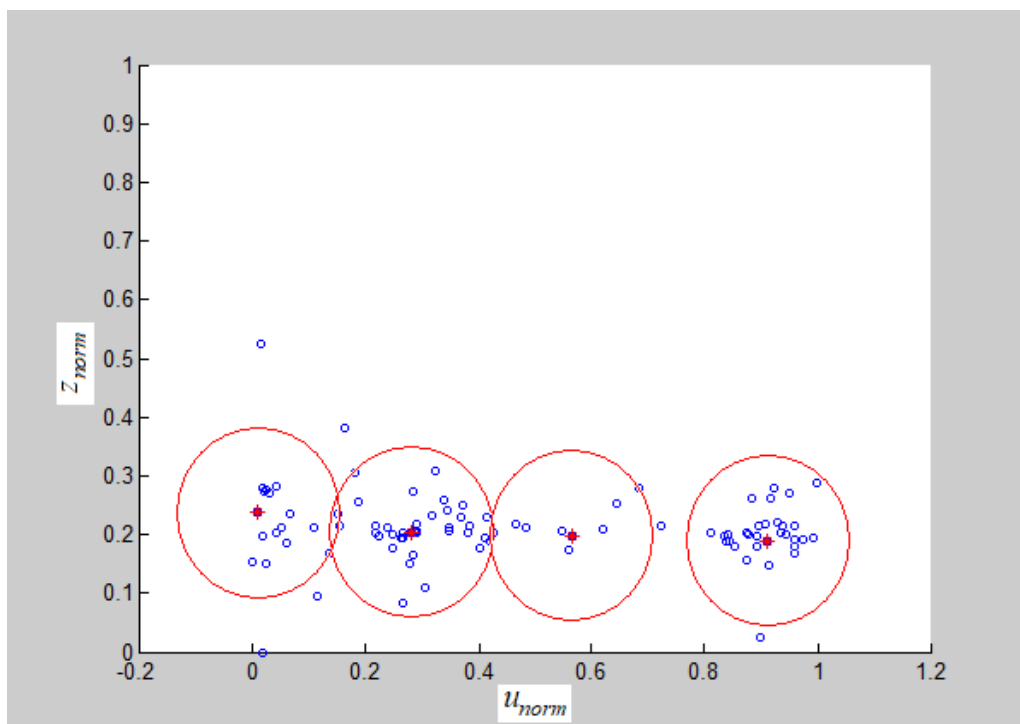


Рисунок 2.7 – Результат кластеризації перетвореної на першій ітерації вибірки

Як бачимо, в результаті диференціювання відбувається впорядкування вхідної вибірки та кластерів вздовж лінії, паралельної осі абсцис, на якій зазначено інтенсивність автотранспортних потоків. На наш погляд, це означає, що гіпотеза про адитивність похибок, які пов'язані з невизначеністю через неоднорідність середовища поширення шкідливих речовин, а також через різні умови в точках, в яких проводилися вимірювання, підтверджується.

Таким чином, запропонована схема усунення неоднозначності між вхідною та вихідною змінними в даному випадку дає бажаний ефект.

Варто також зазначити, що окремі вимірювання концентрацій шкідливих викидів випадають з даної схеми. Це впливає з рис. 2.7. Таких точок нараховується 5. Будемо вважати, що отримані відхилення значень концентрацій пов'язані з дією інших випадкових чинників, які неможливо врахувати при моделюванні цієї залежності.

На рис. 2.8 наведено проєкції кластерів на вісь вхідної змінної (інтенсивності автотранспортного потоку) для першої ітерації.

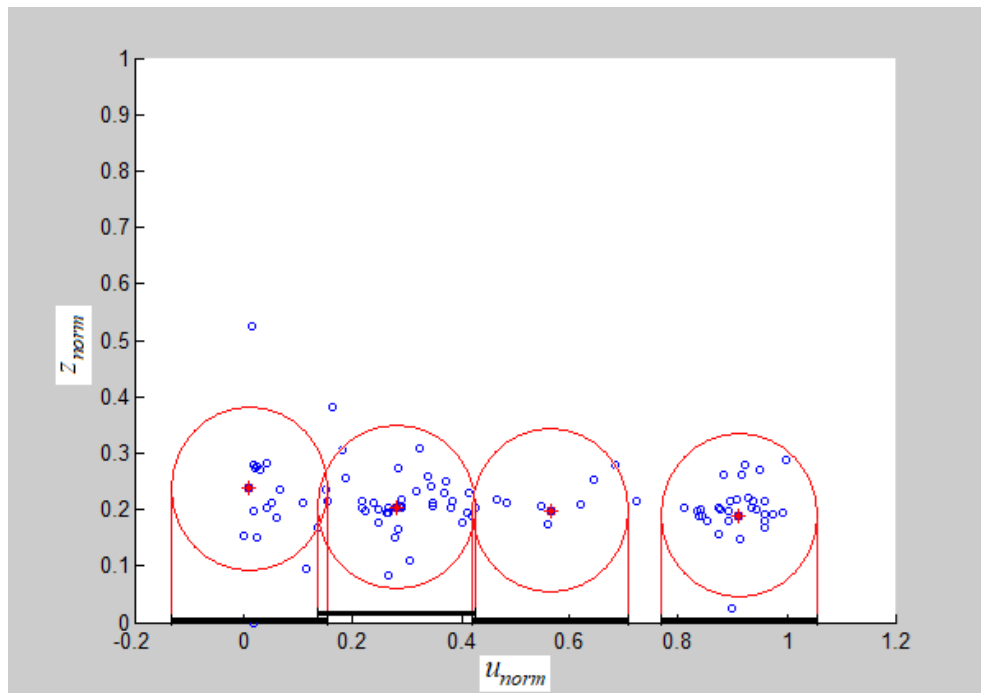


Рисунок 2.8 – Інтервали проєкцій кластерів на вісь вхідної змінної на першій ітерації перетворення вибірки

Як бачимо з цього рисунку, інтервали проєкцій в цьому випадку перетинаються тільки для першого, другого та третього кластерів, але, все-таки, умова (2.20) не виконується. Тому доцільно повторити наступну ітерацію запропонованого методу.

Отже, застосовуємо для усіх дискрет вибірки перетворення (2.14) і для перетвореної вибірки повторюємо процедуру кластеризації.

Результати перетворення (2.14) усіх дискрет вибірки та результати кластеризації цієї вибірки наведено відповідно на рис. 2.9 та рис. 2.10.

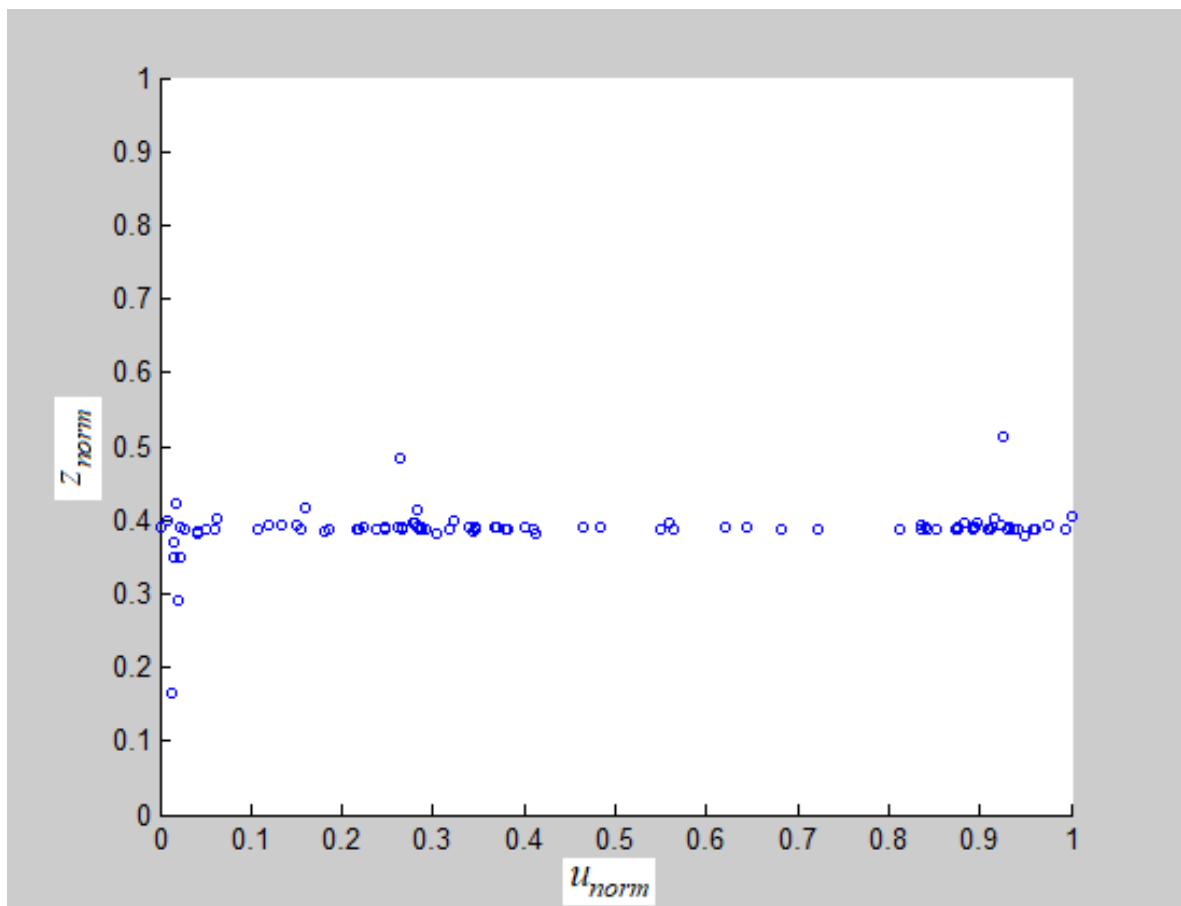


Рисунок 2.9 – Результат перетворення усіх дискрет вибірки на другій ітерації

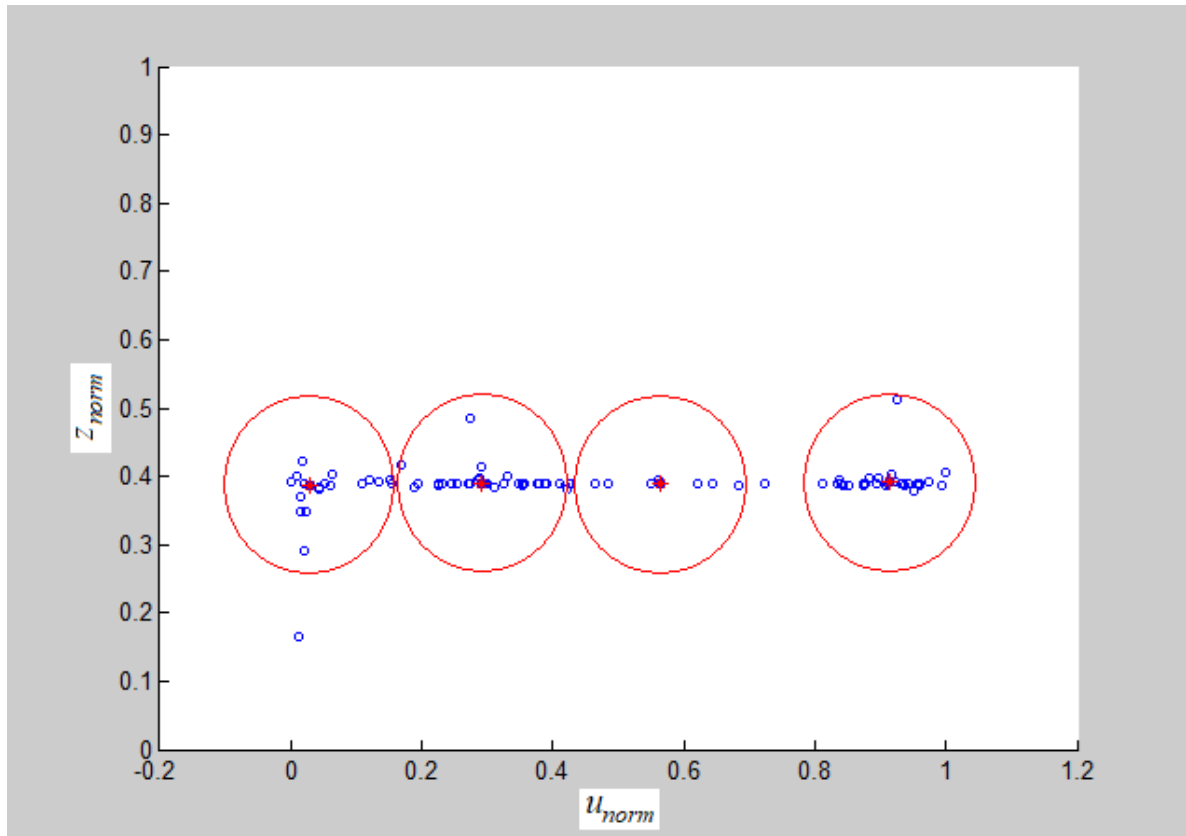


Рисунок 2.10 – Результат кластеризації перетвореної на другій ітерації вибірки

Як бачимо з рис. 2.9 та 2.10, також спостерігається тенденція орієнтації усіх кластерів вздовж однієї лінії, паралельної осі абсцис. При чому, ця тенденція посилюється після повторного перетворення вибірки, що підтверджує висунуту гіпотезу про адитивність (близькість до адитивності) неврахованих умов, які представлені у виразі (2.11) складовою  $G(\lambda_s)$ . Також, варто зазначити, що кількість точок, які не входять в жоден кластер, зменшилася до двох, як це видно з рис. 2.10.

На рис. 2.11 наведено проєкції кластерів на вісь вхідної змінної (інтенсивності автотранспортного потоку) за результатами цієї ітерації. Як бачимо з цього рисунку, інтервали проєкцій в цьому випадку не перетинаються, а це означає, що умова (2.20) виконується.

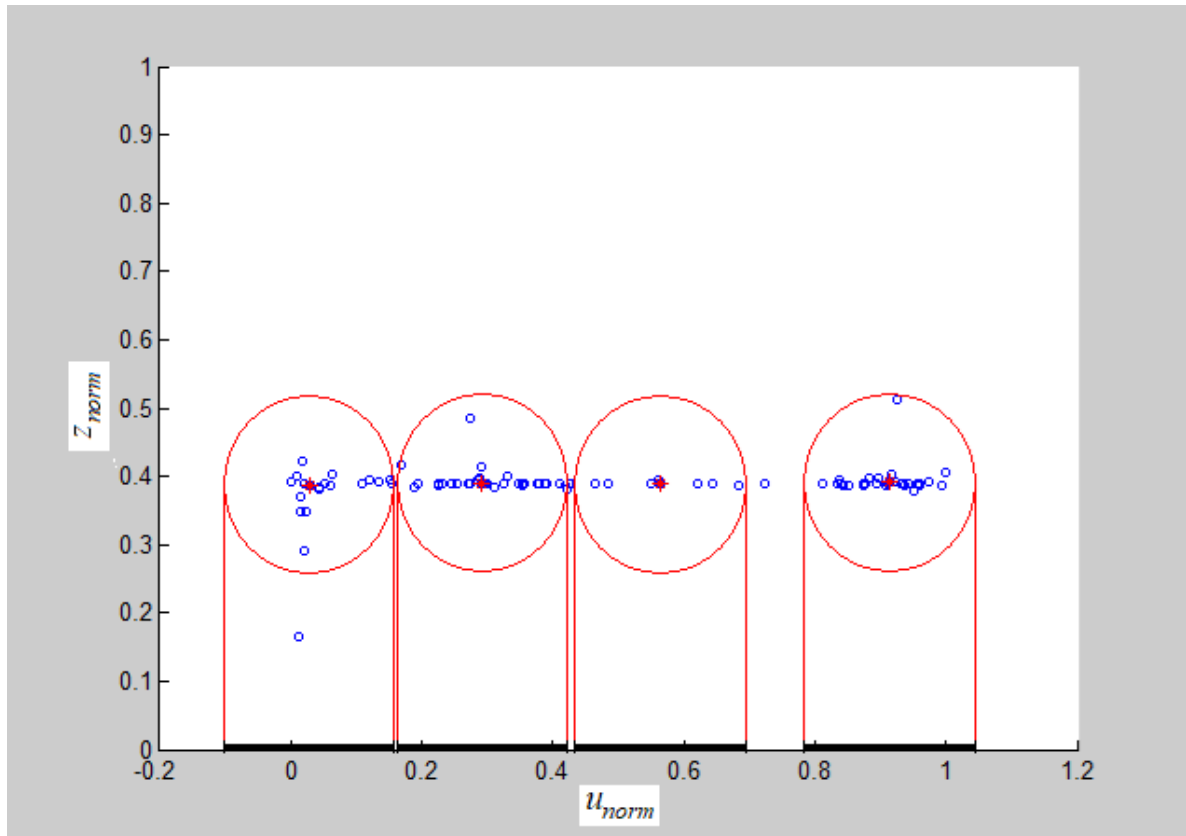


Рисунок 2.11 – Інтервали проєкцій кластерів на вісь вхідної змінної для другої ітерації

Таким чином, у результаті проведеного аналізу вибірки даних для розглянутого прикладу, вдалося з'ясувати причину неможливості побудови єдиної моделі для дослідження динаміки концентрацій діоксиду азоту на цих перехрестях внаслідок забруднень автотранспортом, а саме – через неоднозначність зв'язку між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспорту для різних точок міста. Як витікає з проведеного аналізу, для усунення цієї проблеми необхідно при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації додати до множини структурних елементів (табл. 2.1) такі структурні елементи:

$$f_i^s(\bullet) = \frac{z_{k-1} - z_{k-2}}{u_{k-1} - u_{k-2}} \quad \text{та} \quad f_j^s(\bullet) = \frac{z_{k-1} - 2z_{k-2} + z_{k-3}}{u_{k-1} - 2u_{k-2} + u_{k-3}}. \quad (2.24)$$

Результати структурної ідентифікації єдиної ІДДМ концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту, придатної для прогнозування і на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя, і на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя, а також на частині інших перехресть з урахуванням отриманих у цьому розділі результатів (доданих структурних елементів до початкової таблиці структурних елементів), наведено у розділі 4.

## Висновки до розділу 2

1. Досліджено часові характеристики методу структурної ідентифікації ІДДМ, який ґрунтується на поведінковій моделі бджолоїної колонії. Отримано співвідношення, які кількісно визначають його обчислювальну складність. Показано, що до найвищої часової складності призводить наявність в процедурі структурної ідентифікації можливого ходу обчислень по двох зовнішніх циклах. Перший цикл пов'язаний із потребою вибору нових структурних елементів із множини  $F$ , коли інші структури «вичерпані», а другий – передбачає оновлення початкового набору структурних елементів.

2. Встановлено, що визначальним фактором щодо обчислюваної складності реалізації методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії є якість формування початкової множини структурних елементів, яку в існуючому методі формували емпірично. Відповідно, розроблено метод формування множини структурних елементів із використанням обґрунтованих процедур попереднього аналізу вибірки інтервальних даних.

3. Удосконалено метод структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолоїної колонії, який, на відміну від існуючого, містить процедури автоматизованого формування набору структурних

елементів на основі методу субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних, що забезпечує підвищення якості формування початкової множини структурних елементів і, тим самим, – зниження обчислювальної складності реалізації методу.

4. Запропоновано алгоритм реалізації процедури автоматизованого формування набору структурних елементів в задачі структурної ідентифікації на основі методу субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних. Наведено приклад його застосування для випадків, коли у вхідній вибірці є неоднозначність та неоднорідність.



### РОЗДІЛ 3

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ

У попередньому розділі розглянуто методи структурної та параметричної ідентифікації ІДДМ концентрацій шкідливих викидів автотранспорту. Математичні моделі, за допомогою яких описується динаміка концентрацій у заданих точках, є різницеvими рівняннями – дискретними аналогами нелінійних диференціальних рівнянь.

В цьому розділі наведено результати розробки засобів для моделювання процесів динаміки забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, які включають засоби отримання результатів вимірювань концентрацій шкідливих викидів, комплекс програм для ідентифікації математичних моделей зазначених процесів, а також алгоритми реалізації цих методів.

Матеріали цього розділу ґрунтуються на результатах опублікованих автором у працях [8, 30, 67].

### **3.1. Інформаційна технологія для моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту**

Екологічне регулювання процесів забруднення атмосфери вихлопними газами автотранспорту вимагає створення інструментарію, придатного для розв'язування послідовності таких задач: від отримання даних із сенсорів забруднюючих речовин та попереднього їх опрацювання – до побудови моделей процесів динаміки забруднення атмосфери та візуалізації результатів моделювання.

З одного боку, такий підхід вимагає інтеграції різноманітних методів представлення концентрацій хімічних речовин за допомогою параметрів електричних сигналів, а потім перетворення цих параметрів у чисельні характеристики, які є даними про забруднення, методів попередньої обробки цих даних та методів побудови на їх основі математичних моделей процесів забруднення атмосфери. З іншого боку, необхідними є розробка та інтеграція програмних засобів реалізації цих методів в єдине ціле. Варто зазначити, що усі методи та програмні засоби їх реалізації повинні бути інтегровані з відповідними апаратними засобами, такими як: сенсори хімічних речовин та засоби перетворення концентрацій цих речовин в цифрові дані, засоби передачі даних, засоби їх попередньої комп'ютерної обробки, обчислювальні засоби для побудови комп'ютерних моделей та візуалізації результатів моделювання.

На основі вище сформульованих вимог створено інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів динаміки забруднення атмосфери вихлопними газами автотранспорту. Схему реалізації інформаційної технології наведено на рис. 3.1.

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

В інформаційній технології також інтегровано технічні засоби та відповідні програмні модулі: сенсори концентрацій шкідливих викидів автотранспорту (зокрема, «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037»), в яких також вмонтовано сенсори для визначення температури і вологості повітря, сенсори для вимірювання інтенсивності автотранспортних потоків, які разом із сенсорами для вимірювання концентрацій шкідливих викидів підключено до

одноплатних комп'ютерів Raspberry Pi 3, що здійснюють попередню обробку результатів вимірювань. Кожен одноплатний комп'ютер обладнаний також GSM-модулем, через який здійснюється передача даних до центрального сервера.

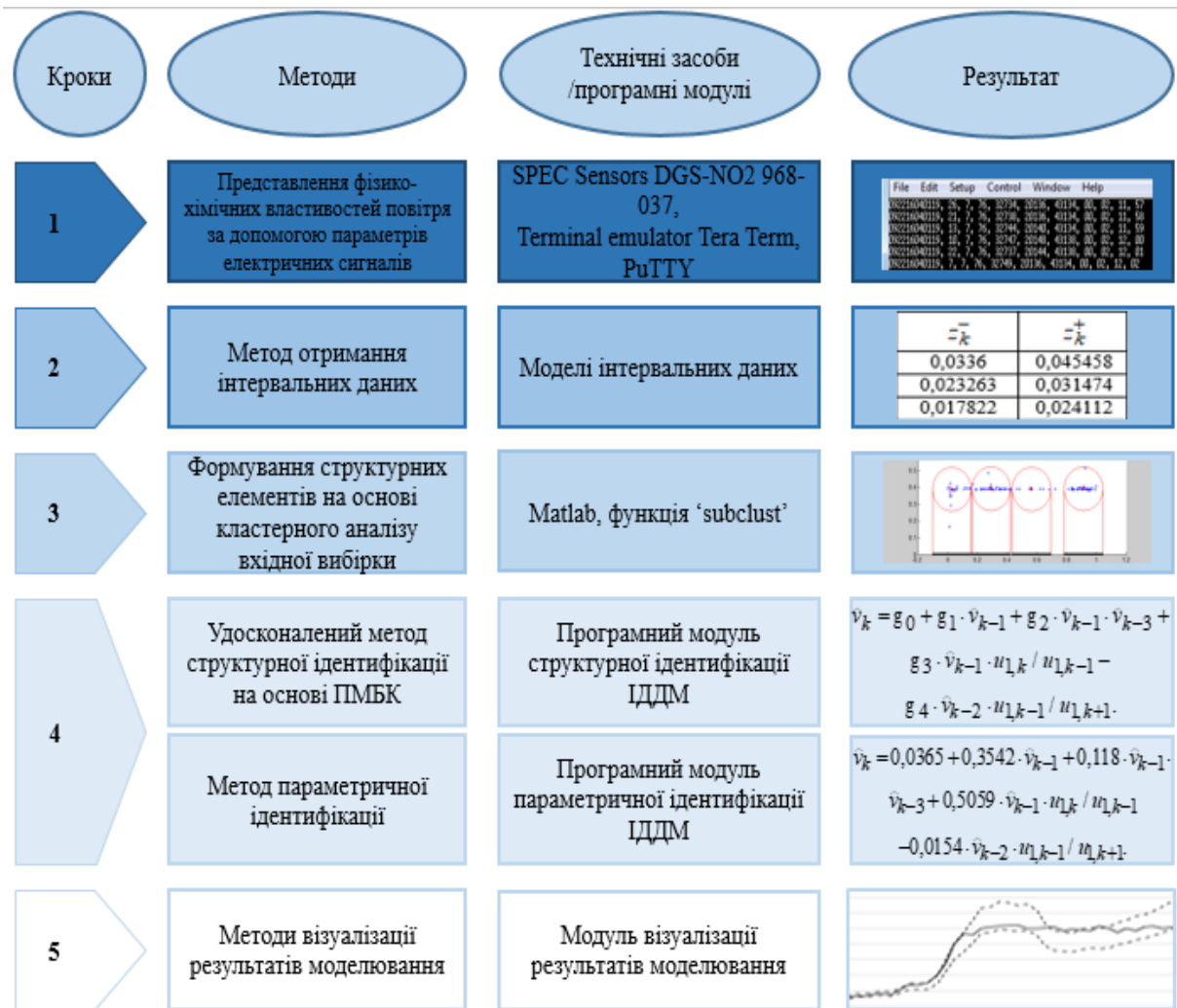


Рисунок 3.1 – Схема реалізації інформаційної технології для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери вихлопними газами автотранспорту

Для інтеграції зазначених методів та засобів реалізовано відповідне програмне забезпечення: драйвери сенсорів (Tera Term та PuTTY); програмний модуль, який перетворює результати вимірювань сенсорів у інтервальні дані; програмний модуль для проведення описаного вище кластерного аналізу вибірки вхідних даних; програмні модулі для

структурної та параметричної ідентифікації ІДДМ; програмний модуль візуалізації результатів моделювання.

Побудову математичних моделей у вигляді ІДДМ та моделювання процесів динаміки забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту із застосуванням представленої інформаційної технології здійснюємо покроково:

Крок 1. Отримання даних про забруднення та інтенсивність автотранспортних потоків.

На даному етапі використовуємо програмно-технічні засоби для отримання даних про забруднення атмосферного повітря та інтенсивність автотранспортних потоків. Зокрема, із застосуванням сенсора «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037» (в який також вмонтовано сенсори визначення температури та вологості повітря) [48], отримуємо дані про концентрації діоксиду азоту у повітрі у дискретні моменти часу; сенсора визначення відстані «Sharp GP2Y0A710K» [5] – встановлюємо кількість автотранспортних одиниць, які перетинають ділянку дорожнього полотна, контрольовану даним сенсором.

Сенсор для вимірювань концентрації діоксиду азоту укомплектований перехідником UART-to-USB, що дозволяє підключити його до комп'ютера (PC/Raspberry Pi 3) через USB інтерфейс. Сенсор функціонує за допомогою встановленого драйвера. Вимірювання миттєвих концентрацій діоксиду азоту проводяться щосекунди.

Сенсор визначення відстані під'єднаний до плати Raspberry Pi 3 за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) «Microchip MCP3008» [32] (у плату не вмонтовано жодного аналогового входу). Отримані дані відправляються на сервер за допомогою GSM-модуля для подальшої обробки.

Крок 2. Представлення отриманих даних в інтервальному вигляді.

Відносні похибки вимірювань зазначених сенсорів знаходяться в діапазоні від 10% до 50%. З огляду на цей факт, достатньо побудувати математичну модель процесів динаміки забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту з точністю, яка еквівалентна точності вимірювального експерименту. При цьому, доцільно представляти експериментальні дані у вигляді інтервалів можливих значень концентрації відповідної шкідливої речовини:

$$[z_k^-(x, y); z_k^+(x, y)], k = 1, \dots, K \quad (3.1)$$

де  $z_k^-(x, y), z_k^+(x, y)$  – нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірної концентрації шкідливої речовини в приземистому шарі атмосфери у точці з координатами  $x, y$  та у дискретний момент часу  $k=1, \dots, K$ , відповідно.

У вимірювальному експерименті нижня та верхня межі інтервалу можливих значень вимірної концентрації шкідливої речовини встановлюємо на основі відносної похибки вимірювального пристрою:  $z_k^-(x, y) = z_k(x, y) - z_k(x, y) \cdot \varepsilon$  і  $z_k^+(x, y) = z_k(x, y) + z_k(x, y) \cdot \varepsilon$ , де  $z_k(x, y)$  – вимірне значення концентрації шкідливої речовини;  $\varepsilon$  – відносна похибка вимірювання. У випадку використання сенсора рівня концентрації діоксиду азоту типу «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037» відносна похибка складає  $\varepsilon = 15\%$ .

Варто зазначити, що у встановленому інтервалі вимірної концентрації враховано тільки межове значення похибки вимірювання.

Крок 3. Формування структурних елементів на основі кластерного аналізу вибірки інтервальних даних.

Виконання даного кроку забезпечує «якість» та повноту сформованого набору структурних елементів шляхом здійснення перевірки наявності однозначної залежності між вихідними характеристиками процесу та

чинниками, які впливають на ці характеристики із застосуванням кластерного аналізу вибірки даних.

Вказана процедура передбачає виконання наступних дій.

1. Формування набору вхідних даних у вигляді (2.15):

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

Тобто, необхідно до отриманих результатів виконання першого кроку технології додати  $u_{p,k}$  – значення вхідних змінних із часовими дискретами  $k=1, \dots, K$ . У нашому випадку цими вхідними змінними вважатимемо температуру та вологість середовища, а також, обов'язково, інтенсивність транспортних потоків.

2. Перевірка однозначної залежності між концентрацією шкідливої речовини та інтенсивністю автотранспортного потоку.

З цією метою використовуємо метод субтрактивної кластеризації вибірки даних (2.15) на основі субтрактивного методу кластеризації. Для цього в середовищі MATLAB використано функцію «subclast», але в модифікованому варіанті, як описано у 2 розділі.

Результатом проведеної кластеризації є певна кількість кластерів, яка залежить від похибки вимірювання концентрацій. Однозначна залежність між вихідною характеристикою – концентрацією шкідливої речовини в приземному шарі атмосфери та інтенсивністю автотранспортних потоків буде забезпечена у тому випадку, коли проєкції кластерів на вісь абсцис – інтенсивності транспорту – не перетинаються, тобто, коли виконується умова (2.20).

Варто зазначити, що виконання умови (2.20) є необхідним для того, щоб прийняти остаточне рішення щодо повноти множини початкових структурних елементів для задачі структурної ідентифікації. Якщо зазначена умова виконується для початкової вибірки (2.15), то це означає, що

невизначеність у вибірці пов'язана виключно з похибками вимірювання концентрацій шкідливих речовин, а саму вибірку можемо вважати однорідною. Тоді набір структурних елементів визначається тільки порядком різницевого рівняння і в цьому сенсі процедуру формування структурних елементів на основі кластерного аналізу можемо вважати завершеною.

У протилежному випадку, до вибірки (2.15) на першій ітерації, або до перетвореної вибірки (2.22) – на інших ітераціях, – застосовуємо процедуру формування додаткового набору структурних елементів, яка визначається виразом (2.14).

3. Формування додаткового набору структурних елементів.

З цією метою використовуємо перетворення (2.14):

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

тим самим, додаємо до початкового набору структурних елементів елементи у вигляді (2.21):

$$\frac{z_k - z_{k-1}}{u_k - u_{k-1}}, k = 1, \dots, K.$$

4. Модифікація поточної вибірки даних (на першій ітерації – вибірки (2.15)).

Модифікована на першій ітерації вибірка набуває такого вигляду (2.22):

$$\left( \frac{z_k - z_{k-1}}{u_k - u_{k-1}}, u_k \right).$$

Після виконання цього перетворення повертаємося до процедури перевірки однозначності залежності між концентрацією шкідливої речовини та інтенсивністю транспортного потоку (дія 2).

Варто зазначити, що на другій ітерації існуючий набір структурних елементів доповнюємо такими:

$$\frac{z_k - 2z_{k-1} + z_{k-2}}{u_{p,k} - 2u_{p,k-1} + u_{p,k-2}},$$

а на наступних – скінченими різницями вищих порядків.

#### Крок 4. Структурно-параметрична ідентифікація моделі.

Даний крок об'єднує удосконалений метод структурної ідентифікації у вище описаний спосіб уведення процедури автоматичного формування набору структурних елементів та параметричної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей.

Реалізацію методу структурної ідентифікації здійснюємо на основі поведінкової моделі бджолиної колонії [2, 24, 25, 42-44, 47, 98], який містить процедури автоматизованого формування набору структурних елементів на основі методу субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних, наведених у 2 розділі, що забезпечує підвищення якості формування початкової множини структурних елементів і, тим самим, зниження обчислювальної складності реалізації цього методу. Параметричну ідентифікацію проводимо із застосуванням методу випадкового пошуку з використанням направляючого конуса Растрігіна [103, 104] та аналізу інтервальних даних.

У результаті введеної схеми формування структурних елементів, розглянутої на 3 кроці розробленої технології, удосконалюємо схему реалізації методу структурної ідентифікації, яка описана у 2 розділі. Зокрема, зазначене удосконалення зменшує кількість циклів синтезу поточних структур ІДДМ  $\lambda_s = \{f_1^s(\bullet) \cdot g_1^s; f_2^s(\bullet) \cdot g_2^s; \dots; f_{m_s}^s(\bullet) \cdot g_{m_s}^s\} \subset \Lambda$ , оскільки в



наборі структурних елементів  $f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s \in F$  є елементи, необхідні для побудови адекватних ІДДМ. Це, в свою чергу, дає можливість зменшити кількість ітерацій параметричної ідентифікації для поточних структур.

Таким чином, на відміну від схеми організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ, наведеної на рис. 2.1, на першому кроці цієї схеми спочатку формується множина структурних елементів  $F$  на основі кластерного аналізу вибірки інтервальних даних. До речі, від його результату залежатимуть значення параметрів алгоритму:  $MCN$ ,  $LIMIT$  та  $S$ . Як правило, ці значення будуть меншими у порівнянні із відомим методом.

Процедури обчислення, які позначено на рис. 2.1 блоками 1–6 залишаються незмінними, тобто вони передбачають послідовне застосування операторів формування та перетворення множини структур:  $P_{init}(m_s, F)$ ;  $P(\Lambda_{mcn}, F)$ . Далі застосовуємо оператор  $D_1(\lambda_s, \lambda_s^1)$  попарної селекції множини структур ІДДМ першого ряду формування  $\Lambda_{mcn}^1$ , який реалізує процедуру синтезу «кращої» структури виходячи зі значень функції мети. Потім, застосовуючи оператор  $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F, R_s)$ , здійснюємо синтез множини поточних структур для кожної відібраної структури із  $S$ , що в контексті поведінкової моделі бджолоїної колонії означає дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками, а процес відбору множини кращих структур здійснюємо оператором  $D_2(\lambda_s, \Lambda_s^1)$  у спосіб погрупової селекції множини структур ІДДМ другого ряду формування  $\Lambda_{mcn}^2$ .

У випадку відсутності структур, які дають можливість побудувати адекватні моделі, використовуючи оператор  $P_N(F, I_{min}, I_{max})$ , здійснюємо генерування випадковим чином «нової» структури ІДДМ.

Варто зазначити, що значення функції мети цієї оптимізаційної задачі розраховуємо у процесі розв'язування задачі параметричної ідентифікації ІДДМ.

У цьому випадку, в схемі організації обчислень у методі структурної ідентифікації ІДДМ на рис. 2.1, зменшується кількість проходження двох зовнішніх циклів обчислень, позначених  $F_{\text{construct}}$  та  $F_{\text{revision}}$ . Кожен з них в обчислювальному плані є складним через найбільшу кількість реалізацій методу параметричної ідентифікації. Нагадаємо, що перший цикл  $F_{\text{construct}}$  пов'язаний із потребою вибору нових структурних елементів із множини  $F$ , коли інші структури «вичерпані», а другий цикл –  $F_{\text{revision}}$  передбачає оновлення початкового набору структурних елементів. Обидва покращення пов'язано із додаванням до набору  $f_i^s(\bullet) \cdot g_i^s \in F$  апіорі необхідних елементів, визначених на третьому кроці інформаційної технології.

Результатом виконання процедури структурної ідентифікації є встановлення елементів різницевого рівняння, зокрема: вектора базисних функцій  $\vec{f}^T(\bullet)$ ; наборів та розмірності векторів вхідних змінних (температура та вологість повітря, інтенсивність автотранспортних потоків тощо)  $\vec{u}_{p,0}, \dots, \vec{u}_{p,k}$ ; порядку різницевого рівняння  $d$ , який, як відомо, еквівалентний порядку диференціального рівняння (аналог різницевої схеми), а також вектора параметрів РР  $\vec{g}$ .

Отримані ІДДМ слугують основою для прогнозування динаміки забруднень в різних ділянках міста із урахуванням початкових умов середовища та знижують кількість високовартісних вимірювань цих забруднень.

Крок 5. Методи візуалізації результатів моделювання із застосуванням отриманих математичних моделей.

На цьому кроці здійснюємо візуалізацію результатів моделювання, а також запис цих даних в базу даних для формування протоколів динаміки забруднень. Приклад відображення результатів застосування модуля проілюстровано на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 – Візуалізація результатів моделювання денного циклу динаміки концентрацій діоксиду азоту

Програмні модулі, які використовуємо на кроках 2, 4, 5, виконані в середовищі MS Visual Studio та написані мовою програмування C#. Програмний модуль для кроку 3 виконаний у середовищі Matlab та написаний мовою Matlab.

Використання різних середовищ розробки та мов програмування пов'язано з наявним попереднім доробком інших авторів. Разом з тим, усі модулі інтегровані в єдину архітектуру програмної системи комп'ютерних засобів моделювання процесів поширення шкідливих викидів автотранспорту.

Детальний опис архітектури програмно-апаратного забезпечення для розробленої інформаційної технології та окремих її модулів наведено в наступному підрозділі.

### **3.2. Архітектура програмно-апаратної системи для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту**

Розглянемо архітектуру програмно-апаратної системи екологічного моніторингу, створену за результатами науково-дослідного проекту «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення

атмосфери автотранспортом» (0116U005507). Зазначена система забезпечує як побудову ІДДМ процесів забруднення атмосфери, так і оцінювання та прогнозування динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту.

Автоматизована система моніторингу шкідливих викидів автотранспорту виконує такі завдання:

- збір, накопичення та обробку інформації про забруднюючі атмосферу речовини, що є продуктами викиду відпрацьованих газів автомобілів, в залежності від інтенсивності автотранспортного потоку;
- моделювання ситуації щодо стану забруднення атмосферного повітря;
- прогнозування забруднення атмосферного повітря шкідливими викидами автотранспорту;
- забезпечує підтримку оперативних управлінських рішень.

Архітектура системи екологічного моніторингу представлена на рис. 3.3.

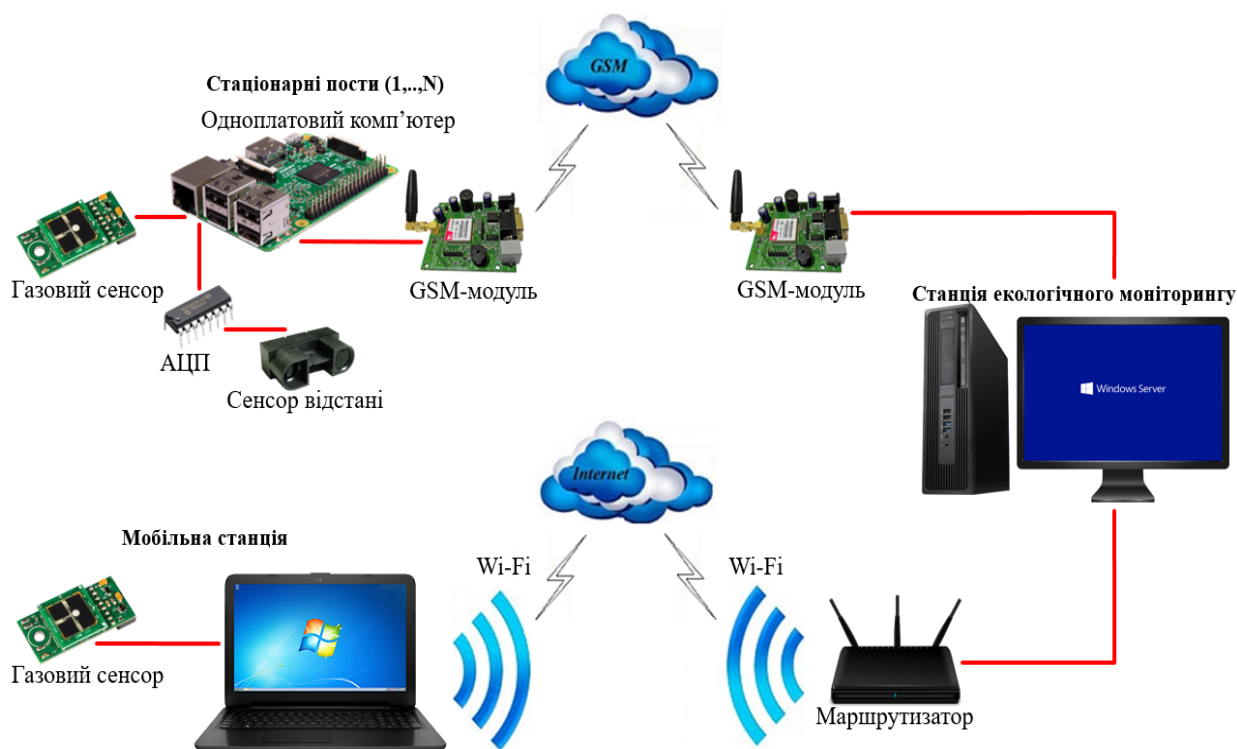


Рисунок 3.3 – Схематичне представлення архітектури системи екологічного моніторингу

Варто зауважити, що апаратне забезпечення представленої системи в більшій мірі зорієнтоване на контроль рівня концентрацій діоксиду азоту. Такий вибір обумовлений приналежністю діоксиду азоту до другого класу небезпеки за класифікацією шкідливих речовин. Розглянемо детальніше наведену архітектуру.

Технічні засоби, використані при розробці наведеної системи екологічного моніторингу:

- одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 3 (рис. 3.4);
- сенсор для вимірювання концентрацій діоксиду азоту DGS-NO2-968-037;
- інфрачервоний сенсор для вимірювання відстані Sharp GP2Y0A710K (100-550cm), який в проєкті використано для вимірювання кількості автотранспорту, який рухається на контрольованих ділянках дороги чи міста в цілому;
- аналого-цифровий перетворювач MCP3008;
- microSD картка для завантаження програмного забезпечення в стаціонарний модуль на базі одноплатного комп'ютера та для проміжного зберігання даних.



Рисунок 3.4 – Одноплатний комп'ютер Raspberry Pi

Стаціонарний пост вимірювання рівня концентрацій діоксиду азоту побудований на основі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 [46], газового сенсора для вимірювання концентрацій діоксиду азоту «SPEC

Sensors DGS-NO2 968-037» [48] (в який вмонтовано сенсори визначення температури та вологості повітря) та сенсора визначення відстані «Sharp GP2Y0A710K» [5] для встановлення кількості автотранспортних одиниць, які перетинають ділянку дорожнього полотна, контрольовану даним сенсором.

Один з найефективніших та найчутливіших сенсорів для вимірювання діоксиду азоту, придатних для поставленої задачі екологічного моніторингу, DGS-NO2-968-037, володіє рядом переваг, а саме:

- низька потужність – 1 мВт;
- компенсований вихід;
- простий цифровий інтерфейс UART;
- інтегровані сенсори температури та вологості;
- 10-річний термін служби;
- компактний форм-фактор;
- надається UART-міст для USB-адаптера.

Зображення сенсора та робочого вікна терміналу, який виводить результати вимірювань на екран, представлені на рис. 3.5 та 3.6 відповідно.



Рисунок 3.5 – Сенсор «SPEC Sensors DGS-NO2 968-037»

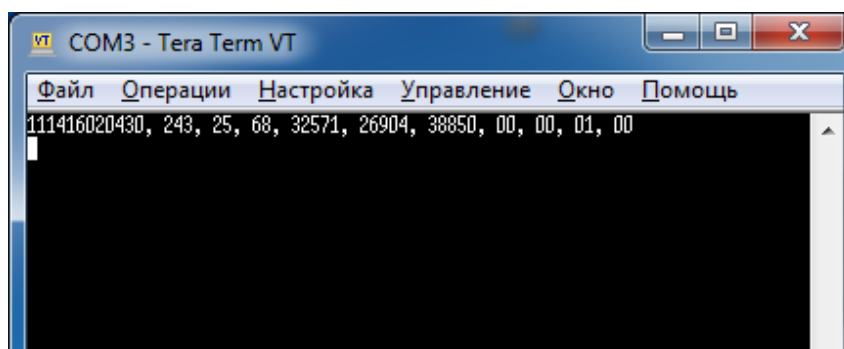


Рисунок 3.6 – Головне вікно терміналу TeraTerm

Сенсор для вимірювання концентрації діоксиду азоту укомплектований перехідником UART-to-USB, що дозволяє підключити його до комп'ютера через USB інтерфейс. Сенсор функціонує за допомогою встановлених драйвера та термінала. Вимірювання миттєвих концентрацій діоксиду азоту проводяться щосекунди. Дані записуються у log-файл.

Сенсор відстані SHARP (рис. 3.7) являє собою оптичний пристрій, здатний вимірювати відстань між собою і об'єктом за допомогою інфрачервоних передавача і приймача з використанням тріангуляції виміру відстані. Приймач апозиційно-чутливого детектора SHARP найбільш часто використовується для виявлення перешкод. Він працює так само, як давач близькості. Але для задачі важливо не просто знати, чи є будь-який об'єкт перед давачем, але і конкретну відстань до нього. У цьому випадку потрібно спочатку визначити відстань, на якій вважатимемо, що об'єкт знаходиться поруч.



Рисунок 3.7 – Вигляд давача відстані Sharp GP2Y0A710K

На відміну від інших подібних одноплатних комп'ютерів, Raspberry PI 3 не має жодного аналогового входу. Ця проблема вирішується за допомогою зовнішнього пристрою «Microchip MCP3008» [32], який виконує функцію перетворення аналогового сигналу в цифровий для подальшого опрацювання. Отримані дані від стаціонарних та мобільних постів вимірювання рівня концентрацій відправляються в момент отримання та попередньої обробки на сервер (станцію екологічного моніторингу) за допомогою GSM для подальшої обробки.

Мобільна станція вимірювання рівня концентрацій діоксиду азоту побудована на основі ноутбука зі встановленою операційною системою Windows та сенсора для вимірювання концентрацій діоксиду азоту, 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 діоксиду азоту проводяться щосекунди. Дані записуються у log-файл та передаються на сервер за допомогою Інтернет.

Варто зазначити, що мобільні станції для вимірювання рівня концентрацій переважно використовувалися для підготовки вибірки даних для ідентифікації ІДДМ процесів забруднення атмосфери, а також для верифікації запропонованого методу формування множини структурних елементів та удосконаленого методу структурної ідентифікації.

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

Станція екологічного моніторингу організована на базі серверного обладнання, на якому містяться: база даних виміряних 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 удосконаленого методу структурної ідентифікації [9, 11, 12].

Також, на сервері реалізована веб-орієнтована система для відображення результатів моделювання та архівних даних рівня концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в атмосферному повітрі м. Тернополя.



### 3.3. Архітектура програмної системи

Існують різні види архітектур, які успішно застосовуються для реалізації різноманітних програмних продуктів. Однією із найсучасніших є мікросервісні архітектури, зорієнтовані на функціонування в хмарних технологіях. Проте, в даному випадку використана локальна трирівнева архітектура, яка передбачає поділ додатку на три рівні: відображення, бізнес-логіки та рівень доступу до даних. На рис. 3.8 наведено розроблену архітектуру програмної системи для автоматизації процесу моніторингу та візуалізації забруднення приземистого шару атмосфери шкідливими викидами автотранспорту.

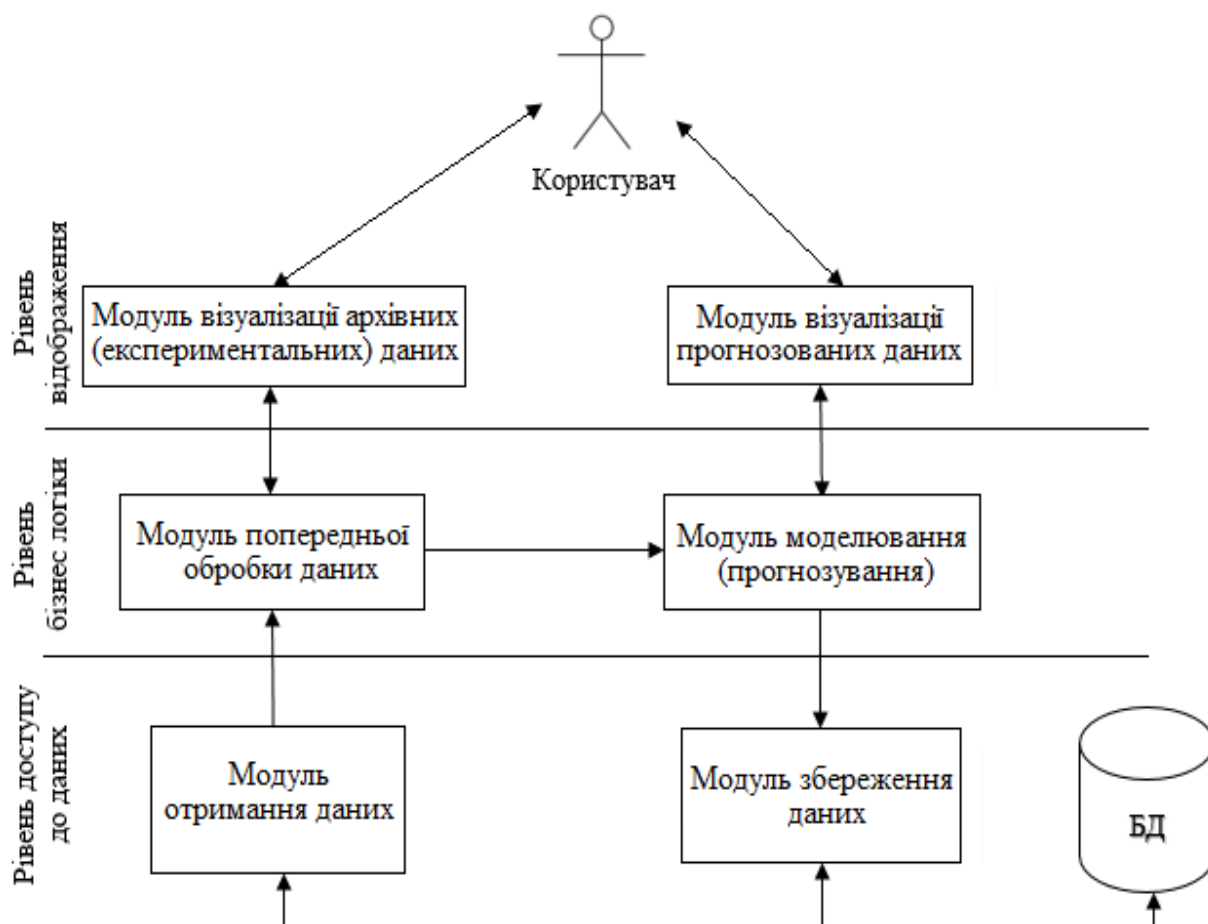


Рисунок 3.8 – Архітектура програмної системи для моделювання атмосфери автотранспортом

Як видно з рис. 3.8, в даному типі архітектури виділено три логічні рівні:

- рівень інтерфейсу користувача (рівень відображення);
- рівень обробки даних (рівень бізнес-логіки);
- рівень доступу до даних.

На першому рівні представлені модулі, з якими працює користувач і які призначені для візуалізації отриманих результатів дослідження.

На другому рівні проводиться обробка даних. Даний рівень представлений такими модулями:

- модуль обробки даних, призначений для попередньої обробки вхідних даних;
- модуль моделювання (прогнозування) – основний модуль системи, який, власне, і реалізує процес прогнозування концентрацій шкідливих викидів автотранспорту у конкретній точці міста на основі реалізованих обчислювальних процедур структурно-параметричної ідентифікації.

На рівні доступу до даних зберігаються модулі, через які модулі рівня бізнес-логіки взаємодіють з базою даних за допомогою CRUD-операцій.

На рис. 3.9 проілюстровано розміщення модулів системи для моделювання забруднення атмосфери автотранспортом. Як видно з даного рисунка, модулі розташовані на різному апаратному забезпеченні.

Мобільна станція вимірювань рівня діоксиду азоту побудована на основі ноутбука зі встановленою операційною системою Windows та давача «SPEC Sensors DGS-NO2-968-037». Давач DGS-NO<sub>2</sub>-968-037 укомплектований перехідником UART-to-USB, що дозволяє підключити його до комп'ютера через USB інтерфейс. Для правильної роботи давача на ноутбучі встановлено термінал TeraTerm.

Підключення сенсора здійснюється через USB інтерфейс. Вимірювання миттєвих концентрацій діоксиду азоту проводяться щосекунди. Дані записуються у log-файл та передаються на сервер за допомогою Інтернет.

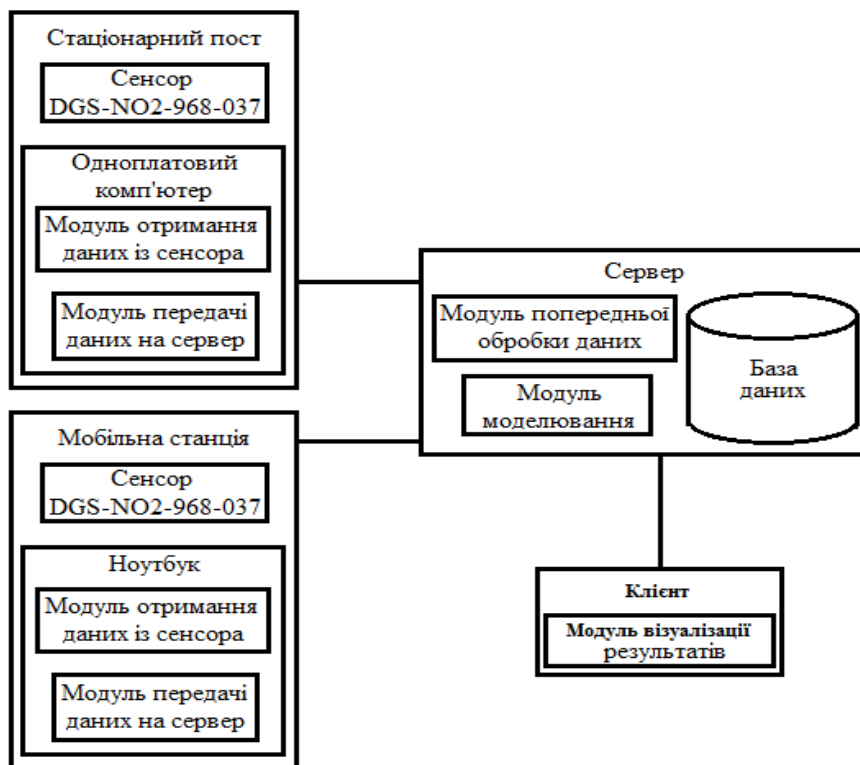


Рисунок 3.9 – Розміщення модулів програмного забезпечення системи екологічного моніторингу

Станція моніторингу являє собою сервер, на якому знаходяться: база даних вимірних концентрацій діоксиду азоту, програмне забезпечення для побудови математичних моделей з метою прогнозування часового розподілу вказаних концентрацій.

Також, на станції моніторингу реалізовано серверну частину веб-орієнтованої системи для відображення результатів моделювання та архівних даних рівня концентрацій шкідливих викидів автотранспорту в атмосферному повітрі м. Тернополя.

На стороні користувача розгорнуто клієнтську частину веб-орієнтованої системи, яка дозволяє в режимі реального часу слідкувати за викидами діоксиду азоту в повітря.

Віддалений Web-сервер, який обробляє зібрану з сенсорів інформацію та розраховує рівень забруднення, складається з двох компонент: апаратна підсистема та програмне забезпечення верхнього рівня.

Апаратна підсистема є комп'ютером, який підключений до глобальної мережі Інтернет. Не має значення, де фізично знаходиться апаратна частина Web-сервера. Це може бути комп'ютер в університеті, а може бути сервер інтернет-провайдера в будь-якій країні світу. Головне, щоб до нього був забезпечений доступ через Інтернет.

Програмне забезпечення (ПЗ) верхнього рівня є складовою частиною програмного забезпечення автоматизованої системи моніторингу і його склад, структура та алгоритми визначаються завданнями і функціями системи обробки, зберігання і представлення інформації.

Роботу програмного забезпечення верхнього рівня забезпечують наступні компоненти: операційна система Microsoft Windows Server 2012; система управління реляційними базами даних MySQL; Інтернет сервер IIS; технологія COM/COM+/DCOM; прикладна програмна система (мова програмування C# з використанням технології .NET).

Система управління реляційними базами даних (СУРБД) MySQL забезпечує зберігання і представлення інформації за запитами мови SQL. Сервер Apache служить для забезпечення зв'язку між EOM по протоколу HTTP і взаємодії з СУРБД MySQL і мовою програмування PHP. Загальна структура взаємодії елементів ПЗ верхнього рівня наведена на рис. 3.10.

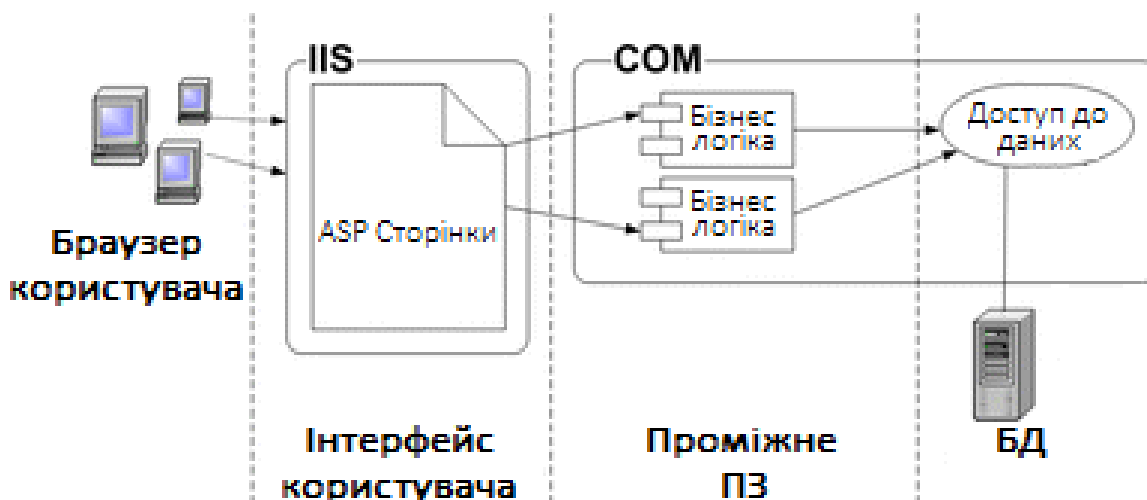


Рисунок 3.10 – Загальна структура взаємодії елементів ПЗ верхнього рівня

Запропонована структура організації ПЗ дозволяє забезпечити прийом, зберігання, обробку і представлення інформації в автоматичному режимі і організувати доступ користувачів до інформації по мережі Інтернет.

Основні завдання програмного забезпечення системи верхнього рівня визначені у наступних функціях: безперервний прийом даних; введення, перетворення, зберігання, відображення і обробка інформації, як отриманої із засобів контролю, так і тої, що зберігається в реляційній базі даних; формування і видача довідкових даних; виконання розрахункових і інформаційних завдань комплексу; організація підтримки баз даних; організація інформаційного обміну між комплексом і віддаленими користувачами через мережу Інтернет; організація інтерфейсу з оператором комплексу; забезпечення візуалізації інформації у вигляді графічних залежностей; організація резервного копіювання баз даних; захист інформації від несанкціонованого доступу.

За результатами виконаного аналізу створено діаграму варіантів використання системи користувачем (рис. 3.11).

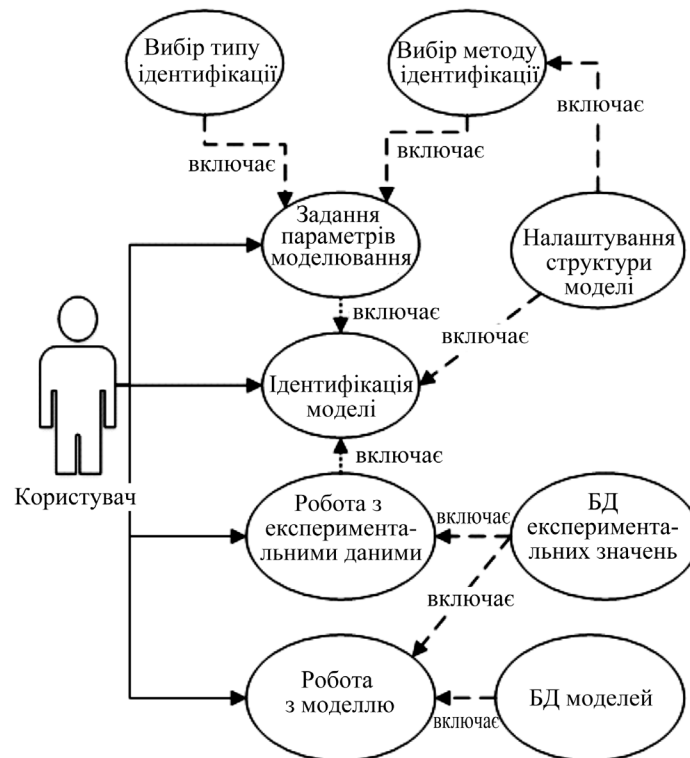


Рисунок 3.11 – Діаграма варіантів використання системи користувачем

Користувач має можливість вибрати тип ідентифікації залежно від задачі – параметрична чи структурна. Якщо він вибирає параметричну, то далі відбувається реалізація процедури випадкового пошуку з використанням направляючого конуса Растригіна.

Реалізація наведених вище функцій повною мірою дозволяє здійснити завдання обробки, зберігання і представлення інформації в межах функціонування розробленої програмно-апаратної системи екологічного моніторингу.

### **Висновки до розділу 3**

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

2. Запропоновано та обґрунтовано архітектуру програмно-апаратної системи для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту. Основними компонентами архітектури є мобільні та стаціонарні пости для вимірювання концентрацій шкідливих викидів, укомплектовані газовими сенсорами та засобами передачі даних – GSM модулями. Центральним елементом архітектури є станція моніторингу, у якій реалізовано ПЗ для побудови комп'ютерних моделей поширення шкідливих викидів автотранспорту, програмні засоби моделювання цих процесів та візуалізації результатів моделювання.

3. Обґрунтовано вимоги до програмного комплексу для моделювання динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами

автотранспорту: безперервний прийом даних; введення, перетворення, зберігання, відображення і обробка інформації, як із засобів контролю, так і тої, що зберігається в реляційній базі даних; формування і видача довідкових даних; виконання розрахункових і інформаційних завдань комплексу; організація підтримки баз даних; організація інформаційного обміну між комплексом і віддаленими користувачами через мережу Інтернет; організація інтерфейсу з оператором комплексу; забезпечення візуалізації інформації у вигляді графічних залежностей; організація резервного копіювання баз даних.

## РОЗДІЛ 4

### ІНТЕРВАЛЬНІ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ШКІДЛИВИМИ ВИКИДАМИ АВТОТРАНСПОРТУ

Створений програмний комплекс, який реалізує методи структурної та параметричної ідентифікації математичних моделей процесів динаміки шкідливих викидів автотранспорту, використано для побудови комплексу математичних моделей зазначених процесів. Зокрема, на основі вимірних концентрацій діоксиду азоту та оксиду вуглецю, розроблено математичні моделі для оцінювання та прогнозування динаміки концентрацій цих шкідливих речовин для різних точок міста Тернополя в залежності від інтенсивності автотранспортного потоку. Також, розроблено уніфіковану модель динаміки концентрацій діоксиду азоту в приземистому шарі атмосфери центральної частини м. Тернополя. Оскільки розроблена уніфікована модель представлена різницеvim рівнянням, то при заданні інших початкових умов ця модель можуть бути використана як для інших частин міста Тернополя, так і взагалі для інших міст. Тому, у цьому розділі також проведено верифікацію отриманої математичної моделі для початкових умов, які відрізняються від тих, для яких модель було збудовано.

Результати розробки та застосування математичних моделей процесів динаміки шкідливих викидів автотранспорту впроваджено та використовуються Тернопільським міським відділом ДУ «Тернопільський обласний лабораторний центр МОЗ України».

Матеріали цього розділу опубліковано автором у працях [8-10, 16, 67, 85-87].



#### 4.1. Моделі динаміки добового циклу концентрацій оксиду вуглецю

Встановлення добового циклу концентрацій шкідливих викидів внаслідок забруднення атмосфери автотранспортом є важливою задачею як для контролю екологічного середовища міста, так і для планування його розвитку, зокрема, для оптимізації трафіку атотранспорту. Розроблена інформаційна технологія, в основі якої лежать методи структурної та параметричної ідентифікації, дають можливість розв'язувати зазначену задачу з урахуванням впливу різних погодних чинників, а також інтенсивності автотранспортних потоків.

Розглянемо приклад побудови такої моделі у м. Тернополі на перехресті вулиць «Бродівська – Збаразька – Довга». Дані для побудови моделі отримано 7 квітня 2015 року. Похибка вимірювання концентрацій оксиду вуглецю спектроаналізатором типу „СФ-26“ складала 25 %. Табл. 4.1 відображає отримані інтервальні оцінки концентрацій оксиду вуглецю, а також інтенсивність автотранспортних потоків.

Таблиця 4.1

Вихідні дані для моделювання динаміки концентрацій оксиду вуглецю

Час доби $k$ , год.	Виміряні концентрації оксиду вуглецю, мг/м <sup>3</sup>		$u_k$ , од.
	$z_k^-$	$z_k^+$	
01:00:00	2,2	3,7	853
02:00:00	1,9	3,2	721
03:00:00	2,1	3,5	634
04:00:00	2,2	3,7	763
05:00:00	2,6	4,3	972
06:00:00	4,2	7	1831
07:00:00	5	8,3	2675
08:00:00	5,2	8,7	2707
09:00:00	4,7	7,8	2517
10:00:00	5,8	9,7	2834
11:00:00	4,9	8,2	2528

Продовження таблиці 4.1

12:00:00	4,7	7,8	2476
13:00:00	5,6	9,3	2875
14:00:00	4,2	7	2178
15:00:00	5,3	8,8	2714
16:00:00	5,6	9,3	2635
17:00:00	4,7	7,8	2406
18:00:00	4,5	7,5	2382
19:00:00	4,1	6,8	2152
20:00:00	3,5	5,8	1934
21:00:00	2,8	4,7	1303
22:00:00	2,7	4,5	1056
23:00:00	2,6	4,3	878
24:00:00	2,3	3,8	861

Для реалізації методу структурної ідентифікації моделей у вигляді інтервальних різницевих рівнянь і моделювання добового циклу зміни концентрацій оксиду вуглецю, скористаємось алгоритмом, описаним у 2 розділі.

Згенеруємо множину структурних елементів, використовуючи поліноміальні функції не вище другого степеня і для різницевого рівняння не вище другого порядку. У результаті отримаємо множину структурних елементів потужністю  $L=45$ , наведену в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Множина структурних елементів  $F$ 

№	Структурний елемент	№	Структурний елемент	№	Структурний елемент
1	$v_{k-2}$	6	$v_k^2$	11	$v_k \cdot u_{k-2} / u_{k-1}$
2	$v_{k-1}$	7	$v_{k-2} \cdot v_k$	12	$v_k \cdot u_{k-2} / u_{k+1}$
3	$v_k$	8	$v_{k-2} \cdot v_{k-1}$	13	$v_k \cdot u_{k-1} / u_k$
4	$v_{k-2}^2$	9	$v_{k-1} \cdot v_k$	14	$v_k \cdot u_{k-1} / u_{k-2}$
5	$v_{k-1}^2$	10	$v_k \cdot u_{k-2} / u_k$	15	$v_k \cdot u_{k-1} / u_k$

## Продовження таблиці 4.2

16	$v_k \cdot u_k / u_{k-1}$	26	$v_{k-2} \cdot u_{k-1} / u_{k-2}$	36	$v_{k-1} \cdot u_{k-2} / u_{k+1}$
17	$v_k \cdot u_k / u_{k-2}$	27	$v_{k-2} \cdot u_{k-1} / u_k$	37	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_k$
18	$v_k \cdot u_k / u_{k+1}$	28	$v_{k-2} \cdot u_k / u_{k-1}$	38	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_{k-2}$
19	$v_k \cdot u_{k+1} / u_{k-1}$	29	$v_{k-2} \cdot u_k / u_{k-2}$	39	$v_{k-1} \cdot u_{k-1} / u_k$
20	$v_k \cdot u_{k+1} / u_{k-2}$	30	$v_{k-2} \cdot u_k / u_{k+1}$	40	$v_{k-1} \cdot u_k / u_{k-1}$
21	$v_k \cdot u_{k+1} / u_k$	31	$v_{k-2} \cdot u_{k+1} / u_{k-1}$	41	$v_{k-1} \cdot u_k / u_{k-2}$
22	$v_{k-2} \cdot u_{k-2} / u_k$	32	$v_{k-2} \cdot u_{k+1} / u_{k-2}$	42	$v_{k-1} \cdot u_k / u_{k+1}$
23	$v_{k-2} \cdot u_{k-2} / u_{k-1}$	33	$v_{k-2} \cdot u_{k+1} / u_k$	43	$v_{k-1} \cdot u_{k+1} / u_{k-1}$
24	$v_{k-2} \cdot u_{k-2} / u_{k+1}$	34	$v_{k-1} \cdot u_{k-2} / u_k$	44	$v_{k-1} \cdot u_{k+1} / u_{k-2}$
25	$v_{k-2} \cdot u_{k-1} / u_k$	35	$v_{k-1} \cdot u_{k-2} / u_{k-1}$	45	$v_{k-1} \cdot u_{k+1} / u_k$

Далі задаємо значення початкових параметрів алгоритму:  $MCN=100$ ,  $LIMIT=4$ ,  $S=10$ ,  $I_{\min}=3$ ,  $I_{\max}=5$ . Після цього, випадковим чином формуємо початкову множину структур РР  $\Lambda_0$  (потужністю  $S=10$ ) наведену у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

## Початкова множина структур ІРР

№	Порядкові номери структурних елементів, що задають структури $\lambda_s, s=1, \dots, S$ .	$\delta(\lambda_s)$	№	Порядкові номери структурних елементів, що задають структури $\lambda_s, s=1, \dots, S$ .	$\delta(\lambda_s)$
1	14, 22, 27, 40	1,6	6	7, 19, 41	1,475
2	4, 12, 30, 32, 43	0,726	7	15, 26, 38, 44	3,34
3	2, 13, 22	1,348	8	2, 8, 25	3,081
4	6, 9, 28, 32	0,883	9	12, 23, 25, 30, 33	4,892
5	8, 11, 17, 20	2,546	10	1, 16, 19	2,073

У ході досліджень, на третій ітерації застосування методу структурної ідентифікації на основі ПМБК отримали такі адекватні структури моделі:

$\lambda_o = \{16, 18, 22, 45\}$ ,  $\lambda_o = \{3, 9, 21\}$ , для яких виконується умова  $\delta(\lambda_o) = 0$ . Сформовані на основі знайдених структур  $\lambda_o$  з оціненими за допомогою процедури випадкового пошуку з направляючим конусом Растрігіна ІРР мають такий вигляд:

$$[\hat{v}_k] = 0,32418 - 0,63804 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{k-1} / u_{k-2} - 0,29226 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{k-1} / u_k + \quad (4.1)$$

$$+ 0,21413 \cdot [\hat{v}_{k-3}] \cdot u_{k-3} / u_{k-1} + 0,33522 \cdot [\hat{v}_{k-2}] \cdot u_k / u_{k-1}$$

$$[\hat{v}_k] = -0,52637 + 0,19304 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0,02816 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-2}] + 0,75903 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_k / u_{k-1} \quad (4.2)$$

Як бачимо, моделі у вигляді різницевих рівнянь (4.1) та (4.2) зберігають логіку добового циклу зміни концентрацій шкідливих викидів в залежності від інтенсивності автотранспортних потоків.

Результати моделювання добового циклу зміни концентрацій шкідливих викидів оксиду вуглецю на перехресті вулиць Бродівська – Збаразька – Довга м. Тернополя подано на рис. 4.1.

Як бачимо, прогнозована динаміка добового циклу зміни концентрацій оксиду вуглецю, наведена штриховою лінією, знаходиться в межах експериментальних даних і визначає задану концентрацію оксиду вуглецю в межах похибок спостережень.

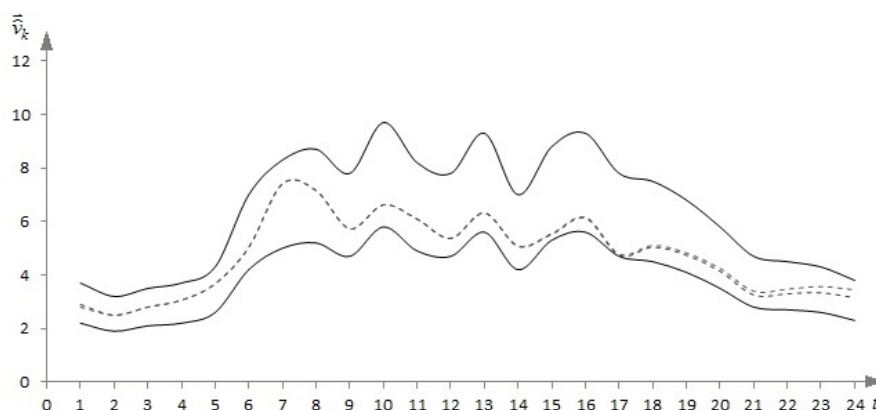


Рисунок 4.1 – Динаміка добового циклу зміни концентрацій оксиду вуглецю в заданій точці м. Тернополя на основі ІРР (4.1)

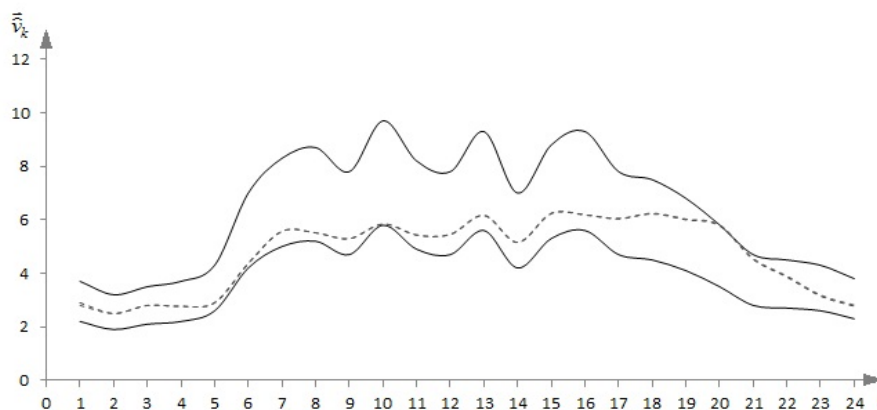


Рисунок 4.2 – Динаміка добового циклу зміни концентрацій оксиду вуглецю в заданій точці м. Тернополя на основі ІРР (4.2)

Варто зазначити, що отримані математичні моделі динаміки добового циклу оксиду вуглецю у вигляді ІРР є достатньо простими в налаштуванні під конкретні умови середовища (перехрестя чи інші точки міста). Зокрема, для відтворення добової динаміки достатньо виміряти концентрації в трьох перших дискретах і встановити інтенсивність автотранспортних потоків за одиницю часу. В цьому випадку отримаємо динаміку концентрацій для будь-якої точки міста. У випадку суттєвої зміни умов застосування моделей, необхідно повторно провести ідентифікацію параметрів моделі при встановленій структурі (4.1, 4.2).

#### 4.2. Моделі динаміки добового циклу концентрацій діоксиду азоту

Розглянемо приклад побудови ІДДМ для моделювання добового циклу динаміки концентрацій шкідливих викидів діоксиду азоту на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя із використанням удосконаленого методу структурної ідентифікації на основі ПМБК.

Зупинимось на процесі формування множини структурних елементів при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації для цього прикладу. На

першій ітерації реалізації методу було сформовано множину  $F$ , яка містила поліноміальні функції не вище другого степеня для різницевого рівняння не вище п'ятого порядку, наприклад:

$$[\hat{v}_{k-1}], [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-1}], [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-2}], [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{k-1}, [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-2}] / u_{k-1}.$$

Таким чином, було сформовано множину  $F$  потужності  $L=65$ . Однак, отримана множина структурних елементів не забезпечила можливості знаходження ІДДМ, для якої б виконувалися умови точності (1.8).

Тому, було прийнято рішення про розширення множини  $F$ . На другій ітерації реалізації методу структурної ідентифікації до поточної множини структурних елементів було додано елементи третього степеня для різницевого рівняння не вище десятого порядку, наприклад:

$$[\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-1}], [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-2}].$$

Таким чином було сформовано множину  $F_1$  потужністю  $L=135$ . Однак, множина  $F_1$  також не забезпечила можливості формування адекватної моделі щодо умов (1.8).

На третій ітерації реалізації методу структурних елементів до поточної множини  $F_1$  було додано елементи, які містили частки вимірних інтенсивностей транспортного потоку, наприклад:

$$[\hat{v}_{k-1}] \cdot u_k / u_{k-1}, [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_k / u_{k+1}.$$

Таким чином, було сформовано множину  $F_2$  потужністю  $L=155$ .

У результаті, було отримано структуру ІДДМ у такому вигляді:

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

В результаті проведення параметричної ідентифікації моделі із застосуванням процедури випадкового пошуку, отримано такі оцінки параметрів:  $g_0=0,0365$ ;  $g_1=0,3542$ ;  $g_2 = 0,118$ ;  $g_3 = 0,5059$ ;  $g_4 = -0,0154$ . Отже, отримана ІДДМ має наступний вигляд:

$$[\hat{v}_k] = 0,0365 + 0,3542 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0,118 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot [\hat{v}_{k-3}] + \\ + 0,5059 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{1,k} / u_{1,k-1} - 0,0154 \cdot [\hat{v}_{k-2}] \cdot u_{1,k-1} / u_{1,k+1}. \quad (4.3)$$

Експериментальні дані, використані для побудови моделі у вигляді (4.3), наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

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.
		$z_k^-$	$z_k^+$	
$N$				$\bar{u}_{1,k}$
1	0:20	0,0336	0,045458	168
2	0:40	0,023263	0,031474	152
3	1:00	0,017822	0,024112	147
4	1:20	0,010728	0,014514	76
5	1:40	0,010074	0,01363	73
6	2:00	0,011038	0,014934	59
7	2:20	0,010648	0,014406	48
8	2:40	0,008484	0,011478	43
9	3:00	0,007548	0,010213	41
10	3:20	0,005784	0,007825	37
11	3:40	0,008973	0,012139	38

Продовження таблиці 4.4

12	4:00	0,011821	0,015992	44
13	4:20	0,01409	0,019062	36
14	4:40	0,017976	0,024321	38
15	5:00	0,02388	0,032308	33
16	5:20	0,02226	0,030116	26
17	5:40	0,018508	0,02504	40
18	6:00	0,018267	0,024714	60
19	6:20	0,013492	0,018255	59
20	6:40	0,017039	0,023053	66
21	7:00	0,020966	0,028366	111
22	7:20	0,027949	0,037814	197
23	7:40	0,045566	0,061648	391
24	8:00	0,066311	0,089714	561
25	8:20	0,081538	0,110316	593
26	8:40	0,093422	0,126394	712
27	9:00	0,094928	0,128432	755
28	9:20	0,099368	0,13444	790
29	9:40	0,098484	0,133243	810
30	10:00	0,095786	0,129592	805
31	10:20	0,097487	0,131894	744
32	10:40	0,092085	0,124585	730
33	11:00	0,078601	0,106342	743
34	11:20	0,071951	0,097345	765
35	11:40	0,070825	0,095822	687
36	12:00	0,06925	0,093691	711
37	12:20	0,073373	0,09927	694
38	12:40	0,074747	0,101128	681
39	13:00	0,073945	0,100043	779
40	13:20	0,075474	0,102112	741
41	13:40	0,079607	0,107704	662
42	14:00	0,081429	0,110169	726
43	14:20	0,085678	0,115918	685



Продовження таблиці 4.4

44	14:40	0,087235	0,118024	771
45	15:00	0,090298	0,122168	778
46	15:20	0,094503	0,127857	738
47	15:40	0,099178	0,134182	778
48	16:00	0,102753	0,139019	758
49	16:20	0,103406	0,139903	777
50	16:40	0,098626	0,133436	728
51	17:00	0,094071	0,127273	682
52	17:20	0,090062	0,121849	751
53	17:40	0,085638	0,115863	749
54	18:00	0,074442	0,100716	726
55	18:20	0,073959	0,100062	761
56	18:40	0,069945	0,094631	719
57	19:00	0,067723	0,091625	713
58	19:20	0,065397	0,088478	531
59	19:40	0,059341	0,080285	512
60	20:00	0,056662	0,076661	465
61	20:20	0,056246	0,076098	468
62	20:40	0,055804	0,0755	252
63	21:00	0,054986	0,074393	234
64	21:20	0,054084	0,073173	201
65	21:40	0,053489	0,072368	247
66	22:00	0,051674	0,069912	243
67	22:20	0,049124	0,066462	252
68	22:40	0,046697	0,063178	231
69	23:00	0,046088	0,062355	254
70	23:20	0,044862	0,060695	219
71	23:40	0,044784	0,06059	196
72	0:00	0,044195	0,059793	172

Для використання отриманої моделі достатньо задати початкові значення вимірних концентрацій та інтенсивності автотранспортного потоку. Початкові дані для моделювання, задані на основі табл. 4.4, мають

такий вигляд:  $[\hat{v}_1] = [0,039489; 0,039569]$ ;  $[\hat{v}_2] = [0,027341; 0,027396]$ ;  $[\hat{v}_3] = [0,020946; 0,020988]$ ;  $u_{1,1} = 168$ ;  $u_{1,2} = 152$ ;  $u_{1,3} = 147$ ;  $u_{1,4} = 76$ .

Результати моделювання із застосуванням моделі (4.3) представлено на рис. 4.3. При чому, штриховими лініями зображено інтервали вимірних значень концентрації діоксиду азоту, а суцільними – інтервали прогнозованих значень вказаної концентрації.

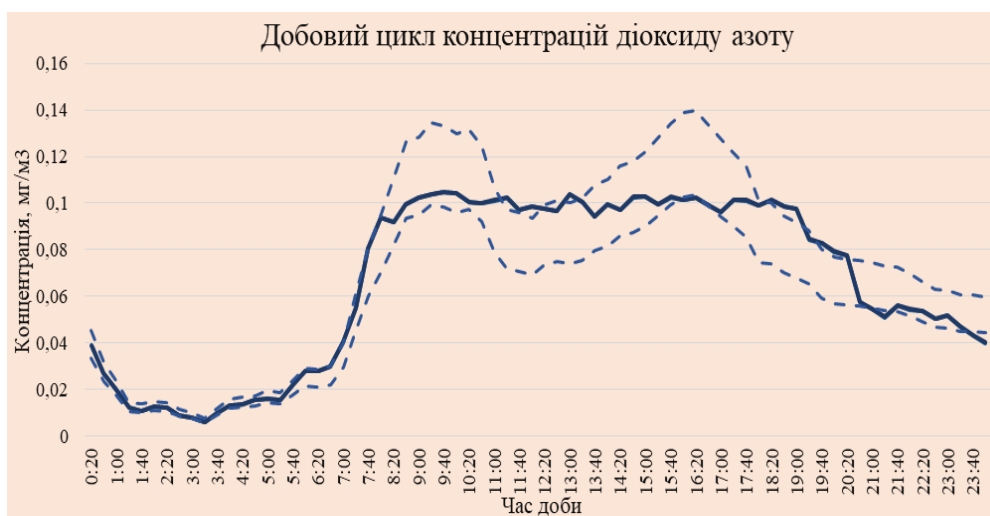


Рисунок 4.3 – Добовий цикл концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича, м. Тернопіль

Як видно з рис. 4.3, інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту (суцільні лінії) знаходяться в межах інтервалів вимірних значень концентрацій діоксиду азоту (штрихові) не для всіх дискрет, що говорить про неадекватність моделі у вигляді (4.3) та неможливість її застосування для відображення результатів моделювання динаміки концентрацій діоксиду азоту в залежності від інтенсивності автотранспортних потоків.

Спроби знайти адекватну ІДДМ для цього випадку призводили до суттєвого зростання порядку РР. Тому, було прийняте рішення проаналізувати повноту множини структурних елементів для побудови цієї моделі.

Спираючись на результати 2 розділу, спочатку на вибірці даних, наведених в табл. 4.4, провели процедуру кластерного аналізу. При цьому, радіус для усіх кластерів був однаковий і заданий шириною найбільшого інтервалу невизначеності виміряних концентрацій речовини:

$$r = \frac{\max_{k=1, \dots, K} (z_k^+ - z_k^-)}{2} = 0,13.$$

Результати кластерного аналізу за цих умов наведено на рис. 4.4. Як бачимо з рис. 4.4, кластери перетинаються, до того ж є дві точки, які взагалі виходять за межі кластерів.

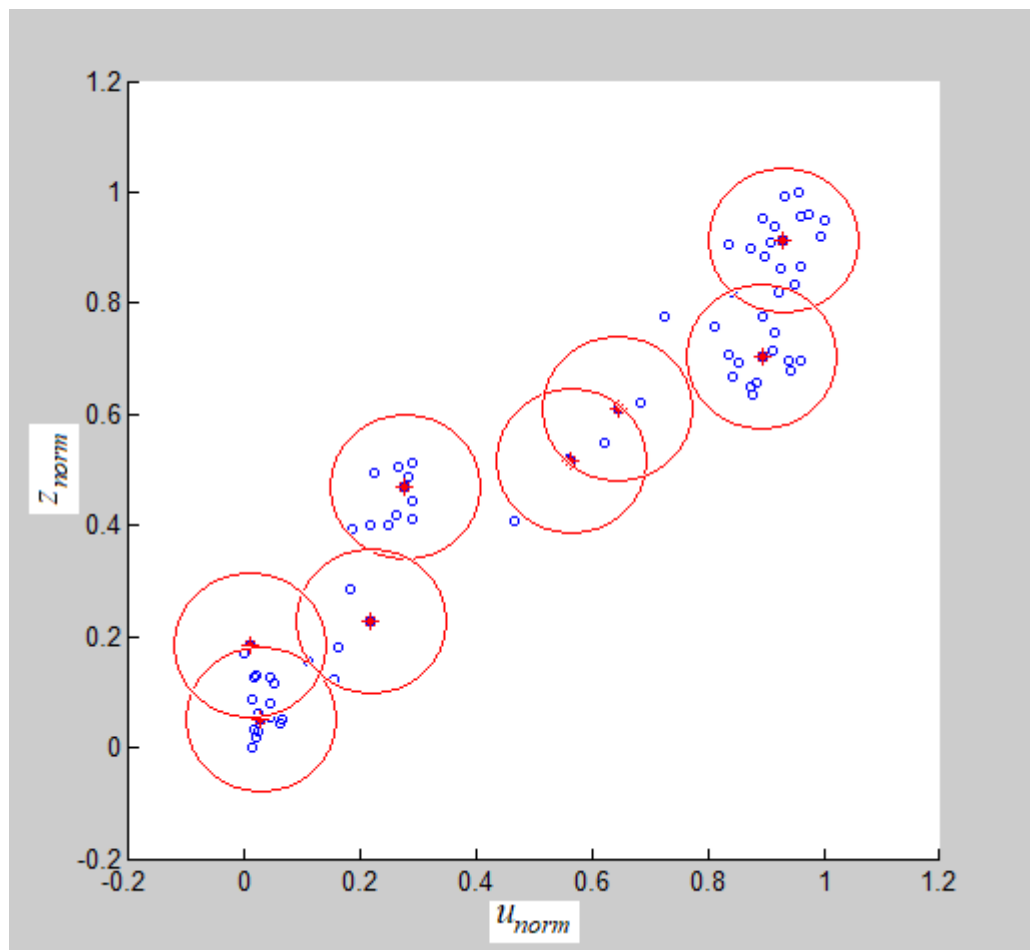


Рисунок 4.4 – Результати кластерного аналізу вибірки вхідних даних з табл. 4.4

Для верифікації отриманої моделі (4.3) використано дані вимірних концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя на десяти-годинному часовому інтервалі: з 11:00 до 21:00 год.

Експериментальні дані, виміряні на вказаному перехресті, представлено у табл. 4.5.

Таблиця 4.5

## 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.
		$z_k^-$	$z_k^+$	
<i>N</i>				$\bar{u}_k$
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

Продовженн таблиці 4.5

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 табл. 4.5, початкові дані для отриманої моделі мають наступний вигляд:  $[\hat{v}_1]=[0,10989; 0,11011]$ ;  $[\hat{v}_2]=[0,085185; 0,085355]$ ;  $[\hat{v}_3]=[0,075255; 0,075405]$ ;  $u_{1,1} = 316$ ;  $u_{1,2} = 248$ ;  $u_{1,3} = 292$ ;  $u_{1,4} = 275$ .

Результати застосування наведеної моделі для перехрестя вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя представлені на рис. 4.6. Зокрема, штриховими лініями наведено інтервали виміряних значень діоксиду азоту, а суцільними – прогнозованих.

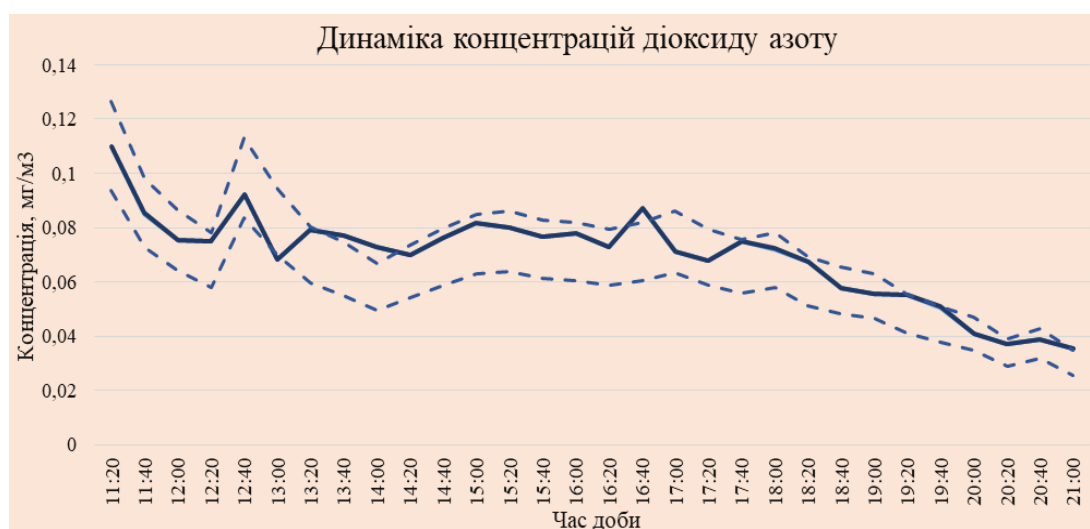


Рисунок 4.5 – Динаміка концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою, м. Тернопіль

Як бачимо з рис. 4.5, інтервали прогнозованих значень концентрацій діоксиду азоту (суцільні лінії) знаходяться в межах інтервалів виміряних

значень концентрацій діоксиду азоту (штрихові) не для всіх дискрет, як і в попередньому випадку, що говорить про неадекватність ІДДМ у вигляді (4.3).

Результати кластерного аналізу вибірки вхідних даних з таблиці 4.5 і виконання умови наведено на рис. 4.6. Як бачимо, і в цьому випадку кластери перетинаються, а умова (2.20) не виконується.

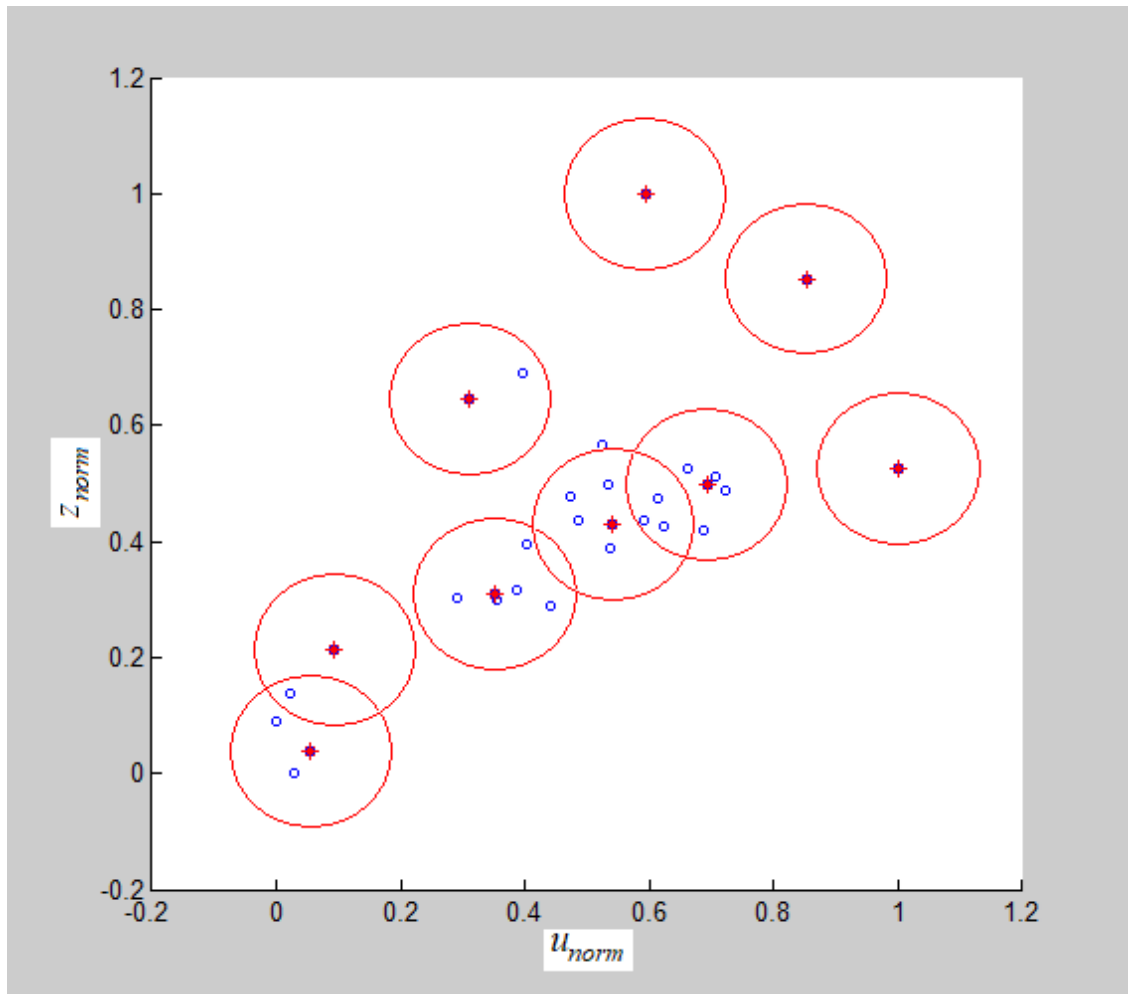


Рисунок 4.6 – Результати кластерного аналізу вибірки вхідних даних з табл. 4.5

В обох випадках результати кластерного аналізу підтверджують неоднозначність зв'язку між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю автотранспортних потоків. Для побудови універсальної моделі, яка би була придатною для опису динаміки процесів забруднення атмосфери шкідливими

викидами автотранспорту для різних перехресть (принаймні, цих двох), доцільно доповнити елементи початкової множини структурних елементів для методу структурної ідентифікації на основі описаної в 2 розділі методики.

#### 4.3. Уніфікована модель динаміки добового циклу концентрацій діоксиду азоту та часова складність її ідентифікації

З огляду на вищеописані факти, необхідно побудувати таку ІДДМ, яка б уникала неоднозначності зв'язку між вихідною характеристикою та чинниками впливу на неї із застосуванням описаних у 3 розділі процедур формування початкової множини структурних елементів. Експериментальні дані для побудови вказаної моделі включають дані з табл. 4.4 і 4.5, та представлені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Результати вимірювань на перехрестях Руська – Замкова – Шашкевича та Чехова – За Рудкою м. Тернополя

№ спостереження	Час доби	Виміряні концентрації NO <sub>2</sub> , мг/м <sup>3</sup>		Інтенсивність транспортного потоку, од.
		$z_k^-$	$z_k^+$	
$N$				$\bar{u}_k$
1	0:20	0,0336	0,045458	168
2	0:40	0,023263	0,031474	152
3	1:00	0,017822	0,024112	147
4	1:20	0,010728	0,014514	76
5	1:40	0,010074	0,01363	73
6	2:00	0,011038	0,014934	59
7	2:20	0,010648	0,014406	48
8	2:40	0,008484	0,011478	43

Продовження таблиці 4.6

9	3:00	0,007548	0,010213	41
10	3:20	0,005784	0,007825	37
11	3:40	0,008973	0,012139	38
12	4:00	0,011821	0,015992	44
13	4:20	0,01409	0,019062	36
14	4:40	0,017976	0,024321	38
15	5:00	0,02388	0,032308	33
16	5:20	0,02226	0,030116	26
17	5:40	0,018508	0,02504	40
18	6:00	0,018267	0,024714	60
19	6:20	0,013492	0,018255	59
20	6:40	0,017039	0,023053	66
21	7:00	0,020966	0,028366	111
22	7:20	0,027949	0,037814	197
23	7:40	0,045566	0,061648	391
24	8:00	0,066311	0,089714	561
25	8:20	0,081538	0,110316	593
26	8:40	0,093422	0,126394	712
27	9:00	0,094928	0,128432	755
28	9:20	0,099368	0,13444	790
29	9:40	0,098484	0,133243	810
30	10:00	0,095786	0,129592	805
31	10:20	0,097487	0,131894	744
32	10:40	0,092085	0,124585	730
33	11:00	0,078601	0,106342	743
34	11:20	0,071951	0,097345	765
35	11:40	0,070825	0,095822	687
36	12:00	0,06925	0,093691	711



Продовження таблиці 4.6

37	12:20	0,073373	0,09927	694
38	12:40	0,074747	0,101128	681
39	13:00	0,073945	0,100043	779
40	13:20	0,075474	0,102112	741
41	13:40	0,079607	0,107704	662
42	14:00	0,081429	0,110169	726
43	14:20	0,085678	0,115918	685
44	14:40	0,087235	0,118024	771
45	15:00	0,090298	0,122168	778
46	15:20	0,094503	0,127857	738
47	15:40	0,099178	0,134182	778
48	16:00	0,102753	0,139019	758
49	16:20	0,103406	0,139903	777
50	16:40	0,098626	0,133436	728
51	17:00	0,094071	0,127273	682
52	17:20	0,090062	0,121849	751
53	17:40	0,085638	0,115863	749
54	18:00	0,074442	0,100716	726
55	18:20	0,073959	0,100062	761
56	18:40	0,069945	0,094631	719
57	19:00	0,067723	0,091625	713
58	19:20	0,065397	0,088478	531
59	19:40	0,059341	0,080285	512
60	20:00	0,056662	0,076661	465
61	20:20	0,056246	0,076098	468
62	20:40	0,055804	0,0755	252
63	21:00	0,054986	0,074393	234
64	21:20	0,054084	0,073173	201
65	21:40	0,053489	0,072368	247

Продовження таблиці 4.6

66	22:00	0,051674	0,069912	243
67	22:20	0,049124	0,066462	252
68	22:40	0,046697	0,063178	231
69	23:00	0,046088	0,062355	254
70	23:20	0,044862	0,060695	219
71	23:40	0,044784	0,06059	196
72	0:00	0,044195	0,059793	172
73	11:20	0,0935	0,1265	316
74	11:40	0,07248	0,098061	248
75	12:00	0,064031	0,08663	292
76	12:20	0,057877	0,078304	275
77	12:40	0,08353	0,113011	405
78	13:00	0,069505	0,094036	219
79	13:20	0,059432	0,080408	296
80	13:40	0,055097	0,074543	279
81	14:00	0,045178	0,061123	264
82	14:20	0,052462	0,070978	250
83	14:40	0,054715	0,074026	298
84	15:00	0,059407	0,080374	350
85	15:20	0,06035	0,08165	355
86	15:40	0,0612	0,0828	340
87	16:00	0,05865	0,07935	360
88	16:20	0,0578	0,0782	323
89	16:40	0,0612	0,0828	456
90	17:00	0,05525	0,07475	315
91	17:20	0,05185	0,07015	297
92	17:40	0,053975	0,073025	348
93	18:00	0,054485	0,073715	326
94	18:20	0,04692	0,06348	245

Продовження таблиці 4.6

95	18:40	0,046495	0,062905	233
96	19:00	0,045815	0,061985	234
97	19:20	0,046155	0,062445	212
98	19:40	0,040035	0,054165	144
99	20:00	0,03485	0,04715	120
100	20:20	0,02805	0,03795	131
101	20:40	0,03162	0,04278	112
102	21:00	0,0255	0,0345	122

У результаті проведеного аналізу вибірки даних для розглянутого прикладу, вдалося з'ясувати причину неможливості побудови єдиної моделі для дослідження динаміки концентрацій діоксиду азоту на зазначених перехрестях, а саме – через неоднозначність зв'язку між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспорту для різних точок міста. Результати проведеного аналізу попередніх моделей показали, що для усунення проблеми неоднозначності зв'язку між концентрацією діоксиду азоту та інтенсивністю руху автотранспортних засобів необхідно при розв'язуванні задачі структурної ідентифікації додати до множини  $F$  такі структурні елементи:

$$\frac{z_{k-1} - z_{k-2}}{u_{k-1} - u_{k-2}} \text{ та } \frac{z_{k-1} - 2 \cdot z_{k-2} + z_{k-3}}{u_{k-1} - 2 \cdot u_{k-2} + u_{k-3}}.$$

Тому, на першій ітерації реалізації методу було сформовано множину  $F$ , яка містила поліноміальні функції не вище другого степеня,  $L = 87$ . Також до множини  $F$  було додано структурні елементи, визначені на етапі попереднього аналізу вхідної вибірки, наведені вище. На основі вхідних

даних з табл. 4.6 та вищеописаних процедур формування початкової множини структурних елементів, отримано таку структуру ІДДМ:

$$[\hat{v}_k] = g_1 + g_2 \cdot ([\hat{v}_{k-1}] - [\hat{v}_{k-2}]) / (u_{k-1} - u_{k-2}) + g_3 \cdot [\hat{v}_{k-5}] \cdot [\hat{v}_{k-7}] - g_4 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + g_5 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{k-1} - g_6 \cdot [\hat{v}_{k-5}] \cdot u_{k-8} / u_{k-2}$$

Із застосуванням процедур випадкового пошуку з направляючим конусом Растрігіна [81, 82], отримано такі оцінки параметрів моделі і, відповідно, структуру:

$$[\hat{v}_k] = 0.0674 + 0.0752 \cdot ([\hat{v}_{k-1}] - [\hat{v}_{k-2}]) / (u_{k-1} - u_{k-2}) + 0.1722 \cdot [\hat{v}_{k-5}] \cdot [\hat{v}_{k-7}] - 0.1269 \cdot [\hat{v}_{k-1}] + 0.0006 \cdot [\hat{v}_{k-1}] \cdot u_{k-1} - 0.0778 \cdot [\hat{v}_{k-5}] \cdot u_{k-8} / u_{k-2} \quad (4.4)$$

Початкові дані для моделювання із застосуванням отриманої ІДДМ (4.4) мають наступний вигляд:

а)  $[\hat{v}_1] = [0,039489; 0,039569];$   $[\hat{v}_2] = [0,027341; 0,027396];$   
 $[\hat{v}_3] = [0,020946; 0,020988];$   $[\hat{v}_4] = [0,012608; 0,012634];$   $[\hat{v}_5] = [0,01184;$   
 $0,0118639];$   $[\hat{v}_6] = [0,012973; 0,012999];$   $[\hat{v}_7] = [0,012514; 0,01254];$   $u_{1,1} = 168;$   
 $u_{1,2} = 152;$   $u_{1,3} = 147;$   $u_{1,4} = 76;$   $u_{1,5} = 73;$   $u_{1,6} = 59;$   $u_{1,7} = 48;$   $u_{1,8} = 43$  – для перехрестя Руська – Замкова – Шашкевича;

б)  $[\hat{v}_1] = [0,10989; 0,11011];$   $[\hat{v}_2] = [0,085185; 0,085355];$   $[\hat{v}_3] = [0,075255;$   
 $0,075405];$   $[\hat{v}_4] = [0,068022; 0,068159];$   $[\hat{v}_5] = [0,098172; 0,098369];$   
 $[\hat{v}_6] = [0,081689; 0,081852];$   $[\hat{v}_7] = [0,06985; 0,06999];$   $u_{1,1} = 316;$   $u_{1,2} = 248;$   
 $u_{1,3} = 292;$   $u_{1,4} = 275;$   $u_{1,5} = 405;$   $u_{1,6} = 219;$   $u_{1,7} = 296;$   $u_{1,8} = 279$  – для перехрестя Чехова – За Рудкою.

Результати застосування отриманої моделі (4.4) представлені на рис. 4.7 та 4.8 для випадків моделювання на перехрестях Руська – Замкова – Шашкевича та Чехова – За Рудкою м. Тернополя, відповідно.

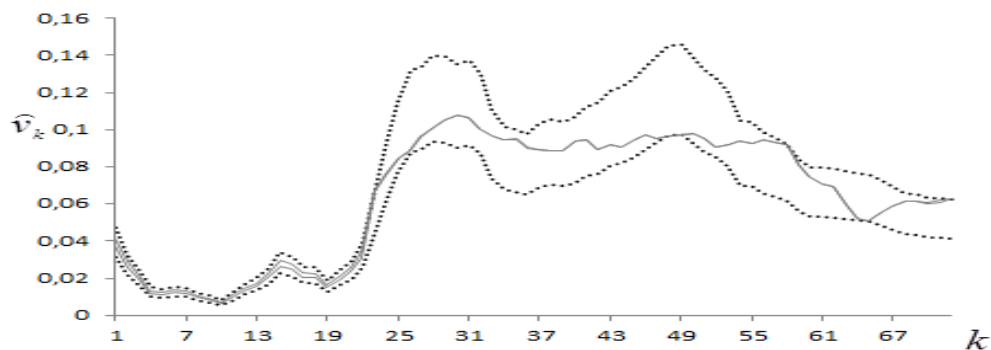


Рисунок 4.7 – Динаміка добового циклу концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Руська – Замкова – Шашкевича м. Тернополя на основі ІДДМ (4.4)

Як бачимо з рис. 4.7, отримана ІДДМ (4.4) задовільняє умови (1.8) на множині усіх дискрет.

Верифікацію моделі (4.4) також проводили для моделювання поширення забруднень шкідливих викидів автотранспорту на основі вимірних даних у іншій точці м. Тернополя, зокрема, на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя. Отримані прогнозовані значення концентрацій шкідливих викидів із використанням ІДДМ (4.4) подано на рис. 4.8.

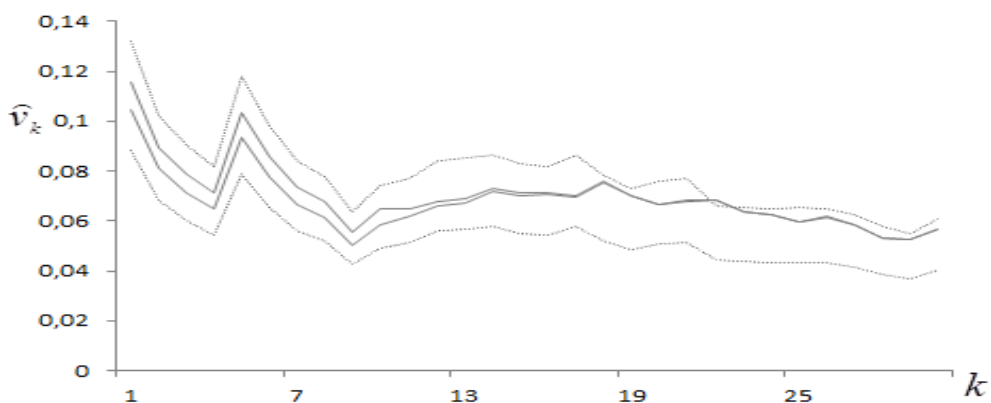


Рисунок 4.8 – Динаміка добового циклу концентрацій діоксиду азоту на перехресті вулиць Чехова – За Рудкою м. Тернополя на основі ІДДМ (4.4)

Як бачимо, прогнозовані значення концентрацій шкідливих викидів (суцільні лінії) знаходяться в межах вимірних значень (штрихові) на множині усіх дискрет, що аргументує застосування запропонованого підходу до формування початкового набору структурних елементів моделі та підтверджує її адекватність.

Отже, отримана ІДДМ (4.4) є «універсальною», тобто може бути застосована для моделювання поширення забруднень шкідливих викидів автотранспорту у різних точках міста та для різних міст загалом.

Варто зазначити, що отримане ІРР, яке є моделлю динаміки концентрацій діоксиду азоту, є достатньо простим в налаштуванні, хоч і вимагає більшої кількості вимірювань для задання початкових дискрет. Зокрема, необхідно встановити дискретні значення для концентрації діоксиду азоту для 7 перших дискрет, а також інтенсивність автотранспортних потоків. Також наголосити, що у випадку суттєвої зміни умов, за яких отримано дану модель, наприклад, зміна перехрестя чи навіть міста, необхідно повторно провести параметричну ідентифікацію моделі. В результаті проведення вказаних експериментів встановлено, що структура моделі залишається такою ж, але необхідним є застосування алгоритмів параметричної ідентифікації. Встановлені закономірності показують універсальність отриманої моделі та придатність запропонованих удосконалених алгоритмів та методів структурної та параметричної ідентифікації.

Також, в процесі побудови моделі на основі удосконаленого методу структурної ідентифікації, досліджувалися його часові характеристики. Було проведено декілька різних спроб структурно-параметричної ідентифікації моделі у випадку застосування кластерного аналізу і без його застосування. Для оцінювання часової складності використано показник кількості обчислень значень функції мети, який був обґрунтований у ряді робіт, присвячених розвитку методу структурної ідентифікації на основі ПМБК.

Як витікає із результатів обчислювальних експериментів [69], кількість циклів обчислення значення функції мети у задачі одноразової параметричної ідентифікації ІДДМ на основі методу випадкового пошуку з направляючим конусом Растригіна, сягає від 9000 ітерацій для простих моделей з  $m_s=2$ ,  $N=15$  та до 200000 ітерацій – для складніших моделей, з  $m_s=9$ ,  $N=100$ .

При побудові уніфікованої ІДДМ концентрацій  $\text{NO}_2$  (4.4) було визначено часову складність реалізації удосконаленого на основі методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі використання кластерного аналізу, в тому числі, для випадку моделі з такими параметрами  $m_s=9$   $N=100$ . В результаті, значення показника обчислювальної складності  $Q(m_s, N)$  було знижено з 200000 до приблизно 19000, що підтверджує зменшення складності обчислень більш, ніж у 10 разів. Це підтверджує ефективність запропонованого методу та створює перспективи для подальшого його розвитку.

#### Висновки до розділу 4

1. Уперше отримано комплекс адекватних математичних моделей, які описують процеси динаміки шкідливих викидів автотранспорту. Результати моделювання та верифікації отриманих моделей представлені на прикладі центральної частини міста Тернополя. Вказані моделі характеризуються гарантованою точністю та прості в налаштуванні для змінних умовах середовища, в якому використовуються.

2. Результати досліджень показали, що обґрунтоване формування множини структурних елементів у задачі структурної ідентифікації істотним чином знижує часові затрати на її розв'язання. Крім, того аналіз отриманої моделі показав, що вона є «універсальною» і може бути використана для

моделювання концентрацій шкідливих викидів у різних точках міста і для інших міст України загалом.

3. Результати комп'ютерного моделювання показали, що із застосуванням удосконаленого методу структурної ідентифікації, у якому введена процедура кластерного аналізу, зменшується часова складність його реалізації. На тестових прикладах показано, що часова складність може бути зменшена у більш, ніж 10 разів.



## ВИСНОВКИ

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

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

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

3. Встановлено, що основним фактором, який впливає на обчислювальну складність методу структурної ідентифікації ІДДМ на основі поведінкової моделі бджолиної колонії, є якість формування початкового набору структурних елементів, що слугувало підставою для його удосконалення. Цей метод, на відміну від існуючого, містить процедури

автоматизованого формування набору структурних елементів, які, у свою чергу, ґрунтуються на методі субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних. У сукупності це забезпечує підвищення якості формування початкової множини структурних елементів і, тим самим, – зниження обчислювальної складності реалізації методу.

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

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

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

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Alonso G., Benito A., Lonza L., Kousoulidou M. Investigations on the distribution of air transport traffic and CO<sub>2</sub> emissions within the European Union // *Journal of Air Transport Management*. Vol. 36. 2014. P. 85-93.
2. Camazine S., Sneyd J. A model of collective nectar source by honey bees: Self-organization through simple rules // *Journal of Theoretical Biology*. – 1991. – № 149. – P. 547-571.
3. Carslaw D.C. Evidence of an increasing NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> emissions ratio from road traffic emissions // *Atmospheric Environment*. Vol. 39. №26. 2005. P. 4793-4802.
4. Chaudhry V. Arduair: Air Quality Monitoring // *International Journal of Environmental Engineering and Management*. 2013. – P. 639-646.
5. DF Robot: Drive the Future. Sharp GP2Y0A710K Distance Sensor (100-550cm) // Електронний ресурс [режим доступу]: <https://www.dfrobot.com/product-447.html>
6. Dyvak M., Maslyiak Y., Papa O., Savka N. Clustering and interval analysis of heterogeneous data sample // *Computer Sciences and Information Technologies: Proc. of the 12th Intern. Sci. and Tech. Conf. (CSIT'2017)*. Vol. 1. 2017. P. 528-532.
7. Dyvak M., Maslyiak Y., Porplytsya N., Pukas A., Dyvak T. Drywall humidity modeling during its drying process under condition of changing the temperature fields based on interval difference operator / *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*. 2016. P. 136-139.
8. Dyvak M., Maslyiak Y., Pukas A. Information technology for modeling of atmosphere pollution processes by motor vehicle harmful emissions // *Experience of Designing and Application of CAD Systems: Proc. of the 15th Intern. Conf.* 2019. P. 2/91-2/95.

9. Dyvak M., Maslyiak Y., Voytyuk I., Maslyiak B. Modified method of subtractive clustering for modeling of distribution of harmful vehicles emission concentrations // CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2300: International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT'2018). 2018. P.58-62.
10. Dyvak M., Oliynyk I., Maslyiak Y., Pukas A. Static interval model of air pollution by motor vehicles and its identification method // Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: Proc. of the 14th Intern. Conf. (TCSET'2018). 2018. P. 859-863.
11. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyak Y., Shynkaryk M. Method of parametric identification for interval discrete dynamic models and the computational scheme of its implementation // Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer. 2018. Vol. 689. P.101-112.
12. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Kasatkina N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control // Proc. Of the 14th Intern. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017). 2017. P. 50-54.
13. Dyvak M., Porplytsya N., Tymets V., Maslyiak Y. Method of structural identification of a model for recurrent laryngeal nerve localization // Computer Sciences and Information Technologies: Proc. of the 13th Intern. Sci. and Tech. Conf. (CSIT'2018). 2018. Vol. 1. P.470-474.
14. Dyvak M., Pukas A., Maslyiak Y., Stakhiv P., Cegielski M. Using a neural network with radial basis functions for task of recurrent laryngeal nerve monitoring based on electrophysiological approach // Computational Problems of Electrical Engineering: Proc. of the 18th Intern. Conf. (CPEE'2017). 2017. P.1-4.
15. Dyvak M., Stakhiv P., Pukas A. Algorithms of parallel calculations in task of tolerance ellipsoidal estimation of interval model parameters // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 60(1). 2012. P. 159-164.

16. Dyvak M., Stakhiv P., Pukas A., Voytyuk I., Porplytsya N., Maslyiak Y. Interval model of dynamics of dispersion of harmful pollution from vehicular traffic // *Journal of Applied Computer Science*. 2016. Vol. 24, № 3. P.49-60.
17. EU. Regulation (EC) No 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 setting emission performance standards for new passenger cars as part of the Community's integrated approach to reduce CO<sub>2</sub> emissions from light-duty vehicles // *OJ L 140*, 5.6.2009, pp. 1–15.
18. European Environment Agency. Air quality in Europe // *EEA Report No 5/2014*. 2014. European Environment Agency Copenhagen, Denmark.
19. European Environment Agency. Monitoring CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars and vans in 2013 // *EEA Technical report No 19/2014*. 2014. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark.
20. Hural I., Dyvak M., Pigovsky Y., Spilchuk V. Autonomous systems modification of Mono's differential equations to non-autonomous systems in the tasks of modeling processes problems at biogas plants // *Proc. of the 13th Int. Conf. "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics"*, CADSM'2015. – Lviv–Polyana, 2015. – P. 93–96.
21. Hurley P.J., Physick W.L., Luhar A.K. TAPM: a practical approach to prognostic meteorological and air pollution modelling // *Environmental Modelling & Software*. – 2005. – T. 20. – №. 6. – C. 737-752.
22. Jorgensen B. The theory of dispersion models // *CRC Press*, 1997. – P. 237.
23. Juan S. et al. An Industrial air pollution dispersion system based on Gauss dispersion model // *Environmental Pollution & Control*. 2005. Vol. 7. P.11.
24. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: Techn. rep. – TR06. – Erciyes: Erciyes Univ. Press, 2005. – 10 p.

25. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39. – P. 459-471.
26. Kelley W.G., Peterson A.C. Difference equations: an introduction with applications // Academic press. 2001.
27. Kinghtes C.D., Peters C.A. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for Monod biodegradation kinetics using bivariate data // Biotechnology and Bioengineering. – 2000. – Vol. 69, № 2. – P. 160–170.
28. Kumkov S., Mikushina Y. Interval approach to identification of parameters of experimental process model // 15th GAMM-IMACS International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetics and Verified Numerics. – 2012. p. 90-93.
29. Lee J.W., Son S.H., Kwon S.H. Advanced mountain clustering method // Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference. Vol. 1. 2001. P. 275-280.
30. Maslyiak Y., Pukas A., Voytyuk I., Shynkaryk M. Environmental monitoring system for control of air pollution by motor vehicles // Perspective Technologies and Methods in MEMS Design: Proc. of the 14th Intern. Conf. (MEMSTECH'2018). 2018. P. 250-254.
31. Meghea I., Mihai M., Demeter T. Gauss dispersion model applied to multiple punctual sources from an industrial platform // International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM: Surveying Geology & Mining Ecology Management. 2013. Vol. 1. P. 497.
32. Microchip Technology Inc. MCP3004/3008 2.7V 4-Channel/8-Channel 10-Bit A/D Converters with SPI™ Serial Interface // Электронный ресурс [режим доступа]: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21295C.pdf>
33. Moore R.E. Reliability in computing: the role of interval methods in scientific computing // Elsevier. 2014.

34. Nejadkoorki F., Nicholson K., Lake I., Davies T. An approach for modelling CO<sub>2</sub> emissions from road traffic in urban areas // Science of the total environment. Vol. 406. № 1-2. 2008. P.269-278.

35. Nickovic S., Kallos G., Papadopoulos A., Kakaliagou O. A model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere // J Geoph Res, 2001. – №106 – P. 18113-18129.

36. Pal N.R., Chakraborty D. Mountain and subtractive clustering method: Improvements and generalizations // International Journal of Intelligent Systems Vol. 15. № 4. 2000. P.329-341.

37. Pant P., Harrison R.M. Estimation of the contribution of road traffic emissions to particulate matter concentrations from field measurements: a review // Atmospheric environment. – Vol. 77. – 2013. – P. 78-97.

38. Pasquill F. Atmospheric dispersion parameters in gaussian plume modeling: [part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values] // EPA-600/4-76-030b, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 27711. – 1976. – P. 237.

39. Pelliccioni A., Tirabassi T. Air pollution model and neural network: an integrated modelling system // IL NUOVO CIMENTO. – May, 2008. – P. 22-23.

40. Peter F. Nelson., Ye Wo. Using computer modelling to simulate atmospheric movement and potential risk of pollutants from post-combustion carbon capture projects // Energy procedia. – November, 2014. – P. 11-14.

41. Porplytsya N., Dyvak M. Interval difference operator for the task of identification recurrent laryngeal nerve // Computational Problems of Electrical Engineering: Proceedings of the 16th International Conference (CPEE' 2015). – Lviv, 2015. – P. 156-158.

42. Porplytsya N., Dyvak M., Dyvak T., Method of structure identification for interval difference operator based on the principles of honey bee

colony functioning // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Vol. 4, №2. – P. 57-68.

43. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I., Dyvak T. Features of structure identification of models of distributed parameters objects based on the artificial bee colony algorithm // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014) : Proc. of the XIIth Intern. Conf. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 419-420.

44. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I., Dyvak T. Features of structure identification of models of distributed parameters objects based on the artificial bee colony algorithm // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2014) : Proc. of the XIIth Intern. Conf. – Lviv-Slavske, 2014. – P. 419-420.

45. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I., Voytyuk I. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2015): Proc. of the XIIIth Intern. Conf. – Lviv, 2015. – P. 196-199.

46. Raspberry pi foundation. Raspberry Pi 3 Model B // Электронный ресурс [режим доступа]: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/#buy-now-modal>

47. Riley J.R., Greggers U., Smith A.D., Reynolds D.R., Menzel R. The flight paths of honeybees recruited by the waggle dance // NATURE: International weekly journal of science – 2005.–Vol. 435. – P. 205-207.

48. SPEC Sensors LLC. Product specification: DGS-NO2 968-037 // Электронный ресурс [режим доступа]: <https://www.maritex.com.pl/product/attachment/104299/07a19995eabcd474afb54d5a01f97454>



49. Stepashko V. Developments and prospects of GMDH-based inductive modeling // *Advances in Intelligent Systems and Computing II: Selected Papers from the International Conference on Computer Science and Information Technologies CSIT 2017*. 2018. P. 474-491.
50. Stepashko V. From Inductive to Intelligent Modeling // *Proceedings of the 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT'2018)*. 2018. P. 32-35.
51. Stepashko V., Moroz O. Hybrid searching GMDH-GA algorithm for solving inductive modeling tasks // *Proceedings of the First Int. Conf. on Data Stream Mining & Processing (DSMP'2016)*. 2016. P. 350-355.
52. Turner D. B. Workbook of atmospheric dispersion estimates: an introduction to dispersion modelling // *CRC Press*, 1994. – P. 192.
53. Velthuizen R.P., Hall L.O., Clarke L.P., Silbiger M.L. An investigation of mountain method clustering for large data sets // *Pattern Recognition Vol. 30. № 7*. 1997. P. 1121-1135.
54. Zannetti P. Air pollution modeling: theories, computational methods and available software // *Springer Science & Business Media*, 2013. – P. 425.
55. Белов И.В., Беспалов М.С., Ключкова Л.В., Павлова Н.К., Сузан Д.В., Тишкин В.Ф. Сравнительный анализ некоторых математических моделей для процессов распространения загрязнений в атмосфере // *Математическое моделирование*. – 1999. – Т. 11. – № 8. – С. 52-64.
56. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы // *Ленинград: Гидрометеиздат*, 1985. – 272 с.
57. Владимиров А. М. Охрана окружающей среды // *Санкт-Петербург: Гидрометеиздат*, 1991. – 480 с.
58. Войтюк І.Ф., Дивак М.П., Неміш В.М. Метод та генетичний алгоритм структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів в задачах екологічного моніторингу // *Збірник наукових праць Донецького*

національного технічного університету серії «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2011. - Вип. 14 (188). – С. 8-17.

59. Войтюк. І.Ф., Манжула В.І., Дивак Т.М. Особливості оптимізації структури інтервального різницевого оператора // Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці. Збірка наукових праць учасників міжнародної науково-практичної конференції «Трансформаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах». – Вінниця, 2009. – С. 146-154.

60. Войтюк. І.Ф., Манжула В.І., Дивак Т.М. Особливості оптимізації структури інтервального різницевого оператора // Прогресивні інформаційні технології в науці, освіті та економіці. Збірка наукових праць учасників міжнародної науково-практичної конференції «Трансформаційні реформи та антикризовий потенціал економіки в постсоціалістичних країнах». – Вінниця, 2009. – С. 146-154.

61. Громова О.В. Аналіз моделей поширення речовин в атмосфері від стаціонарних джерел // Наук. праці УкрНДГМІ, 2004. – № 253. – С. 173-181.

62. Громова О.В. Аналіз моделей поширення речовин в атмосфері від стаціонарних джерел // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2004. – № 253. – С. 173-181.

63. Джигирей В.С., Сторожук В.М., Яцюк Р.А. Основи екології та охорона навколишнього природного середовища // Екологія та охорона природи. – Львів: Афіша, 2000. – 272 с.

64. Дивак М. П. Задачі математичного моделювання статичних систем з інтервальними даними. – Тернопіль: Видавництво ТНЕУ «Економічна думка», 2011. – 216 с.

65. Дивак М., Стахів П., Каліщук І. Ідентифікація параметрів моделей «вхід-вихід» динамічних систем на основі інтервального підходу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2004. – Т. 9, № 4. – С. 109–117.

66. Дивак М.П. Ідентифікація дискретних моделей динамічних систем з інтервальними даними: монографія / М. П. Дивак, Н. П. Порплиця, Т. М. Дивак. – Тернопіль : ВПЦ «Економічна думка ТНЕУ», 2018. – 220с.

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

68. Дивак М.П., Порплиця Н.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Мельник А.М. Метод ідентифікації моделей об'єктів із розподіленими параметрами з просторово розподіленим керуванням на основі аналізу інтервальних даних // Радіоелектроніка, інформатика, управління. 2017. № 2. С. 150-159.

69. Дивак Т.М. Параметрична ідентифікація макромоделей об'єктів з розподіленими параметрами у вигляді інтервальних різницевого операторів // Дисертація на здобуття наукового ступеня: кандидата технічних наук, Львів, 2013.

70. Замай С.С., Якубайлик О.Э. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города: Учеб. пособие // Красноярск: Красноярский государственный университет, 1998. – 109 с.

71. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.М. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде // К.: Наук. думка, 1997. – 365 с.

72. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами. – Киев: «Техника», 1975. – 311 с.

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

74. Ивахненко А.Г. Мюллер Й.А. Самоорганизация прогнозирующих моделей // К.: Техника. – 1985; Берлин: ФЭБ Ферлаг Техник. – 1984. – 223 с.
75. Ивахненко А.Г., Коппа Ю.В. Регуляризация решающих функций в методе группового учета аргументов // Автоматика. – 1970. – №2. – С. 19 – 23.
76. Ивахненко А.Г., Петухова С.А., Юдин В.М. Объективный выбор оптимальной кластеризации выборки данных при компенсации неробастных помех // Автоматика. – 1993. – №3. – С. 46-58.
77. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Помехоустойчивость моделирования //– К.: Наук. думка, 1985. – 216 с.
78. Ивахненко А.Г., Степашко В.С. Численное исследование помехоустойчивости многокритериальной селекции моделей // Автоматика. – 1982. – № 4. – С. 26-36.
79. Клименко М., Прищеп А., Вознюк Н. Моніторинг довкілля : Підручник // К. : Академвидав, 2006. – 359 с.
80. Ковалюк Д.О., Москвіна С.М. Моделювання теплотехнологічних об'єктів з розподіленими параметрами : монографія // Вінниця : ВНТУ, 2010. – 182 с.
81. Коддингтон Э.А., Левинсон Н. Теория обыкновенных дифференциальных уравнений // Пер. с англ., Изд. 2. – 2007. – 472 с.
82. Кондрашова Н.В., Павлов Я.В. Сравнительный анализ методов сглаживания и МГУА для прогнозирования временных рядов // Індуктивне моделювання складних систем. Збірник наукових праць / відпов. редактор В.С. Степашко – Київ: МННЦ ІТС, 2009. – Вип.1– 236с. – С.50-55.
83. Луканин В.Н., Буслаев А.П., Трофименко Ю.В., Яшина М.В. Автотранспортные потоки и окружающая среда: Учеб. пос. для вузов // М.: ИНФРА-М., 1998. – 408 с.
84. Масляк Ю.Б. Динамічна модель генерування електроенергії МГЕС «Топольки» // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: матеріали

IV Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – 2014. – С. 29-30.

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

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

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

88. Матвійчук Я.М. Математичне макромодельювання динамічних систем: теорія і практика // Л.: Вид-во ЛНУ, 2000. – 214 с.

89. Мокін Б.І., Мокін В.Б., Мокін О.Б. Математичні методи ідентифікації динамічних систем: Навчальний посібник // Вінницький національний технічний університет, 2010. – 263 с.

90. Никифоров А. Н., Бузало Н.С. Математическая модель переноса примеси в неизотермической влажной воздушной среде // Сборник трудов XV Международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях». – Т. 4. – Тамбов, 2002. – С. 31.

91. Олійник І.С. Ідентифікація параметрів інтервальних моделей статичних систем методами оптимального планування насичених експериментів // Дисертація на здобуття наукового ступеня: кандидата технічних наук, Львів, 2018, 175 с.

92. Онишкевич В.М, Холявка В.З., Гапаляк Х.О. Математичне моделювання екологічних процесів за допомогою систем лінійних диференціальних рівнянь // Інформаційні технології галузі. Науковий вісник НЛТУ України. Збірник науково-технічних праць. – 2011. – Вип. 21. №6. С. 330-334.

93. Павлов А.В. МГУА как инструмент анализа взаимосвязей многомерного процесса // Индуктивное моделювання складних систем. Збірник наукових праць. Відпов. редактор В.С. Степашко – Київ: МННЦ ІТС, 2009. – Вип. 1 – 236с. – С.80-86.

94. Павлов А.В. Обобщённый релаксационный итерационный алгоритм МГУА // Индуктивное моделювання складних систем. Збірник наук. праць. – К.: МННЦІТС, 2011. – С. 130-143.

95. Попов О.О. Стохастична модель забруднення приземної атмосфери від підприємств паливної енергетики (на прикладі ТЕЦ) // Зб. наук. праць ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – Київ: ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2009 – № 53 – С. 10-17.

96. Порплиця Н.П., Гураль І.В., Дивак М.П. Метод структурної ідентифікації моделей процесу бродіння у біогазових установках із застосуванням алгоритму бджолоїної колонії // Науковий вісник НЛТУ України, 2017. – Т. 27, № 1 –С.215-221.

97. Порплиця Н.П., Дивак М.П. Реалізація методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на основі алгоритму поведінки бджолоїної колонії // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 4(93). – С.34-40.

98. Порплиця Н.П., Дивак М.П. Синтез структури інтервального різницевого оператора з використанням алгоритму бджолоїної колонії // Индуктивное моделювання складних систем. – 2013. – Вип. 5. – С. 256-269.

99. Порплиця Н.П., Дивак Т.М. Особливості програмної реалізації методу структурної ідентифікації інтервальних різницевих операторів на

основі алгоритму бджолоїної колонії // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2015) : Матеріали V Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль : ТНЕУ, 2015. – С. 32-35.

100. Порплиця Н.П. Порівняльний аналіз ефективності генетичного та «бджолоїного» алгоритмів у задачі структурної ідентифікації інтервального різницевого оператора // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2015. – № 1. – С. 55-67.

101. Рапопорт Э.Я. Анализ и синтез систем автоматического управления с распределёнными параметрами: учебное пособие // М.:Высш.шк., 2005. –292с.

102. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами: учебное пособие // М.:Высш. шк., 2003. – 299 с.

103. Растрингин Л.А. Адаптация сложных систем // Рига: Зинатне. – 1981. – 359 с.

104. Растрингин Л.А. Современные принципы управления сложными объектами // Советское радио. – Москва, 1980. – 232 с.

105. Рогожин О.Г., Хлобистов Є.В., Яковлев Є.О. Інформаційний інструментарій оцінки екологічних ресурсів в Україні // Математичне моделювання в економіці – К., 2015. – №3. – С. 13-26.

106. Самойленко О.А., Степашко В.С. Конструювання комплексної системи інформаційної підтримки управлінських рішень // Збірник праць. – Київ: МННЦ ІТС. 2009. – С. 211-219.

107. Сарычев А.П., Сарычева Л.В. Итерационный алгоритм МГУА для решения задачи нелинейного дискриминантного анализа // Индуктивное моделирование сложных систем : збірник наук. праць. – Київ: МННЦ ІТС, 2010. – Т. 2. – С. 212–225.

108. Сейдж А., Мелс Дж. Идентификация систем // М.:Наука, 1976. 495с.

109. Синтяев Ю.Н. Исследование корректности дифференциального оператора первого порядка // Воронежская зимняя математическая школа С.Г. Крейна. Тезисы докладов. – Воронеж : ВГУ – 2010. – С. 135-136.

110. Скоб Ю.А. Математическое моделирование выброса и рассеяния в атмосфере газообразных примесей // Вестник Харк. нац. ун-та. – 2007. – № 775. Сер. “Математическое моделирование. Информационные технологии. Автоматизированные системы управления”. – Вып. 7. – С. 236-245.

111. Сонькин Л.Р. Синоптико-статистический анализ и краткосрочный прогноз загрязнения атмосферы // Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 250 с.

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

113. Степашко В.С. Елементи теорії індуктивного моделювання. Стан та перспективи розвитку інформатики в Україні: монографія // Київ: Наукова думка, 2010. – С. 481-496.

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

115. Степашко В.С., Єфіменко С.М., Савченко Є.А. Комп'ютерний експеримент в індуктивному моделюванні // Київ: Наукова думка, 2014. 222 с.

116. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: Монографія // Під заг. ред. С.О. Субботіна. Запоріжжя: ЗНТУ, 2009. – 375с.

117. Тимчишин В.С., Порплиця Н.П. Програмний комплекс для моделювання забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології (АСІТ'2017) : Матеріали VII



Всеукраїнської школи-семінару молодих вчених і студентів. – Тернопіль : ТНЕУ, 2017. – С. 132-134.

118. Хансен Э., Уолстер Дж.В. Глобальная оптимизация с помощью методов интервального анализа // М. Ижевск:НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, Институт компьютерных исследований, 2012. – 516 с.

119. Цой Ю.Р., Спицын В.Г. Генетический алгоритм // Представление знаний в информационных системах : учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2006г. – 146 с.

120. Цыпкин Я.З. Детерминированные и стохастические системы управления // М. : Наука, 1984. – С. 200.

121. Шарый С.П. Конечномерный интервальный анализ // Учеб. пособие. – Новосибирск: XYZ, 2016. – 617 с.



122. Щербань А.Н., Примаков А.В., Стеклогоров Е.Б. Комплексная оценка и оперативное прогнозирование суммарного загрязнения атмосферы // Промышленная теплотехника. – 1980. – Т. 2. – С. 108-118.

## Додаток А

Акти про використання результатів дисертаційного дослідження



ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач Тернопільського міського  
Відділу державної установи  
«Тернопільський обласний  
лабораторний центр МОЗ України»


 Поліщук А.О.  
« 15 » \_\_\_\_\_ 2018 р.
**АКТ**


про впровадження результатів дисертаційної роботи

**Масляка Юрія Богдановича**«Інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами  
автотранспорту та методи їх ідентифікації»

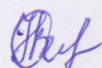
Ми, комісія у складі: Дементьєва Юрія Григоровича, Нападій Ольги Василівни, склали даний акт про те, що при оцінюванні стану довкілля м. Тернополя використано такі результати дисертаційної роботи аспіранта кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету Масляка Юрія Богдановича: інформаційна технологія для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту, яка інтегрує методи та засоби параметричної і структурної ідентифікації з процедурами автоматизованого формування набору структурних елементів різницевих рівнянь на основі кластерного аналізу інтервальних даних; комплекс інтервальних дискретних моделей динаміки концентрацій діоксиду азоту та оксиду вуглецю внаслідок забруднень шкідливими викидами автотранспорту; програмно-апаратна система для моніторингу шкідливих викидів автотранспорту.

Розроблені програмно-апаратна система, інформаційна технологія, та комплекс інтервальних моделей забезпечують гарантовану точність прогнозування забруднень атмосфери в залежності від заданої інтенсивності транспортних потоків та дають можливість зменшити витрати на вимірювання концентрацій зазначених шкідливих речовин за рахунок моделювання та прогнозування їх динаміки.

Заступник директора з дослідження  
фізичних та хімічних факторів  
державної установи «Тернопільський  
обласний лабораторний центр МОЗ  
України»


 Ю. Г. Дементьєв

Біолог санітарно-гігієнічної лабораторії  
державної установи «Тернопільський  
обласний лабораторний центр МОЗ  
України»


 О.В. Нападій



ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
економічного університету  
д.е.н., проф. Задорожний З.-М. В.

11

2018р.

## АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
**Масляка Юрія Богдановича**

«Інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами  
автотранспорту та методи їх ідентифікації»

Комісія у складі голови – декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, керівника держбюджетного прикладного дослідження, д.т.н., проф. Дивака М.П. та членів – начальника НДЧ Письменного В.І. і керівника науково-технічної (експериментальної) розробки, к.т.н., доц. Войтюк І.Ф., склала даний акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Масляка Ю.Б. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій з безпосередньою участю автора, а саме:

- держбюджетної науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507), у якій автором створено інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та комплекс інтервальних дискретних моделей динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту;
- держбюджетного прикладного дослідження «Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах шії» (державний реєстраційний номер 0117U000410), у якій автором удосконалено метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, який, на відміну від існуючого, містить процедури автоматизованого формування набору структурних елементів на основі методу субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних.

**Голова комісії**

Декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
керівник держбюджетного  
прикладного дослідження, д.т.н., проф.,  
заслужений діяч науки і техніки України

М.П. Дивак

**Члени комісії**

Начальник НДЧ

В.І. Письменний

Керівник науково-технічної  
розробки, к.т.д., доц.

І.Ф. Войтюк



ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з наукової роботи  
Тернопільського національного  
економічного університету  
д.е.н., проф. Задорожний З.-М. В.

11 2018р.

### АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи  
**Масляка Юрія Богдановича**

«Інтервальні моделі процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами  
автотранспорту та методи їх ідентифікації»

Комісія у складі голови – декана факультету комп'ютерних інформаційних технологій, керівника держбюджетного прикладного дослідження, д.т.н., проф. Дивака М.П. та членів – начальника НДЧ Письменного В.І. і керівника науково-технічної (експериментальної) розробки, к.т.н., доц. Войтюк І.Ф., склала даний акт про те, що дослідження та результати дисертаційної роботи Масляка Ю.Б. використані під час виконання науково-дослідних робіт на кафедрі комп'ютерних наук факультету комп'ютерних інформаційних технологій з безпосередньою участю автора, а саме:

- держбюджетної науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом» (державний реєстраційний номер 0116U005507), у якій автором створено інформаційну технологію для комп'ютерного моделювання процесів забруднення атмосфери шкідливими викидами автотранспорту та комплекс інтервальних дискретних моделей динаміки концентрацій шкідливих викидів автотранспорту;
- держбюджетного прикладного дослідження «Математичне та програмне забезпечення для класифікації тканин хірургічної рани в процесі операції на органах шії» (державний реєстраційний номер 0117U000410), у якій автором удосконалено метод структурної ідентифікації інтервальних дискретних динамічних моделей на основі поведінкових моделей бджолоїної колонії, який, на відміну від існуючого, містить процедури автоматизованого формування набору структурних елементів на основі методу субтрактивної кластеризації вибірки вхідних даних.

#### Голова комісії

Декан факультету комп'ютерних  
інформаційних технологій,  
керівник держбюджетного  
прикладного дослідження, д.т.н., проф.,  
заслужений діяч науки і техніки України

М.П. Дивак

#### Члени комісії

Начальник НДЧ

В.І. Письменний

Керівник науково-технічної  
розробки, к.т.д., доц.

І.Ф. Войтюк



## Додаток Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

1. Dyvak M., Stakhiv P., Pukas A., Voytyuk I., Porplytsya N., Maslyiak Y. Interval model of dynamics of dispersion of harmful pollution from vehicular traffic // *Journal of Applied Computer Science*. 2016. Vol. 24, № 3. P. 49-60.
2. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyak Y., Shynkaryk M. Method of parametric identification for interval discrete dynamic models and the computational scheme of its implementation // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer. 2018. Vol. 689. P. 101-112.
3. Дивак М.П., Порплиця Н.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Мельник А.М. Метод ідентифікації моделей об'єктів із розподіленими параметрами з просторово розподіленим керуванням на основі аналізу інтервальних даних // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. № 2. С. 150-159.
4. Дивак М.П., Масляк Ю.Б., Пукас А.В., Порплиця Н.П., Войтюк І.Ф., Тимчишин В.С. Архітектура системи екологічного моніторингу та приклад її застосування для моделювання концентрацій шкідливих викидів автотранспорту // *Індуктивне моделювання складних систем: зб. наук. пр. Київ, 2017. Вип. 9. С. 69-84.*
5. Масляк Ю.Б. Метод моделювання розподілу концентрацій шкідливих викидів автотранспорту з використанням кластерного та інтервального аналізів // *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2018. № 1 (26). С. 34-40.
6. Dyvak M., Maslyiak Y., Porplytsya N., Pukas A., Dyvak T. Drywall humidity modeling during its drying process under condition of changing the temperature fields based on interval difference operator / *Proc. of the 13th Intern.*

Conf. on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. 2016. P. 136-139.

7. Dyvak M., Porplytsya N., Maslyiak Y., Kasatkina N. Modified artificial bee colony algorithm for structure identification of models of objects with distributed parameters and control // Proc. Of the 14th Intern. Conf. on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2017). 2017. P. 50-54.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- 13-й та 14-й міжнародних конференціях “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science” TCSET (Львів–Славське, 2016, 2018.);

- 12-й та 13-й міжнародних науково-технічних конференціях “Computer Science and Information Technologies” CSIT (Львів, 2017, 2018);



- 14-й та 15-й міжнародних конференціях “The Experience of Designing and Application of CAD Systems” CADSM (Львів–Поляна, 2017, 2019);
- 18-й міжнародній конференції “Computational Problems of Electrical Engineering” CPEE (Кутна Гора, Чеська Республіка, 2017);
- 14-й міжнародній конференції “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH (Львів–Поляна, 2018); 1-й науково-технічній конференції «Теоретичні та прикладні аспекти радіотехніки і приладобудування» (Тернопіль, 2011);
- 4-й, 6-й Всеукраїнських школах-семінарах молодих вчених і студентів та 7-й Всеукраїнській конференції з міжнародною участю “Advanced Computer Information Technology” ACIT (Тернопіль, 2014, 2016, 2017);
- міжнародній конференції “Advanced Computer Information Technology” ACIT (Чеське Будейовіце, Чеська Республіка, 2018);
- наукових семінарах кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету (2015-2019 рр.).