

Нечітке моделювання запиленості атмосфери в місті Києві

На основі моделі нечіткої логіки розраховано індекс запиленості атмосферного повітря в місті Києві за результатами вимірювання концентрації твердих часток типу PM1, PM2.5 і PM10 станціями екологічного моніторингу. Модель має 301-бальну шкалу, яка на своїх границях є сумісною зі шкалою визначення індексу якості повітря AQI від агенції EPA (США). Модель побудована за алгоритмом Мамдані, має три входи і один вихід із трьома функціями належності кожній. Вхідні дані є значеннями концентрації твердих часток типу PM1, PM2.5 та PM10. База нечітких правил має 27 формул нечіткого виведення. Модель розроблена в пакеті MATLAB і може бути основою експертної системи з оцінювання рівня небезпеки для здоров'я людини за результатами вимірювання концентрації твердих часток, перш за все фракцій із малою дисперсністю.

Ключові слова: індекс якості повітря; тверді частки; нечітка логіка; алгоритм Мамдані; правила нечіткого виведення.

Вступ. Нечіткі моделі дозволяють будувати експертні системи, в яких вхідні функції мають форму дійсних чисел, а вихідна – бальну оцінку із якісною характеристикою лінгвістичного типу, наприклад, «малий», «середній», «великий». Наразі нечітким моделюванням користуються фахівці різних галузей, таких як охорона здоров'я, екологія, економіка, освіта тощо.

При оцінюванні рівня запиленості атмосферного повітря частками різної дисперсності необхідно врахувати вплив окремо кожної із фракцій, щоб отримати таку оцінку їх загальної негативної дії, яка буде адекватною до кожного із ризиків для дихального тракту людини. Алгоритми нечіткого моделювання якраз і вирішують це завдання. При побудові нечіткої моделі, на нашу думку, варто відмовитися від прямого використання показників концентрації твердих часток типу PM1, PM2.5 і PM10, а перейти до спектральних складових концентрації твердих часток. Вибір такої системи координат для вхідних даних позбавляє нечітку модель від впливу перекриття множин часток різного розміру і надає розробнику три взаємно незалежні вхідні координати.

Постановка проблеми. Дані про концентрацію твердих часток типу PM1, PM2.5 і PM10 можна вільно отримати на всесвітньому ресурсі ESOBOT [1]. Останні два із цих показників належать до шістки забруднювачів, які визначають коефіцієнт якості повітря Air Quality Index (AQI) в таких країнах, як США та Україна [2]. Формула і параметри для розрахунку розроблені агенцією EPA (США). Вихідна шкала AQI бальна і її основний діапазон належить інтервалу [0–301].

Існує також інший алгоритм визначення AQI, за яким цей індекс розраховують із кускової лінійної залежності для концентрації часток PM2.5. Київські станції екологічного моніторингу надають індекс якості повітря саме за концентрацією твердих часток PM2.5.

При вимірюванні концентрації твердих часток в атмосферному повітрі воно проходить послідовно через фільтри із різною фільтруючою здатністю. За результатами вимірювання тверді частки типу PM1 є підмножиною часток типу PM2.5, яка в свою чергу належить до множини часток типу PM10 (рис. 1).

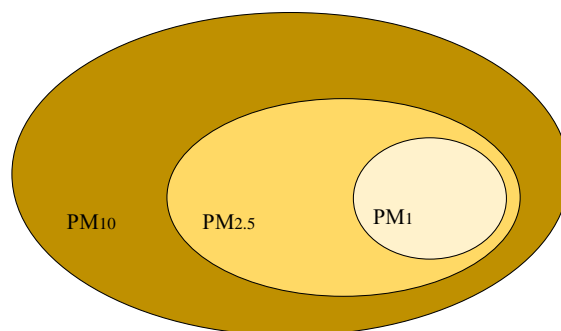


Рис. 1. Концентрація твердих часток в атмосферному повітрі після послідовного проходження фільтрів з ефективним розміром чарунки в 10 мкм, 2,5 мкм та 1 мкм

Для побудови моделі спочатку необхідно обрати систему незалежних координат, якими є різниці концентрацій часток:

$$PM_{10-2.5} = PM_{10} - PM_{2.5}; \quad (1)$$

$$PM_{2.5-1} = PM_{2.5} - PM_1. \quad (2)$$

Третьою координатою обрано концентрацію PM_1 .

В теорії множин формули (1–2) набувають такого вигляду:

$$PM_{10-2.5} = \neg(PM_{10} \& PM_{2.5}); \quad (3)$$

$$PM_{2.5-1} = \neg(PM_{2.5} \& PM_1). \quad (4)$$

Складова $PM_{10-2.5}$ утворюється із різниці показників PM_{10} та $PM_{2.5}$ (рис. 2).

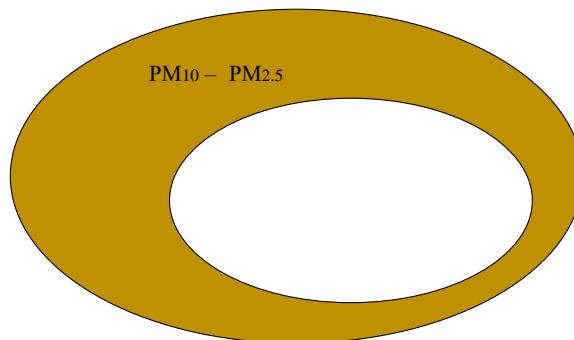


Рис. 2. Визначення спектральної складової $PM_{10-2.5} = PM_{10} - PM_{2.5}$ концентрації твердих часток

У свою чергу спектральна складова $PM_{2.5-1}$ утворюється із різниці показників $PM_{2.5}$ та PM_1 (рис. 3).

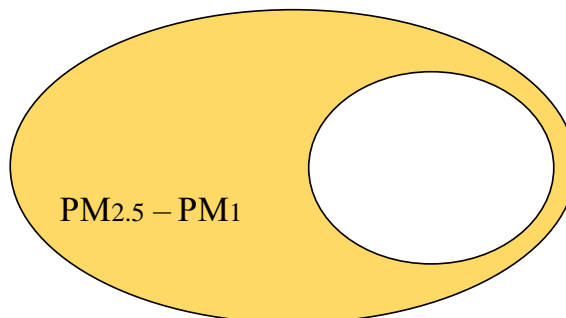


Рис. 3. Визначення спектральної складової $PM_{2.5-1} = PM_{2.5} - PM_1$ концентрації твердих часток

Спектральний склад твердих часток за їх розмірами в атмосфері мегаполісу є вкрай мінливим і залежить від швидкості вітру, вологості повітря, інтенсивності автомобільного трафіка, викидів промислових підприємств, аварійних ситуацій в комунальному господарстві, активності будівельних компаній тощо. Тривале спостереження і аналіз даних від ЕСОВОТ [1] надають такі середні пропорції для спектральних складових твердих часток в атмосфері Києва:

- до 1 мкм – 40 % від PM_{10} ;
- від 1 мкм до 2,5 мкм – 20 % від PM_{10} ;
- від 2,5 мкм до 10 мкм – 40 % від PM_{10} .

Нуль є нижньою границею для усіх трьох спектральних складових. Призначаємо граничний рівень для PM_{10} у 250 мкг/куб. м. Тоді верхні граничні значення вхідних функцій нечіткої моделі запиленості матимуть такі числові параметри:

- $Sup PM_1 = 100$ мкг/куб. м;
- $Sup PM_{2.5-1} = 50$ мкг/куб. м;
- $Sup PM_{10-2.5} = 100$ мкг/куб. м.

Іншим важливим завданням є визначення принципу, за яким у моделі будуть прописані правила нечіткого виведення. Приймаємо принцип ЕРА [2], за яким вихідна лінгвістична (якісна) оцінка відповідає найгіршій в екологічному сенсі оцінці із трьох вхідних. Так, позначивши вхідні оцінки як «низька», «середня», «висока» і вихідні оцінки – «добрий», «задовільний», «шкідливий», отримаємо такі схеми для правил нечіткого виведення:

- якщо хоча б одна із трьох вхідних оцінок є «висока», то індекс запиленості «шкідливий»;
- якщо на входах усі три оцінки «середні», то індекс запиленості «задовільний»;

- якщо дві «середні» і одна «низька» оцінки на входах, то індекс запиленості «задовільний»;
- якщо маємо дві оцінки «низька» і одну «середня» на входах, то індекс запиленості «задовільний»;
- якщо усі три оцінки на входах «низькі», то індекс запиленості «добрий».

Приклади сучасних джерел в галузі нечіткого моделювання доводять універсальність цього методу для метрології в цілому [3], а також при вимірюванні викидів в атмосферу [4] зокрема.

Нечітке моделювання дозволяє створити експертну систему для оцінювання загального рівня запиленості атмосферного повітря з урахуванням спектрального складу твердих часток різної дисперсності в місті Києві, що підвищує безпеку мешканців, особливо тих, хто належить до груп ризику за станом здоров'я, перш за все із ослабленим дихальним трактом. Існуюча наразі оцінка якості повітря – AQI – не є, на нашу думку, адекватною до вирішення окресленого завдання.

Метою роботи є розробка нечіткої моделі оцінювання запиленості атмосферного повітря із підвищеною точністю за рахунок врахування дисперсного складу твердих часток і експериментальна перевірка моделі на вибірці даних станцій екологічного моніторингу в місті Києві.

Викладення основного матеріалу. При створенні нечіткої моделі запиленості повітря в місті Києві був використаний модуль Fuzzy Logic Tool Box пакета MATLAB [5].

При розробці нечіткої моделі задаємо такі вихідні параметри:

- тип алгоритму – Мамдані;
 - кількість входів – три; до усіх входів вводимо концентрацію твердих часток у мкг/куб. м;
 - кількість виходів – один; вихід має 301-бальну шкалу для оцінювання запиленості атмосферного повітря;
 - кількість функцій належності – по три для кожного входу і виходу;
 - тип функцій належності для входів – Гауса;
 - тип функцій належності для виходу – трикутний;
 - лінгвістичні терми для входів: «низька», «середня», «висока» (терми позначають концентрацію твердих часток);
 - лінгвістичні терми для виходу: «добрий», «задовільний», «шкідливий» (терми позначають рівень запиленості атмосферного повітря);
 - назва проєкту: «Атмосферний пил – 1»;
 - назви входів: «PM1», «PM2.5-1», «PM10-2.5»;
 - назва виходу: «PM-індекс»;
 - кількість правил нечіткого виведення – 27;
 - діапазон для входу PM1: [0–175.4];
 - діапазон для входу PM2.5-1: [0–75];
 - діапазон для входу PM10-2.5: [12–374];
 - діапазон (до корегування) для виходу PM-індекс: [0–301].
- Поверхня рішень для вхідних координат наведена на рисунку 4.

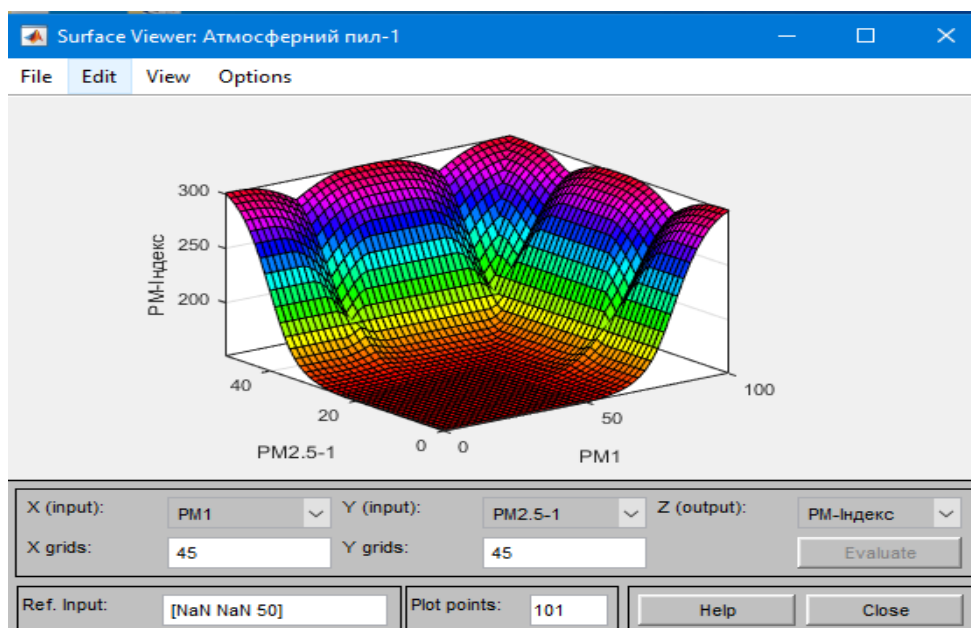


Рис. 4. Поверхня рішень для вхідних координат PM1 і PM2.5-1

Поверхня рішень для вхідних координат PM2.5-1 і PM10, а також для PM10-2.5 і PM1 мають аналогічний до наведеного на рисунку 4 вигляд. Поверхня рішень має характерні відхилення від всієї опуклої форми у вигляді чотирьох осередків локальних мінімумів.

Для сумісності шкали PM-індексу зі шкалою AQI необхідне корегування границь діапазону PM-індексу. Експериментально визначаємо нові межі для PM-індексу:

- нижня межа дорівнює -62,1;
- верхня межа дорівнює 363.

У Києві розташовано 406 станцій екологічного моніторингу [1], з яких активними наразі є 90. В середмісті Києва локалізовано десять станцій екологічного моніторингу, дані концентрації твердих часток PM1, PM2.5 і PM10 від яких зведені до таблиці 1. Відповідно до методики ЕРА [2] розраховано коефіцієнт якості повітря AQI за показами PM2.5.

Таблиця 1

Вихідні дані та розрахований індекс якості повітря AQI для станцій екологічного моніторингу в місті Києві

№ з/п	Адреса станції екологічного моніторингу	Дата: 06.10.2022 р.; 17-00				Дата: 13.10.2022 р.; 17-00			
		PM1 µg/m ³	PM2.5 µg/m ³	PM10 µg/m ³	AQI (PM2.5)	PM1 µg/m ³	PM2.5 µg/m ³	PM10 µg/m ³	AQI (PM2.5)
1	Просп. Валерія Лобановського, 6-Д	3,6	5,1	5,5	21	4,8	7,2	8,2	30
2	Вул. Михайла Донця, 2-А	3,4	5	11,8	21	1,9	2,9	6,3	12
3	Вул. Солом'янська, 32	9,3	10,3	17	49	3,7	5,9	13,7	25
4	Вул. Сім'ї Сосніних, 2	2,4	3,8	10,6	16	2,9	4,5	9,6	19
5	Вул. Львівська, 20	4,3	6,1	13,4	25	3,2	4,5	7	19
6	Вул. Ігоря Турчина, 11-А	2,9	4,7	11,6	20	3,7	5,2	9,9	22
7	Вул. Миколи Шепелева, 10	8,6	14	16,7	58	8	14,1	20,8	58
8	Вул. Щусєва, 21	6,4	8,2	16,2	34	10	13,6	25,3	56
9	Вул. Семашка, 24	1,9	3,5	9,9	15	4,4	6,5	13,1	27
10	Просп. Героїв Сталінграда, 55	4,4	6,9	16,4	29	3,4	5,2	8,9	22

На рисунку 5 наведено індекс якості повітря AQIPM2.5.

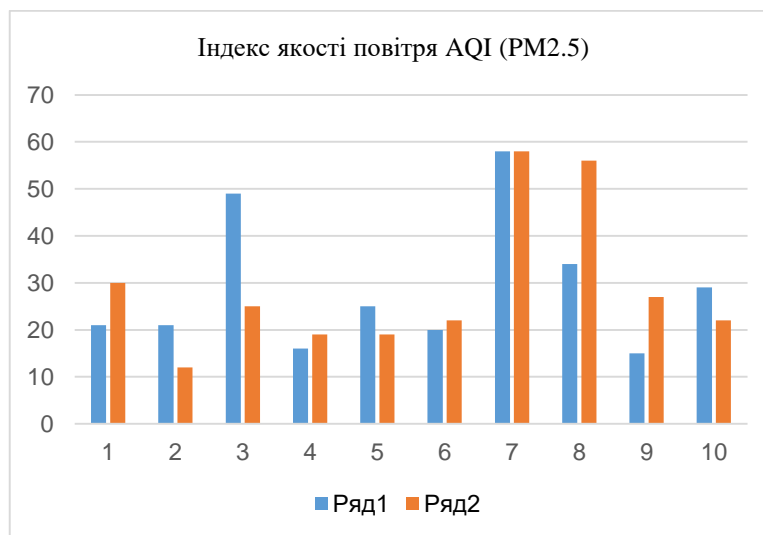


Рис. 5. Індекс якості повітря AQIPM2.5: Ряд 1 – дані від 6 жовтня 2022 р.; Ряд 2 – дані від 13 жовтня 2022 р.; номери під діаграмами вказують на адресу станції відповідно до даних таблиці 1

Нечітке моделювання реалізовано в меню Rules модуля Fuzzy Logic Tool Box. Результат моделювання для станції на проспекті Героїв Сталінграда, 55 о 17-00 06 жовтня 2022 р. (рис. 6). PM-індекс = 21,7 (на повній 301-бальній шкалі).

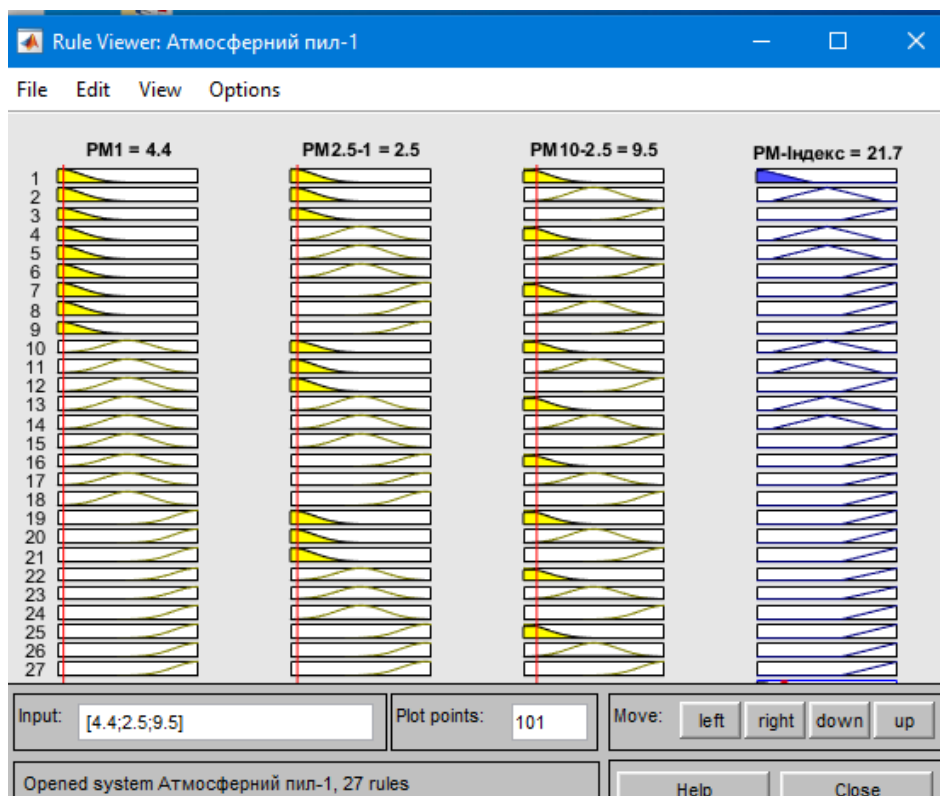


Рис. 6. Результат нечіткого моделювання: РМ-індекс = 21,7; дані для станції № 10 із таблиці 1 станом на 17 год 00 хв 06 жовтня 2022 р.

Результати розрахунку спектральних складових твердих часток на основі даних таблиці 1 наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Спектральні складові твердих часток та РМ-індекс

№ з/п	Адреса станції екологічного моніторингу	Дата: 06.10.2022 р.; 17-00				Дата: 13.10.2022 р.; 17-00			
		PM1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM2.5-1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10-2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM-Індекс	PM1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM-Індекс
1	Просп. Валерія Лобановського, 6Д	3,6	1,5	0,4	5,3	4,8	2,4	1	7,8
2	Вул. Михайла Донця, 2-А	3,4	1,6	6,8	12,7	1,9	1	3,4	5
3	Вул. Солом'янська, 32	9,3	1	6,7	20,9	3,7	2,2	7,8	15,7
4	Вул. Сім'ї Сосніних, 2	2,4	1,4	6,8	12,7	2,9	1,6	5,1	8,4
5	Вул. Львівська, 20	4,3	1,8	3	6,7	3,2	1,3	2,5	4,6
6	Вул. Ігоря Турчина, 11-А	2,9	1,8	4	6,1	3,7	1,5	4,7	7,6
7	Вул. Миколи Шепелева, 10	8,6	5,4	2,7	27	8	6,1	6,7	33,5
8	Вул. Щусєва, 21	6,4	1,8	1,6	11,6	10	3,6	11,7	31,1
9	Вул. Семашка, 24	1,9	6,4	9,9	36,5	4,4	2,1	6,6	12,2
10	Просп. Героїв Сталінграда, 55	4,4	2,5	9,5	21,7	3,4	1,8	3,7	5,5

До таблиці 2 також внесені результати нечіткого моделювання (в останніх стовпчиках для першої і другої дати спостереження) у вигляді індексу запиленості повітря, які розташовані у стовпчику «РМ-індекс». Аналогічно до прикладу (рис. 6) були отримані інші 19 результатів моделювання. Усі значення РМ-індексу наведені на діаграмах (рис. 7).

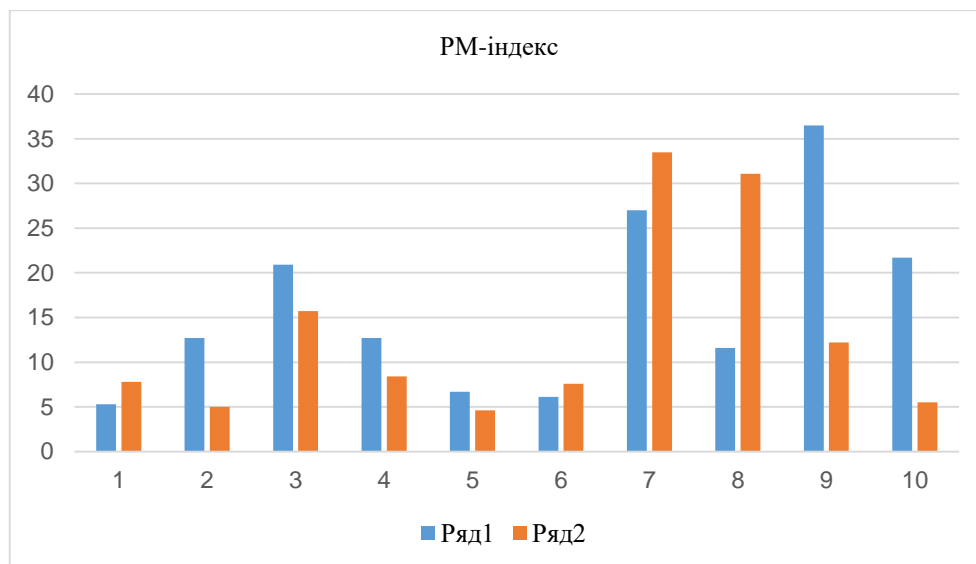


Рис. 7. PM-індекс, який був визначений за результатами нечіткого моделювання: Ряд 1 – на 17-00 06 жовтня 2022 р.; Ряд 2 – на 17-00 13 жовтня 2022 р.; вхідні дані моделі взято із таблиці 2

Порівняльний аналіз діаграм для AQI (рис. 5) та PM-індексу (рис. 7) виявляє деяку їх подібність. Проте, оскільки призначення цих коефіцієнтів є різним, то їх повна подібність не є обов'язковою ознакою.

Висновки. В результаті виконання роботи розроблено нечітку модель для оцінювання стану запиленості атмосферного повітря і проведено її експериментальну перевірку на масиві даних, які були отримані від станцій екологічного спостереження в місті Києві 6 та 13 жовтня. Особливостями нечіткої моделі є:

- врахування спектрального складу твердих часток за їх дисперсністю, зокрема часток із суб-мікронним розміром;
- нормалізація шкали оцінювання на її границях відповідно до рекомендацій агенції EPA для визначення коефіцієнта якості повітря AQI, а саме 0 для нижньої та 301 для верхньої границі;
- застосування алгоритму Мамдані із трьома функціями належності типу Гауса для кожного із трьох входів і трьома функціями належності трикутного типу – для нечіткого виходу;
- повна база знань із 27 нечітких правил виведення, які побудовані за принципом найгіршої оцінки для трьох входів;
- перерізи поверхні рішень для усіх пар вхідних координат має по два локальні мінімуми, що є критерієм невизначеності оцінювання внаслідок відхилення форми поверхні від всюдю опуклої.

На основі розробленої нечіткої моделі можлива побудова експертної системи з оцінювання стану запиленості повітря в місті з метою запобігання захворювань дихального тракту мешканців, особливо із груп ризику.

Модель довела свою ефективність для малої вибірки даних, що є перевагою нечіткого алгоритму перед класичними методами математичної статистики.

Наступними етапами розбудови і вдосконалення нечіткої моделі є:

- включення четвертої вхідної координати (функції малоого впливу) для врахування швидкості вітру, адже від неї залежить дисперсний склад твердих часток;
- розробка нової бази знань для чотирьох входів, яка складається із 81 правила нечіткого виведення;
- розробка модифікацій моделі на основі інших типів функцій належності для входів і виходу.

References:

1. *SaveEcoBot*, [Online], available at: <https://www.saveecobot.com/maps#12/50.4000/30.5307/aqi>
2. EPA 454/B-18-007 (2018), *Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI)*, September, 22 p.
3. Bloul, B. (2018), *Fuzzy Logic Applications in Metrology Processes*, Intechopen Published, 19 p., doi: 10.5772/intechopen.79381.
4. Saini, J., Dutta, M. and Marques, G. (2021), *Fuzzy Inference System Tree with Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm: A novel approach for PM10 forecasting*, *Expert Systems With Applications*, 12 p., doi: 10.1016/j.eswa.2021.115376.
5. Godfrey, H. (2016), *Fuzzy Logic with MATLAB*, Great Space Independent Publishing Platform, North Charleston, SC., 328 p., [Online], available at: <https://dl.acm.org/doi/book/10.5555/3126444>

Божко Костянтин Михайлович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-6347-7442>.

Наукові інтереси:

- фотоелектричні сонячні елементи та батареї;
- коронний бар'єрний розряд;
- нечітка логіка;
- моніторинг якості повітря.

Морозова Ірина Володимирівна – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0001-7237-6769>.

Наукові інтереси:

- фотоелектричні сонячні елементи та батареї;
- коронний бар'єрний розряд;
- нечітка логіка;
- моніторинг якості повітря.

Bozhko K.M., Morozova I.V.

Fuzzy modeling of atmospheric dustiness in Kyiv

Based on the fuzzy logic model, the atmospheric air dustiness index in the city of Kyiv was calculated based on the results of measuring the concentration of solid particles such as PM1, PM2.5 and PM10 by environmental monitoring stations. The model has a 301-point scale, which at its borders is compatible with the AQI Air Quality Index determination scale from the Environmental Protection Agency (EPA) (USA). The model is built according to the Mamdani algorithm and has three inputs and one output with three membership functions each. The input data is the concentration values of solid particles such as PM1, PM2.5, and PM10. The fuzzy rule database has 27 fuzzy inference formulas. The model is developed in the MATLAB package and can be the basis of an expert system for assessing the level of danger to human health based on the results of measuring the concentration of solid particles, primarily fractions with low dispersion.

Keywords: air quality index; solid particles; fuzzy logic; Mamdani algorithm; fuzzy inference rules.

Стаття надійшла до редакції 22.08.2022.