

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ  
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ  
СІКОРСЬКОГО»**

**Приладобудівний факультет**

**Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Володимир ЄРЕМЕНКО

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023р.

**Дипломний проєкт**

**на здобуття ступеня бакалавра**

**за освітньо-професійною програмою «Інформаційні вимірювальні технології  
екологічної безпеки»**

**спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»**

**на тему: «Вимірювач концентрації пилу із розширеним набором  
функцій DM72T»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ПН-91

Ільченко Анастасія Андріївна

\_\_\_\_\_

Керівник:

доцент, к.т.н.,

Божко Костянтин Михайлович

\_\_\_\_\_

Рецензент:

старший викладач

Зайцев Віктор Миколайович

\_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студентка \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

# ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

| № з/п | Формат | Позначення          |  |  | Найменування                                               | Кількість листів | Примітка |  |
|-------|--------|---------------------|--|--|------------------------------------------------------------|------------------|----------|--|
| 1     | A4     |                     |  |  | Завдання на дипломний проєкт                               | 2                |          |  |
| 2     | A4     | ДП 152.9103.004 ПЗ  |  |  | Пояснювальна записка                                       | 58               |          |  |
| 3     | A4     | ДП 152.9103.004 Е1  |  |  | Монітор якості повітря DM72-Т. Схема електрична структурна | 1                |          |  |
| 4     | A4     | ДП 152.9103.004 Е1  |  |  | Датчик формальдегіду. Схема електрична структурна          | 1                |          |  |
| 5     | A4     | ДП 152.9103.004 ЕЗ  |  |  | Датчик формальдегіду. Схема електрична принципова.         | 1                |          |  |
| 6     | A4     | ДП 152.9103.004 ПЕЗ |  |  | Перелік елементів датчика формальдегіда                    | 1                |          |  |
| 7     |        |                     |  |  | Лістинг програми нечіткої моделі                           | 5                |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  |          |  |
|       |        |                     |  |  |                                                            |                  | </       |  |

**Пояснювальна записка**  
**до дипломного проєкту**  
**на тему: «Вимірювач концентрації пилу із розширеним**  
**набором функцій DM72T»**

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Приладобудівний факультету**

**Кафедра інформаційно - вимірювальних технологій**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційні вимірювальні технології  
екологічної безпеки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Володимир ЄРЕМЕНКО

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проєкт (роботу) студенту  
Ільченко Анастасія Андріївна**

1. Тема проєкту «Вимірювач концентрації пилу із розширеним набором функцій DM72T», керівник проєкту Божко Костянтин Михайлович, к.т.н., затверджені наказом по університету від «30» травня 2023 р. № 2057-с

2. Строк подання студентом проєкту роботи 16.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проєкту

3.1. Конструктивні вимоги до приладу і його складових частин.

Габаритні розміри та маса виробу – мінімальні.

3.2. Умови експлуатації:

- Атмосферний тиск 86-106кПа
- Відносна вологість 20-85% при -10 до +50°C
- Напруга живлення 3,7-5 ±0,3В

3.3. Характеристики приладу:

3.4. Працює на основі стандартних сигналів постійного струму з границями зміни вхідних сигналів 0...1,5 В.

3.5. Діапазон вимірюваних концентрацій пилу від 0 до 999 мкг/м³

4. Зміст пояснювальної записки

4.1. Виконати аналіз проблеми вимірювання концентрації пилу.

- 4.2. Виконати огляд сучасних приладів для оцінювання якості повітря.
- 4.3. Обґрунтувати структуру приладу вимірювання концентрації пилу.
- 4.4. Розробити нечітку модель якості повітря.
- 4.5. Експериментальна перевірка розробленої моделі.
- 4.6. Виконати висновки

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) монітор якості повітря DM72-T (вимірювач концентрації пилу із розширеним набором функцій DM72T), схема електрична структурна, датчик формальдегіду, схема електрична структурна, датчик формальдегіду, схема електрична принципова.

6. Дата видачі завдання «07» квітня 2023 р.

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проєкту                                                                    | Термін виконання етапів проєкту | Примітка |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----------|
| 1.    | Вибір та затвердження теми                                                                                   | березень                        |          |
| 2.    | Формулювання та затвердження завдання                                                                        | березень                        |          |
| 3.    | Виконання першого та другого розділів, перевірка їх керівником                                               | квітень                         |          |
| 4.    | Виконання 3-4 розділів, перевірка їх керівником                                                              | травень                         |          |
| 5.    | Формування графічної частини ДП                                                                              | травень                         |          |
| 6.    | Оформлення та завершення ДП. Надання на розгляд керівнику                                                    | червень                         |          |
| 7.    | Надання ДП (електронний варіант) відповідальному на кафедрі для перевірки на наявність запозичень (плагіату) | червень                         |          |
| 8.    | Остаточна перевірка ДП керівником, надання відгуку                                                           | червень                         |          |
| 9.    | Попередній захист ДП                                                                                         | червень                         |          |
| 10.   | Рецензування                                                                                                 | червень                         |          |
| 11.   | Надання роботи відповідальному за організацію дипломного проєктування на кафедрі (друкований варіант)        |                                 |          |
| 12.   | Захист кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК                                                                | червень                         |          |

Студентка

Анастасія ІЛЬЧЕНКО

Керівник

Костянтин БОЖКО

## АНОТАЦІЯ

Дипломний проект «Вимірювач концентрації пилу із розширеним набором функцій DM72T» оформлений у виді пояснювальної записки, що містить 62 аркуша, 7 таблиць, 25 ілюстрацій та 5 додатків. До списку використаних джерел входять 12 бібліографічних найменувань.

Метою роботи є вдосконалення методу оцінки якості повітря на основі моделей нечіткої логіки.

У дипломному проекті розроблена математична модель нечіткої логіки для вимірювання якості повітря в жилих та робочих приміщеннях офісного типу.

Перевірка моделі нечіткої логіки здійснювалась за допомогою даних, отриманих за допомогою газоаналізатора DM72T. Експериментально доказана ефективність розробленої моделі.

Результати досліджень можуть бути використані в експертних системах екологічного моніторингу.

**Ключові слова:** нечітка логіка, якість повітря, модель Мамдані.

## SUMMARY

Bachelor's thesis "Dust Concentration Meter with an Extended Function Set DM72T" is presented in the form of an explanatory note containing 62 pages, 7 tables, 25 illustrations and 5 applications. The list of references includes 12 bibliographic titles.

The aim of the work is to improve the method of air quality assessment based on fuzzy logic models.

In the thesis project, a mathematical fuzzy logic model was developed to measure air quality in residential and office-type premises.

The fuzzy logic model was tested using data obtained using a DM72T gas analyser. The effectiveness of the developed model was experimentally proved.

The research results can be used in expert systems of environmental monitoring.

**Keywords:** fuzzy logic, air quality, Mamdani model.

## ЗМІСТ

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП .....                                                                              | 10 |
| РОЗДІЛ 1. НЕЧІТКА ЛОГІКА В СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО<br>МОНІТОРИНГУ .....                    | 12 |
| 1.1 Основні аспекти нечіткого моделювання.....                                           | 12 |
| 1.2 Огляд сучасних систем вимірювання концентрації пилу.....                             | 22 |
| Висновки до розділу 1 .....                                                              | 23 |
| РОЗДІЛ 2. ПОРТАТИВНИЙ МОНІТОР ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ<br>ПОВІТРЯ DM72T .....               | 24 |
| 2.1. Газоаналізатор DM72T .....                                                          | 24 |
| 2.2. Принцип роботи .....                                                                | 27 |
| 2.3. Переваги.....                                                                       | 28 |
| 2.4. Інфрачервоний датчик .....                                                          | 29 |
| 2.5. Електрохімічний датчик TVOC .....                                                   | 32 |
| 2.6. Електрохімічний датчик СНОН .....                                                   | 35 |
| 2.7. Оптоелектронний датчик.....                                                         | 39 |
| Висновки до розділу 2. ....                                                              | 41 |
| РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ.....                                 | 42 |
| 3.1 Вхідні данні .....                                                                   | 42 |
| 3.2 Функції належності.....                                                              | 43 |
| 3.3 Розробка правил нечіткої моделі.....                                                 | 45 |
| Висновки до розділу 3. ....                                                              | 50 |
| РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МОДЕЛІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ<br>В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB ..... | 51 |
| 4.1 Оцінювання якості повітря в приміщеннях .....                                        | 51 |
| 4.1.1 Загальні леткі органічні сполуки (TVOC) .....                                      | 51 |
| 4.1.2 Формальдегід (HCHO).....                                                           | 52 |
| 4.1.3 Вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> ).....                                            | 54 |
| 4.1.4 Тверді частинки (PM <sub>2.5</sub> ) .....                                         | 55 |
| 4.2 Отримання оцінки якості повітря по зібраним даним .....                              | 56 |
| Висновки до розділу 4. ....                                                              | 60 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                          | 62 |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| ДОДАТОК Б. ДАТЧИК ФОРМАЛЬДЕГІДУ. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА<br>СТРУКТУРНА ..... | 65 |
| ДОДАТОК В. ДАТЧИК ФОРМАЛЬДЕГІДУ. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА<br>ПРИНЦИПОВА. .... | 66 |
| ДОДАТОК Д. ПЕРЕКЛІК ЕЛЕМЕНТІВ ДАТЧИКА ФОРМАЛЬДЕГІДА.....              | 67 |
| ДОДАТОК Е. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ .....                     | 68 |

## ВСТУП

**Актуальність теми дослідження.** Існує багато причин, чому необхідно контролювати якість повітря не тільки в межах міських агломерацій, а ще в приміщеннях [1]. Однією з найважливіших причин є вплив поганої якості повітря на здоров'я та самопочуття людини. В жилих приміщеннях з високою концентрацією забруднюючих речовин в повітрі людина буде постійно почувати себе зле, а в приміщеннях офісів знизиться продуктивність роботи працівників. Немаловажною причиною є заощадження грошей. Повітря поганої якості в приміщенні може призвести до збільшення витрат на електроенергію, оскільки людям може знадобитися використовувати більше опалення або охолодження, щоб компенсувати низьку якість повітря. Це також може призвести до збільшення витрат на технічне обслуговування, оскільки будівельні матеріали та обладнання можуть бути пошкоджені забруднювачами в повітрі.

Ефективним інструментом екологічних досліджень є математичне моделювання [2]. Використання моделювання в задачах екології, зокрема оцінювання запиленості повітря було започатковано на кафедрі ІВТ в роботі [3].

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є вдосконалення методу вимірювання якості повітря на основі моделі нечіткої логіки. Вхідними даними для моделі є результати вимірювання концентрації викидів в повітрі монітором якості повітря типу DM72-T.

Поставлена мета досягається шляхом вирішення наступних задач:

- 1) Виконання огляду процесу моделювання із застосуванням апарату нечіткої логіки;
- 2) Розробка математичної моделі на основі нечіткої логіки для оцінювання якості повітря для чотирьох вимірювальних каналів – TVOC, HCHO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>;
- 3) Експериментально перевірити розроблену модель на основі даних, отриманих з приладу DM72T;

В процесі виконання проєкту мають бути також розроблені:

- схема електрична структурна вимірювача концентрації пилю із розширеними функціями (монітору якості повітря) DM72-T;
- схема електрична структурна датчика формальдегіду;
- схема електрична принципова датчика формальдегіду.

**Наукова новизна.** Наукова новизна полягає в застосуванні моделі Мамдані для оцінювання сумарної оцінки якості повітря за чотирма вимірювальними каналами: TVOC, HCHO, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>.

**Практична цінність.** Практична цінність досліджень полягає в отриманні оцінок сумарної оцінки якості повітря за результатами вимірювань в жилих та офісних приміщеннях в реальному часі.

## РОЗДІЛ 1. НЕЧІТКА ЛОГІКА В СИСТЕМАХ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

### 1.1 Основні аспекти нечіткого моделювання

Нечітка логіка – це тип логіки, пов'язаний з частковими істинами. Вона заснована на спостереженні, що людські міркування часто базуються на неточній або неповній інформації. Нечітка логіка є узагальненням класичної логіки на випадок, коли істинність розглядається як лінгвістична змінна, що приймає значення типу: "дуже істинно", "більш-менш істинно", "не дуже хибно" і т.п. Зазначені лінгвістичні значення представляються нечіткими множинами. Основна відмінність від класичної логіки полягає в тому, що замість значень «Істина» і «Хибність» в нечіткій логіці використовується ступінь істинності, що приймає значення з нескінченної множини від 0 (Хибність) до 1 (Істина) включно[4].

Основними принципами нечіткої логіки є:

1. **Нечіткі множини.** Нечіткі множини дозволяють виражати ступінь належності елементів до певної множини. Замість традиційного підходу "чорне або біле", нечіткі множини дозволяють використовувати градації, наприклад "надто чорний" чи "частково білий".

2. **Функції належності.** Функції належності визначають ступінь належності елементів до нечіткої множини. Вони визначаються за допомогою кривих або графіків, які показують, як ступінь належності змінюється залежно від значення.

3. **Логічні правила.** У нечіткій логіці використовуються нечіткі правила, що включають «Якщо...то...тоді» формулювання. Ці правила дозволяють моделювати нечіткі відношення між вхідними та вихідними змінними. Наприклад, «Якщо температура висока, то збільшити швидкість вентилятора».

4. **Інтерференція.** Інтерференція в нечіткій логіці включає обчислення ступеня належності для вихідних змінних на основі нечітких правил і значень вхідних змінних. Це може включати в себе обчислення середнього значення, агрегацію, дефазифікацію тощо.

5. **Розмиття.** Розмиття використовується для перетворення точних або чітких значень в нечіткі. Це може бути корисним для врахування невизначеності або варіацій у вхідних даних.

6. **Дефазифікація.** Дефазифікація використовується для перетворення нечітких значень вихідних змінних в чіткі або конкретні значення, що можуть бути використані для подальшого аналізу або дій

Розглянемо основні принципи роботи нечіткої логіки.

**Нечітка множина**  $\tilde{A}$ , що визначена на універсальній множині  $U$ , може бути описана як набір упорядкованих пар  $\tilde{A} = \{(\mu_A(x), x) : x \in U\}$ , де кожна пара складається з елементу  $x$  та його ступеня  $\mu_A(x)$  належності до множини  $\tilde{A}$  [3].

Приклад звичайної та нечіткої множини наведено на рисунку 1.1.

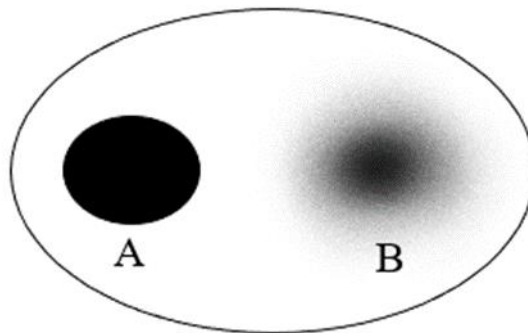


Рис. 1.1. Звичайна (A) і нечітка (B) множини

**Нормальна нечітка множина** ( $\tilde{A}$ ) є такою нечіткою множиною, висота якої дорівнює одиниці. Усі інші нечіткі множини належать до субнормальних.

Нормалізація є процесом перетворення субнормальної нечіткої множини на нормальну, шляхом поділу функції належності на її висоту:

$$(\tilde{A}) = \text{norm}(\tilde{A}) \Rightarrow \mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{A}_1}(x) / \text{height}(\tilde{A}_1) \quad (1.1)$$

Операцію нормалізації зазвичай виконують для кожного елемента  $u$  із нечіткої множини  $(\tilde{A})$  [3].

Носієм нечіткої множини  $(\tilde{A})$  є підмножина універсальної множини  $U$ , чий складові елементи мають ступені належності більші за нуль [3]:

$$\text{supp}(\tilde{A}) = \{x: \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\} \quad (1.2)$$

Нечітку множину вважають пустою, якщо її носій є порожньою множиною [3].

Ядро нечіткої множини  $(\tilde{A})$  складається з підмножини універсальної множини  $U$ , чий складові елементи мають ступені належності, рівні одиниці [3]:

$$\text{core}(\tilde{A}) = \{x: \mu_{\tilde{A}}(x) = 1\} \quad (1.3)$$

Альфа-перерізом нечіткої множини  $A$  є частка чіткої підмножини  $A$  універсальної множини  $U$  при цьому включаються лише ті елементи, які мають ступені належності, що більші або рівні  $\alpha$ :

$$A_{\alpha} = \{x: \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} \quad (1.4)$$

Нечітка множина повинна бути опуклою, якщо її ліва і права гілки мають граничні елементи, для яких вони досягають своїх мінімальних значень функції належності [3].

**Ступінь належності** визначається як число з діапазону  $[0,1]$ , при чому більший ступінь належності відповідає більшому відповідному елементу універсальної множини в контексті нечіткої логіки [3].

**Функція належності** ж використовується для обчислення ступеня належності довільного елемента універсальної множини до нечіткої множини.

**Лінгвістична змінна** визначається як змінна, значення якої можуть бути слова або мовні конструкції, наприклад: «високий», «задовільний», «небезпечний» або «зелений», «жовтий», «червоний».

**Терм-множина** є сукупністю всіх можливих значень лінгвістичної змінної[3].

**Терм** відноситься до будь-якого елемента, який належить до терм-множини[3].

**Висота** нечіткої множини визначається як верхня межа її функції належності:

$$\text{height}(\tilde{A}) = \sup \mu_A(x), \quad (1.5)$$

де  $x$  належить  $U$ .

логіка, ймовірно, відіграватиме ще більшу роль у майбутньому.

Під **дефазифікацією** нечіткої множини розуміємо процес перетворення нечіткої множини на конкретне числове значення. Позначимо дане число як  $Z_{\text{defuzzy}}$ . Один з найпростіших методів дефазифікації полягає в обранні чіткого числа з найвищим ступенем належності. Проте застосування даного способу обмежується лише однокстремальними функціями належності.

Якщо ж говорити більш широко, то для функцій належності із кількома екстремумами застосовують наступні методи дефазифікації:

- Метод центру ваги (Centroid);
- Медіаний метод (Bisector);
- Метод центру максимумів (Mean of Maximums);
- Метод із вибором найбільшого із максимумів (Largest of Maximums);
- Метод із вибором найменшого із максимумів (Smallest of Maximums) [3].

Для методу з використанням центру ваги із неперервною нечіткою множиною маємо (1.6):

$$Z_{\text{defuzzy}} = \frac{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x \mu(x) dx}{\int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \mu(x) dx} \quad (1.6)$$

Проте для дискретної нечіткої множини центр ваги  $Z_{\text{defuzzy}}$  буде визначатися за наступною формулою (1.7):

$$Z_{\text{defuzzy}} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^k \mu(x_i)} \quad (1.7)$$

Основні операції над нечіткими множинами будуть подібними до операцій булевої логіки [3]:

- заперечення;
- перетин;
- об'єднання.

Для функції належності при виконанні операції заперечення справедливим буде наступне рівняння (1.8):

$$\mu_{\text{доповн}} = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (1.8)$$

Справедливим буде твердження, що нечітка множина  $C$  є перехрещенням двох нечітких множин  $A$  і  $B$  [3], якщо:

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (1.9)$$

При цьому надана формула (1.9) буде дійсною для усіх елементів  $x$ , які належать до загальної множини  $U$ .

Для операції об'єднання множин  $\tilde{A}$  і  $\tilde{B}$ , які належать універсальній множині  $U$  буде виконуватись наступна формула:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (1.10)$$

Розглянемо трикутну **t-норму** нечіткої логіки [3]. Під даною нормою розуміють наступну бінарну операцію, що задовольняє одиничний інтервалі  $[0,1]$  :

$$[0,1] \times [0,1] \Rightarrow [0,1]$$

Для даної операції є справедливими наступні закони:

- аксіома монотонності:  $a \wedge b \leq a \wedge c$ , якщо  $b \leq c$ ;
- аксіома комутативності:  $a \wedge b = b \wedge a$ ;
- аксіома асоціативності:  $a \wedge (b \wedge c) = (a \wedge b) \wedge c$ .

Розглянемо трикутну **s-норму** нечіткої логіки. Для неї справедливими є наступні аксіоми [3]:

- $a \vee 0 = a$ ;
- аксіома монотонності:  $a \vee b \leq a \leq a \vee c$ , якщо  $b \leq c$ ;
- аксіома комутативності:  $a \vee b = b \vee a$ ;
- аксіома асоціативності:  $a \vee (b \vee c) = (a \vee b) \vee c$ .

До найбільш поширених норм відносяться норми і конорми Заде, вірогіднісні оператори та норми Лукасевича. [5, 6].

Розглянемо алгоритм формування **функцій належності**.

Нехай дано дві множини: множину всіх можливих лінгвістичних термів  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$  та універсальну множину  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ . Нечітка множина  $\tilde{l}$  для завдання будь-якого лінгвістичного терму  $l_j$  на універсальній множині  $U$  має вигляд:

$$\tilde{l}_j = \left( \frac{\mu_{lj}(x_1)}{x_1}, \frac{\mu_{lj}(x_2)}{x_2}, \dots, \frac{\mu_{lj}(x_n)}{x_n} \right), \quad (1.11)$$

де  $j$  належить інтервалу від 1 до  $n$  [3].

Необхідно знайти ступені належності елементів множини  $L$   $\mu_{lj}(x_i)$ , тобто необхідно для усіх  $j$  від 1 до  $m$  та для усіх  $i$  від 1 до  $n$  розрахувати відповідні ступені.

В цілому є два алгоритми формування функцій належності. Перший алгоритм базується на статистичній обробці висновків експертів, а другий алгоритм— на парних порівняннях, які виконує один експерт [3].

У першому підході експерти заповнюють анкети, і на основі результатів анкетування визначають ступені належності до нечіткої множини за допомогою певної формули:

$$\mu_{lj}(x_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K b_{j,i}^k, \quad (1.12)$$

де  $k$  змінюється від 1 до  $K$ ;  $i$  змінюється від 1 до  $n$ ;  $j$  змінюється від 1 до  $m$ .

Якщо використовувати другий підхід до побудови функцій належності, то для кожної пари елементів універсальної множини експерт оцінює перевагу одного елементу над іншим відносно властивості нечіткої множини. Ці пари порівнянь обробляються за допомогою матричних обчислень. Матриця парних порівнянь є діагональною та обернено симетричною. Ступені належності відповідають відповідним координатам власного вектору [3].

$$W = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (1.13)$$

Рішення для матриці парних порівнянь  $A$  мають вигляд:

$$\mu(x_i) = w_i, \quad (1.14)$$

де  $i$  змінюється від 1 до  $n$ .

Власний вектор знаходять із системи рівнянь:

$$\begin{cases} AW = \lambda_{\max} W \\ w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1 \end{cases}, \quad (1.15)$$

де  $\lambda_{\max}$  – максимальне власне значення матриці  $A$ .

Серед найпоширеніших типів функцій належності можна виокремити наступні форми: трапеція, трикутник, гаусіана (крива Гауса) і сигмоїда [3].

Розглянемо трикутну форму належності. Для даної форми буде притаманною наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} 0, & x \leq a \text{ or } x \geq c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \end{cases} \quad (1.16)$$

де  $(a, c)$  – носій нечіткої множини – негативна оцінка нечіткого числа;

$b$  – координата максимуму – позитивна оцінка нечіткого числа [3].

Для гаусової форми система матиме вигляд:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-b)^2}{2c^2}\right), \quad (1.17)$$

тут  $b$  – координата максимуму;  $c$  – коефіцієнт концентрації.

Сигмоїдна функція описується наступним рівнянням:

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a(a-c))}, \quad (1.18)$$

де  $a$  – коефіцієнт крутизни;  $c$  – координата переходу через 0,5 [3].

Нечітке логічне виведення є практичною апроксимацією залежності між вхідними та вихідними значеннями на основі використання лінгвістичних висловів типу "Якщо... то..." та логічних операцій, що виконуються над нечіткими множинами [3].

Даний метод застосовується для моделювання об'єктів з неперервним або дискретним виходом. Об'єкти з неперервним виходом включають наступні задачі: прогнозування, багатокритеріальний аналіз, управління технічними об'єктами та ряд інших.

Об'єкти, що є дискретними виходами притаманні задачам класифікації в медичній і технічній діагностиці, а також задачам визначення образів тощо.

Для виконання задачі, експертного оцінювання якості повітря у виробничому приміщенні, потрібно використовувати вихід з безперервними значеннями, оскільки оцінка задана в конкретному діапазоні (від 0 до 100) і може мати будь-яку дійсну величину з цього діапазону.

Стандартна система нечіткого виведення складається з таких компонентів:

- Фазифікатор, який перетворює фіксований вектор факторів впливу ( $X$ ) на вектор нечітких множин ( $\tilde{X}$ ).
- Нечітка база знань, що містить інформацію про залежність  $Y = f(x)$  у формі лінгвістичних правил типу "Якщо..., то...".
- Функції належності, що використовуються для відображення лінгвістичних термів у вигляді нечітких множин.
- Машина нечіткого логічного виведення, яка, базуючись на правилах з нечіткої бази знань, визначає значення вихідної змінної у формі нечіткої множини  $\tilde{Y}$ , яка відповідає нечітким значенням вхідних змінних ( $\tilde{X}$ ).
- Дефазифікатор, який перетворює вихідну нечітку множину  $\tilde{Y}$  на нечітке число  $Y$ .

Структурну схему системи нечіткого виведення наведено на рис. 1.2.

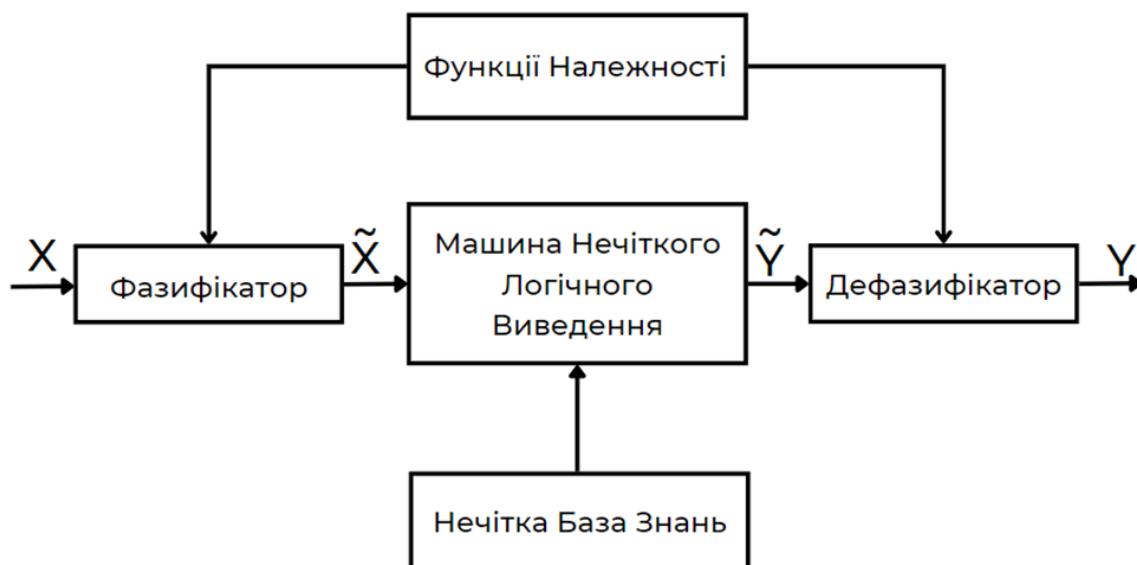


Рис. 1.2. Структурна схема системи нечіткого виведення  
Fuzzy Inference System (FIS)

Якщо ми маємо набір нечітких правил (Rules)  $\tilde{R}$ , які описують нечітке відношення між вхідною змінною  $x$  і вихідною змінною  $y$ , і відоме нечітке значення вхідної змінної  $x = \tilde{A}$ , то за формулою (1.19), запропонованою Лотфі Заде [5,6], можна визначити нечітке значення вихідної змінної.

$$y = \tilde{A} \circ \tilde{R}, \quad (1.19)$$

де знак « $\circ$ » - операція максимінної композиції.

Композиція максимуму включає в себе визначення найбільшого значення серед набору мінімумів, які отримуються при використанні нечітких відношень (правил).

У контексті бази знань Мамдані, яка є сукупністю правил нечіткої логіки, розглядається поділ простору факторів впливу на інтервали з розмитими межами, в межах яких функція відгуку приймає нечітке значення. Кожне правило в базі знань Мамдані є своєрідним "згущенням інформації". Ці "згущення насиченої інформації" подібні до вербального кодування, яке відбувається під час навчання людини.

Нозглянемо алгоритм Мамдані. Припустимо, що  $\mu_j(x_i)$  - це функція належності входу  $x_i$  до нечіткого терму  $\tilde{a}_{ij}$ , тобто:

$$\tilde{a}_{ij} = \int_{\underline{x}}^{\bar{x}} \mu_j(x_i)/x_i, \quad (1.20)$$

де  $x \in [\underline{x}, \bar{x}]$ .

Нехай існує деяка функція  $\mu_{dj}(y)$ , що являє собою належності виходу  $y$  до нечіткого терму  $\tilde{d}_j$ :

$$\tilde{d}_j = \int_{\underline{y}}^{\bar{y}} \mu_{dj}(y)/y \quad (1.21)$$

Ступінь виконання  $j$  – го правила для тимчасового вхідного вектору:

$X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$  дорівнює

$$\mu_j(X^*) = w_j(\mu_j(x_1^*)\chi_j\mu_j(x_2^*)\chi_j\dots\mu_j(x_n^*)\chi_j), \quad (1.22)$$

де  $j$  змінюється від 1 до  $m$ .

Якщо в  $j$  – му правилі бази знань використовують логічну операцію AND, то  $\chi_j$  – є  $t$ -нормою. При використанні операції OR  $\chi_j$  – є  $s$ -нормою.

У нечіткому виведенні Мамдані трикутні норми часто використовуються для реалізації операцій мінімуму (t-норми) та максимуму (s-норми)[3].

У нечіткому виведенні Мамдані, операція мінімуму (t-норма) використовується для знаходження найменшого значення серед відповідних елементів, тоді як операція максимуму (s-норма) використовується для знаходження найбільшого значення [3].

Результат нечіткого виведення Мамдані матиме наступний вигляд:

$$\widetilde{y}^* = (\frac{\mu_1(x^*)}{\widetilde{d}_1}, \frac{\mu_2(x^*)}{\widetilde{d}_2}, \dots, \frac{\mu_m(x^*)}{\widetilde{d}_m}) \quad (1.23)$$

Особливістю нечіткої множини є те, що її носій – це множина нечітких термів  $\{\widetilde{d}_1, \widetilde{d}_2, \dots, \widetilde{d}_n\}$  [3].

Для переходу до нечіткої множини на носії  $[\underline{y}, \overline{y}]$ , застосовуються операції імплікації та агрегування. Ці операції виконуються для кожного j-го правила бази знань, і результатом логічного виведення є нечітке значення вихідної змінної [3].

Після застосування імплікації та агрегування до кожного правила бази знань, отримується нечітке значення вихідної змінної. Це нечітке значення характеризує відносну належність вхідних значень до нечіткої множини на носії  $[\underline{y}, \overline{y}]$ :

$$\widetilde{d}_j^* = \text{imp}(\widetilde{d}_j, \mu_j(x^*)), \quad (1.24)$$

де індекс j змінюється від 1 до m, а imp – операція імплікації, за допомогою якої в нечіткому виведенні звичайно реалізують операцію мінімуму, тобто «зрізанням» функції належності  $\mu_{dj}(y)$  за рівнем  $\mu_j(x^*)$  [3].

Математична форма процесу набуде наступного вигляду:

$$\widetilde{d}_j^* = \int_{\underline{y}}^{\overline{y}} \min(\mu_j(x^*), \mu_{dj}(y)/y) \quad (1.25)$$

За допомогою операції агрегування нечітких множин, виконується пошук результату логічного виведення в межах всієї бази знань:

$$\widetilde{y}^* = \text{agg}(\widetilde{d}_1^*, \widetilde{d}_2^*, \dots, \widetilde{d}_n^*), \quad (1.26)$$

де agg – операція агрегування (агрегації) нечітких множин, що буде реалізовано за допомогою операції максимуму [3].

Дефаззифікацію (рис. 1.3) з використанням алгоритму Мамдані зазвичай вирішують шляхом використання методу обчислення центру ваги.

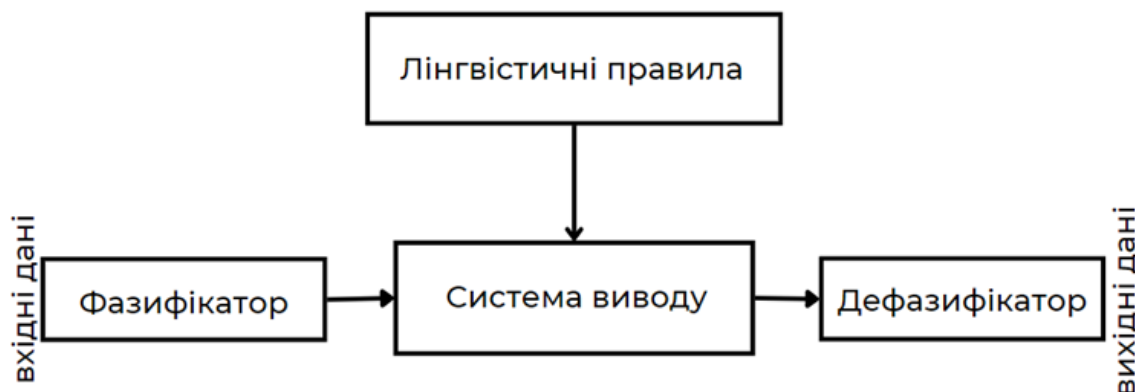


Рис. 1.3. Спрощена схема нечіткого виведення

## 1.2 Огляд сучасних систем вимірювання концентрації пилу

Якість повітря в приміщеннях визначають відповідно до рекомендацій [7].

Для моніторингу якості повітря в жилих та офісних приміщеннях існує кілька типів пристроїв, які можуть бути використані в таких видах приміщень:

1. **Датчики якості повітря.** Ці пристрої здатні вимірювати параметри повітря, такі як рівень CO<sub>2</sub> (діоксид вуглецю), температура, вологість, рівень шуму та інші показники. Вони зазвичай мають компактний дизайн і можуть бути розміщені на столах чи полицях, або установлені на стіну.

2. **Аналізатори якості повітря.** Це спеціалізовані прилади, які здатні проводити більш детальний аналіз повітря. Вони можуть вимірювати рівні окремих забруднюючих речовин, таких як формальдегід, бензол, аміак, частки PM<sub>2.5</sub> та інші шкідливі речовини. Деякі аналізатори також можуть відстежувати рівень радону або інших газів.

3. **Монітори VOC** (органічних розчинників). Ці пристрої спеціалізуються на вимірюванні випарів токсичних речовин, які можуть виділятися з будівельних матеріалів, меблів, фарб, очищувачів повітря та інших джерел. Вони допомагають виявляти потенційно небезпечні речовини, які можуть бути присутні у повітрі.

4. **Датчики PM2.5.** Ці пристрої призначені для вимірювання концентрації дрібних часток PM2.5 у повітрі. Ці частки є особливо шкідливими для здоров'я, оскільки вони можуть проникати в легені та викликати різні захворювання.

5. **Системи моніторингу повітря.** Це комплексні системи, які об'єднують декілька датчиків та пристроїв для збору та аналізу даних про якість повітря. Вони можуть включати в себе різноманітні датчики, аналізатори, системи вимірювання вологості та температури, а також програмне забезпечення для відстеження та аналізу отриманих даних.

### **Висновки до розділу 1**

В першому розділі було розглянуто поняття нечіткої логіки та основні принципи побудови нечітких моделей. Розглянуто можливість застосування нечіткого моделювання в системах екологічного моніторингу.

## РОЗДІЛ 2. ПОРТАТИВНИЙ МОНІТОР ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ DM72T

### 2.1. Газоаналізатор DM72T

DM72T - це портативний монітор оцінювання якості повітря за багатьма критеріями: кількість вуглекислого газу, кількість пилу, диму, твердих частинок, рівень формальдегіду, загальна кількість летких органічних сполук, температура і вологість. Для оцінки загальної якості повітря використовується візуальна індикація, пропорційна AQI від 0 до 500, з описом "Хороша", "Незначна", "Помірна", "Серйозна".



Рис.2.1. Газоаналізатор DM72T

#### Технічні характеристики:

- Концентрація вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>): від 400 до 5000 ppm ( $\pm 70$  ppm  $\pm 3\%$ )  
NDIR

- Кількість мікрочастинок PM2.5 і PM10 (пил, дим): від 0 до 999 мкг/м<sup>3</sup>
- Концентрація формальдегіду (HCHO): від 0.001 до 1.999 мг/м<sup>3</sup>
- Концентрація TVOC (загальна кількість летких органічних сполук): від 0.001 до 9.999 мг/м<sup>3</sup>
- Відносна вологість повітря: від 10 до 99% RH
- Температура повітря: від 9 до 55 °C
- Живлення: акумулятор 3000 mAh

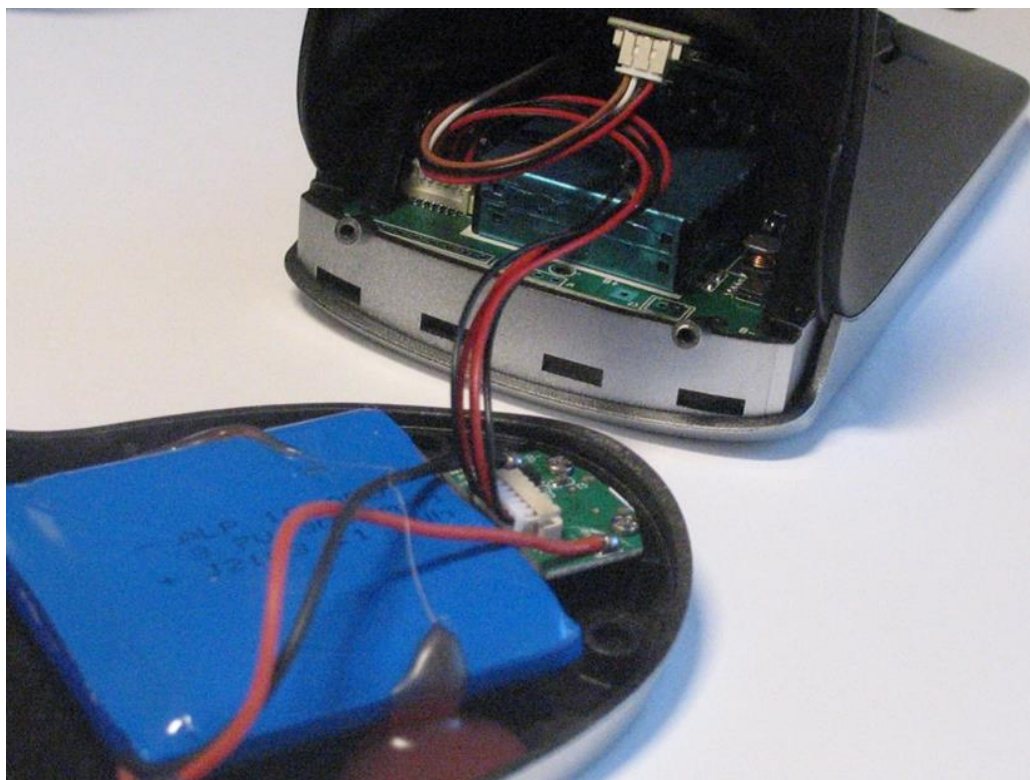
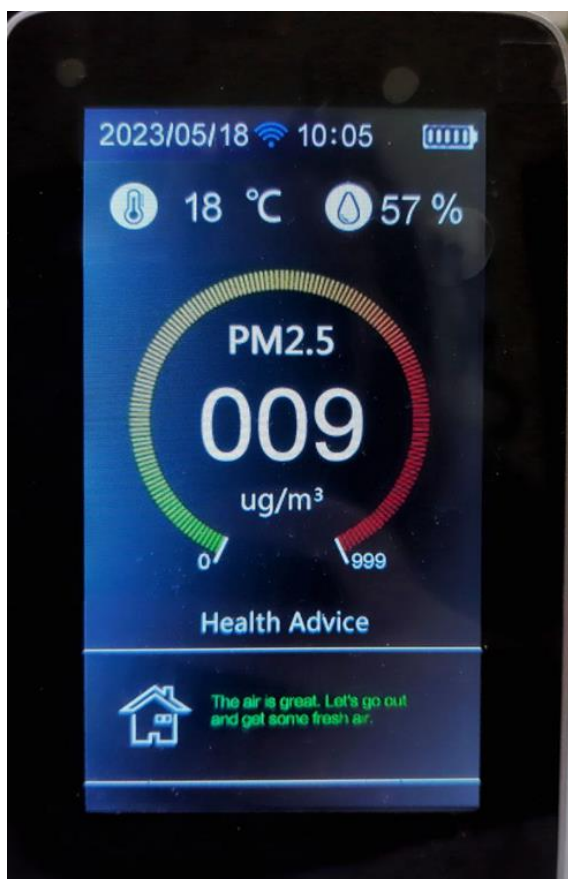


Рис.2.2. Конструкція корпусу: розташування плати акумулятора і головного модуля

Однією з основних переваг даного приладу є моніторинг якості повітря в приміщенні в реальному часі. На рис.2.3 представлені результати виміру концентрації пилу та формальдегіду в офісному приміщенні.



а)



б)

Рис.2.3. Виміри концентрації забруднюючих речовин: а – концентрація пилу; б – концентрація формальдегіду (НСНО)

Також в результаті 30-хвилинного моніторингу якості повітря були отримані тренди концентрацій формальдегіду та мікрочасток PM2.5(рис.2.4)



а)

б)

Рис.2.4. – тренди за результатом 30-хвилинного моніторингу: а – тренд часток PM2.5; б – тренд формальдегіду

## 2.2. Принцип роботи

Газоаналізатор DM72T оснащений декількома датчиками для одночасної оцінки концентрації вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>), летких органічних сполук (TVOC: бензол, стирол, феноли, толуол, ксилол і т.д.) і формальдегіду (HCHO) окремо, часток пилу (пил, дим), температури і вологості. Для вимірювання вмісту вуглекислого газу використовується інфрачервоний датчик (NDIR), термін служби таких датчиків становить від 5 до 15 років. Датчики TVOC і формальдегіду є електрохімічними. Датчик частинок PM10, PM2,5 є оптоелектронним. Також прилад оснащений датчиками температури та вологості. Технічні характеристик датчиків зазначені в таблиці 2.1. Для безперервної циркуляції повітря всередині приладу встановлений вентилятор.

Датчик температури: Датчик температури в газоаналізаторі DM72T - це платиновий датчик опору. Платинові датчики опору працюють шляхом вимірювання зміни опору платинового дроту під впливом різних температур. Зміна опору пропорційна температурі повітря.

Датчик вологості: Датчик вологості в газоаналізаторі DM72T - це ємнісний датчик. Ємнісні датчики працюють, вимірюючи зміну ємності чутливого елемента, коли він піддається впливу різних рівнів вологості. Зміна ємності пропорційна до вологості повітря.

Таблиця 2.1.

Загальні характеристики датчиків DM72T

| Тип датчика          | Принцип дії                                                                        | Об'єкт виміру                     | Діапазон вимірювань           | Роздільна здатність     |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| Інфрачервоний (NDIR) | поглинання певних довжин хвиль відповідно до закону Біра-Ламберта, і їх ослаблення | двоокис вуглецю(CO <sub>2</sub> ) | 400-5000 ppm                  | 1 ppm                   |
| Оптоелектронний      | лазерне розсіювання                                                                | PM2.5, PM10, PM1.0                | 0-999 мкг/м <sup>3</sup>      | 1 мкг/м <sup>3</sup>    |
| Електрохімічний      | зміна струму                                                                       | формальдегід (HCHO)               | 0,000-1,999 мг/м <sup>3</sup> | 0,001 мг/м <sup>3</sup> |
| Електрохімічний      | зміна струму                                                                       | леткі органічні сполуки (TVOC)    | 0,000-9,999 мг/м <sup>3</sup> | 0,001 мг/м <sup>3</sup> |
| Напівпровідниковий   | зміна провідності                                                                  | температура                       | -10...+50 °C                  | ±1°C                    |
|                      |                                                                                    | вологість                         | 20%-85%                       | ±4%                     |

### 2.3. Переваги

Перевагою моделі DM72T є вбудований Wi-Fi модуль з прошивкою для пари і можливість управління різними пристроями за допомогою безкоштовного додатку TuYa Smart (Розумний будинок). Після встановлення додатку на смартфон до нього можна додати газоаналізатор, який стане доступним для налаштування сценаріїв управління в залежності від кожного вимірюваного параметра.

Наприклад, можна керувати очищенням повітря за допомогою Wi-Fi розетки з Tuuya Smart, який може вмикати та вимикати витяжку або фільтр в залежності від заданих показань газоаналізатора. Крім того, пара DM72T і Tuuya Smart дозволяє контролювати показання газоаналізатора в режимі реального часу з будь-якого місця, або переглядати статистичні графіки за період роботи приладу.

Графіки вмісту CO<sub>2</sub> в часі можна використовувати для оцінки, наприклад, часу, який люди проводять в офісі або вдома, а також інтенсивності їх спілкування. Графіки зміни вимірюваних параметрів дозволяють виявити причини зміни якості повітря, наприклад, поява сильного запаху фарби або розчинників, або поява пилу від будівельних робіт.

DM72T є корисним інструментом для вимірювання якості повітря в приміщенні. Його можна використовувати для виявлення джерел забруднення повітря, таких як сигаретний дим, випари від приготування їжі та пил, а також для відстеження ефективності заходів з очищення повітря. DM72T також можна використовувати для оцінки ризиків для здоров'я, пов'язаних із забрудненням повітря, таких як респіраторні захворювання та рак.

DM72T - це невеликий, легкий пристрій, який легко використовувати. Він має чіткий дисплей, на якому відображаються поточні показники всіх вимірюваних параметрів. Прилад також має вбудований будильник, який можна налаштувати для попередження користувача про високий рівень забруднюючих речовин.

#### **2.4. Інфрачервоний датчик**

В приладі DM72T застосовується інфрачервоний датчик N-CO<sub>2</sub> від компанії Sangbay (Рис.2.5). Датчик даного типу призначений для виміру концентрації двоокису вуглецю. Цей датчик є загальним інтелектуальним інфрачервоним датчиком газу. Він використовує принцип недисперсійного інфрачервоного випромінювання (NDIR) для виявлення CO<sub>2</sub> в повітрі.

Пристрій не залежить від кисню, має стабільну роботу, тривалий термін служби та вбудовану температурну компенсацію. Датчик є компактным та високопродуктивним. Створений шляхом поєднання технології інфрачервоного абсорбційного виявлення газів з мікромашинним опрацюванням і чудовою схемотехнікою.



Рис.2.5. N-CO<sub>2</sub> - інфрачервоний датчик двоокису вуглецю

NDIR (недисперсійний інфрачервоний) датчик - це тип газового датчика, який використовує інфрачервоне світло для вимірювання концентрації цільового газу. NDIR-датчики широко застосовуються в різних сферах, включаючи моніторинг промислових процесів, моніторинг навколишнього середовища та медичну діагностику.

NDIR-сенсори працюють за допомогою широкосмугового інфрачервоного джерела світла для освітлення зразка газу. Потім світло проходить через оптичний фільтр, який вибирає певну довжину хвилі інфрачервоного світла, що поглинається досліджуванним газом. Кількість інфрачервоного світла, яке поглинається газом, вимірюється детектором.

Джерелом інфрачервоного світла зазвичай є широкосмугове джерело світла, наприклад, вольфрамово-галогенна лампа або світлодіод (LED). Оптичний фільтр - це, як правило, вузькосмуговий фільтр, який пропускає лише певну довжину хвилі інфрачервоного світла. Детектор - це, зазвичай, тепловий детектор, наприклад, термопара або піроелектричний датчик. Концентрація

цільового газу обчислюється за допомогою закону Біра-Ламберта, який стверджує, що кількість світла, поглинутого речовиною, пропорційна концентрації речовини і довжині шляху світла через речовину. Технічна характеристика датчика представлена в таблиці 2.2.

Концентрація досліджуваного газу розраховується на основі кількості поглинутого інфрачервоного світла.

Таблиця 2.2.

Технічні характеристики датчика N-CO2

|                     |                                                         |
|---------------------|---------------------------------------------------------|
| Модель              | N-CO2                                                   |
| Газ для виявлення   | CO2                                                     |
| Робоча напруга      | 3.6-5 постійна напруга (живиться від захисного бар'єру) |
| Середній струм      | <85мА                                                   |
| Діапазон тестування | 0-5%                                                    |
| Рівень інтерфейсу   | 3.0V                                                    |
| Вихідний сигнал     | UART (універсальний асинхронний приймач)                |
|                     | 0.4~2В (Вихід через захисний бар'єр)                    |
| Час відгуку         | T90 < 60 с                                              |
| Робоча температура  | -20...+60 °C                                            |
| Робоча вологість    | 0-95% відносної вологості                               |
| Габаритні розміри   | 20 x 22.6 мм                                            |
| Вага                | 35 г                                                    |
| Термін служби       | >5 років                                                |

Сфера застосування:

- Опалення, вентиляція та контроль якості повітря в приміщеннях
- Моніторинг промислових процесів і захист безпеки
- Моніторинг виробничих процесів у сільському господарстві та тваринництві

Характеристики продукту:

- Висока чутливість і роздільна здатність
- Низьке енергоспоживання і швидкий час відгуку
- Забезпечення UART, аналогової напруги та інших режимів виходу
- Компенсація температури, відмінний лінійний вихід
- Відмінна стабільність
- Захист від перешкод водяної пари, захист від отруєння, тривалий термін служби

## **2.5. Електрохімічний датчик TVOC**

S4-VOC (також виробляється компанією Sangbay) - це газовий датчик постійного потенціалу електролітичного типу (Рис.2.6). Електрохімічний датчик являє собою один із типів газових датчиків, що використовують електрохімічну реакцію для виявлення присутності цільового газу. Датчик працює шляхом впливу робочого електрода на зразок повітря: VOC і кисень проходять відповідну реакцію окислення-відновлення на робочому електроді. Якщо цільовий газ присутній, він вступає в реакцію з робочим електродом, викликаючи зміну струму. Робочий електрод зазвичай виготовляється з металу, який реагує з цільовим газом. Електроліт - це розчин, що знаходиться між двома електронами та допомагає проводити електричний струм.

Протилежний електрод зазвичай виготовляється з металу, який не вступає в реакцію з досліджуванним газом. Датчик вимірює зміну струму і використовує цю інформацію для обчислення концентрації цільового газу. Точність електрохімічного датчика визначається рядом факторів, включаючи тип

робочого електрода, електроліту, електрода порівняння та електроніки обробки сигналу. Технічна характеристика датчика наведена в таблиці 2.3.

Електрохімічні датчики зазвичай використовуються для вимірювання концентрації летких органічних сполук (TVOC) і формальдегіду. TVOC - це група органічних сполук, які мають низьку температуру кипіння і легко випаровуються. Формальдегід - це безбарвний, легкозаймистий газ із сильним запахом. Як TVOC, так і формальдегід можуть бути шкідливими для здоров'я людини і викликати проблеми з диханням, головний біль і нудоту.



Рис.2.6. S4-VOC - датчик летких органічних сполук

Таблиця 2.3.

Технічні характеристики датчика S4-VOC

|                                       |                                      |
|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Модель                                | S4-VOC                               |
| Принцип виявлення                     | Електрохімічний з трьома електродами |
| Газ для виявлення                     | VOC                                  |
| Діапазон виявлення                    | 0-100 ppm                            |
| Максимальна концентрація навантаження | 200 ppm                              |
| Вихідний сигнал                       | $55 \pm 15$ нА/ppm                   |

Продовження таблиці 2.3.

|                            |                                               |
|----------------------------|-----------------------------------------------|
| Нульовий дрейф             | 1 ppm                                         |
| Час відгуку                | $\leq 60$ с                                   |
| Напруга зсуву              | 0 мВ                                          |
| Опір навантаження          | 100 Ом                                        |
| Робоча температура         | -30...+50°C                                   |
| Робоча вологість           | 15-90% відносної вологості (без конденсації)  |
| Повторюваність             | $< \pm 2\%$ вихідного сигналу                 |
| Довгострокова стабільність | $< 2\%$ сигналу/місяць                        |
| Лінійність                 | Лінійність, коефіцієнт регресії $R^2 = 0,999$ |
| Робочий тиск               | Від 90 до 110 кПа                             |
| Термін придатності         | 12 місяців після доставки                     |
| Термін служби              | 2 роки                                        |

Область застосування:

- Детектори VOC
- Виявлення газів VOC на промислових об'єктах
- Виявлення газів VOC в медичній галузі
- Виявлення газу VOC для розумних муніципальних систем
- Виявлення газів VOC в атмосферному середовищі

Характеристики продукту:

- Швидка швидкість реакції, швидке повернення до нуля, низька вартість рішення
- Низьке енергоспоживання та висока чутливість
- Широкий діапазон лінійності Сильний захист від перешкод
- Відмінна повторюваність і стабільність

Загалом, електрохімічні датчики - це універсальний і надійний тип газових сенсорів, який використовується в широкому спектрі застосувань, включаючи моніторинг якості повітря, промислову безпеку і медичну діагностику.

## 2.6. Електрохімічний датчик СНОН

Електрохімічний датчик ME2-CH<sub>2</sub>O – електрохімічний датчик, що визначає концентрацію формальдегіду шляхом вимірювання струму на основі електрохімічного принципу (рис.2.7). Формальдегід - це безбарвний, легкозаймистий газ із сильним запахом. Він є відомим канцерогеном і може викликати респіраторні захворювання. Електрохімічний датчик формальдегіду працює за допомогою робочого електрода, покритого каталізатором, який реагує з формальдегідом. Коли газ формальдегід присутній, він реагує з каталізатором та вступає в реакцію електрохімічного окислення на робочому електроді, що виробляє електричний струм. Кількість виробленого струму пропорційна концентрації формальдегіду в повітрі.



Рис. 2.7. ME2-CH<sub>2</sub>O – датчик формальдегіду

Таблиця 2.4.

Технічні характеристики датчика ME2-CH<sub>2</sub>O

|                                       |                                              |
|---------------------------------------|----------------------------------------------|
| Газ для виявлення                     | Формальдегід (CH <sub>2</sub> O)             |
| Діапазон вимірювання                  | 0-5 ppm                                      |
| Максимальна концентрація детектування | 20 ppm                                       |
| Чутливість                            | 0.25-0.60 мкА/ppm                            |
| Коефіцієнт роздільної здатності       | ≤0.02ppm                                     |
| Час відгуку (T <sub>90</sub> )        | ≤60с                                         |
| Опір навантаження (рекомендований)    | (120/200/300)Ом                              |
| Повторюваність                        | <2% вихідне значення                         |
| Вихідна лінійність                    | лінійна                                      |
| Нульовий дрейф (-20...+40 °C)         | Нульовий дрейф (-20...+40 °C)                |
| Діапазон температур                   | -20...+50°C                                  |
| Діапазон вологості                    | 15-90% відносної вологості (без конденсації) |
| Діапазон тиску                        | нормальна атмосфера ±10%                     |
| Очікуваний термін служби              | 5 років (на повітрі, +18...+25°C)            |

Характеристики роботи датчика, виражені як графіки залежності чутливості від різних показників, представлені на рисунках 2.9, 2.10, 2.11 та 2.12.

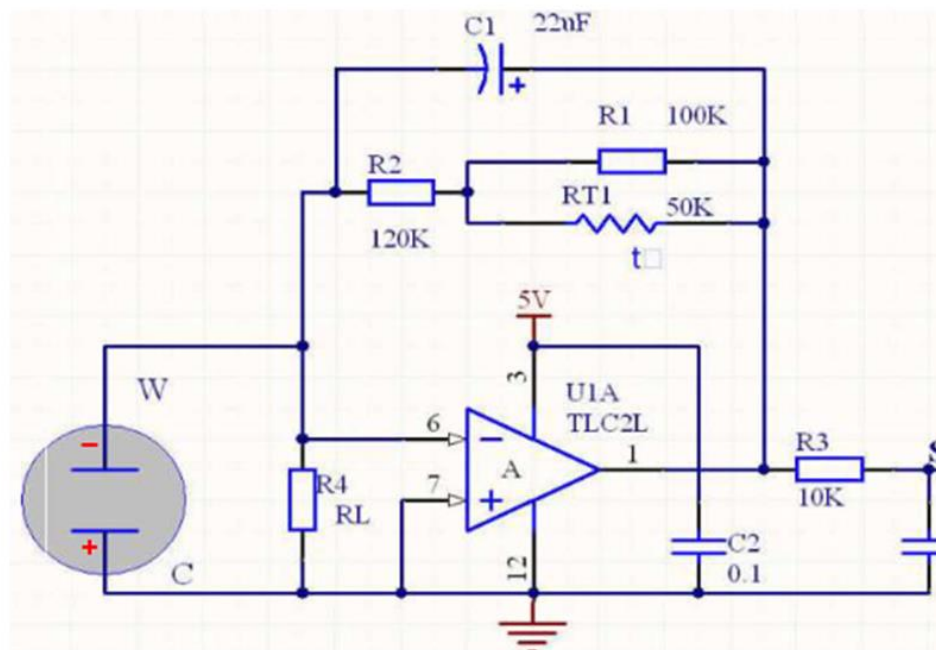


Рис.2.8. Схема електрична принципова датчика формальдегіду

Схема датчика формальдегіду побудована на основі інтегратора (операційний підсилювач типу TLC2L із сукупними пасивними колами).

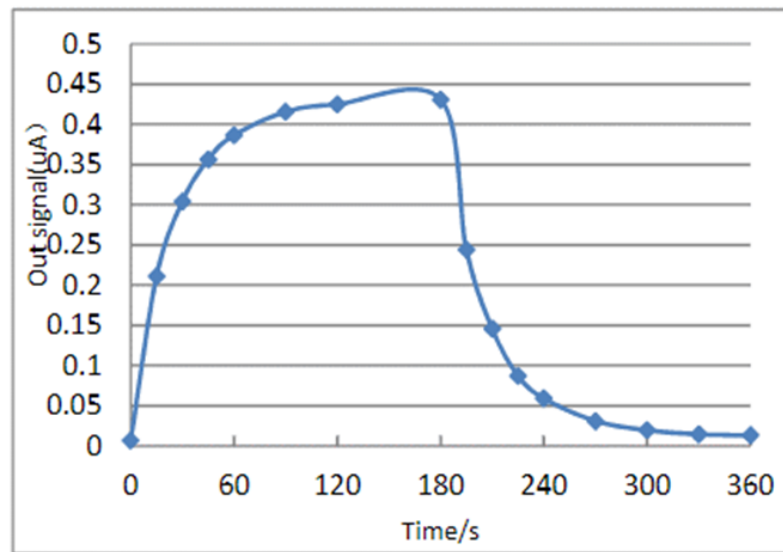


Рис.2.9. Залежність вихідного сигналу від часу

Як видно з кривої рисунку 2.9, стала інтегрування дорівнює приблизно 100 секунд.

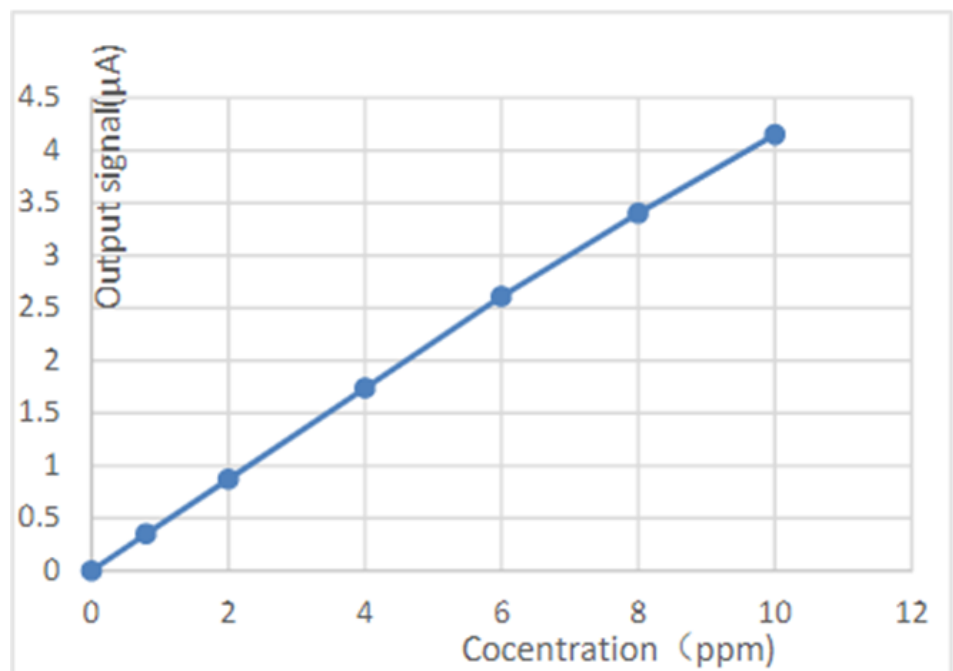


Рис. 2.10. Залежність вихідного сигналу від концентрації формальдегіду в повітрі

Лінійна залежність вихідного сигналу від концентрації формальдегіду в повітрі отримана завдяки елементам R2, R1, RT1 в колі зворотного зв'язку інтегратора TLC2L.

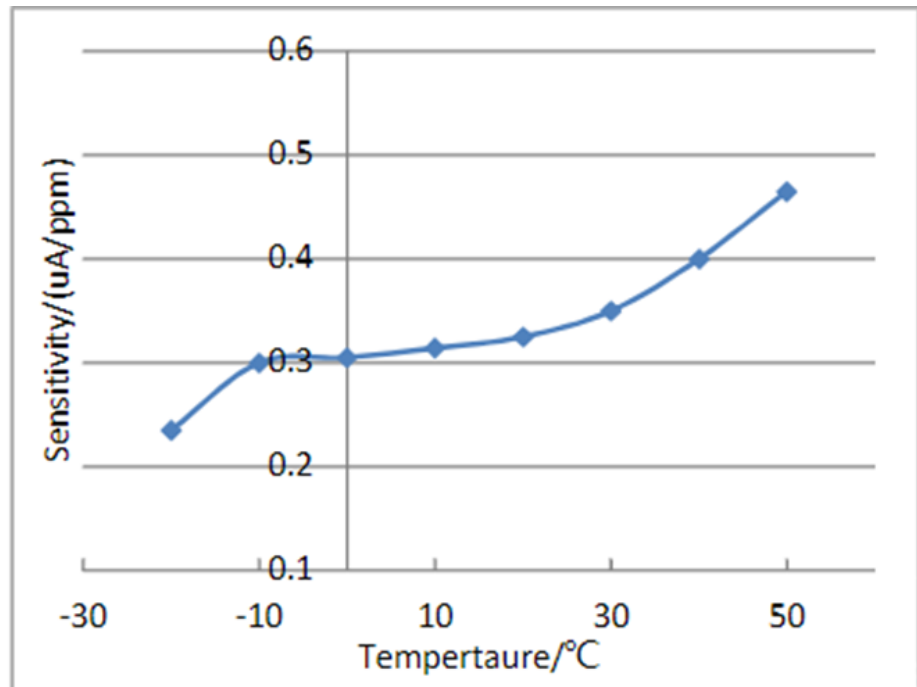


Рис.2.11. Залежність чутливості датчика формальдегіду від температури

В діапазоні робочих температур ( від -10 до +30 градусів за Цельсієм) температурна залежність чутливості датчика є лінійною.

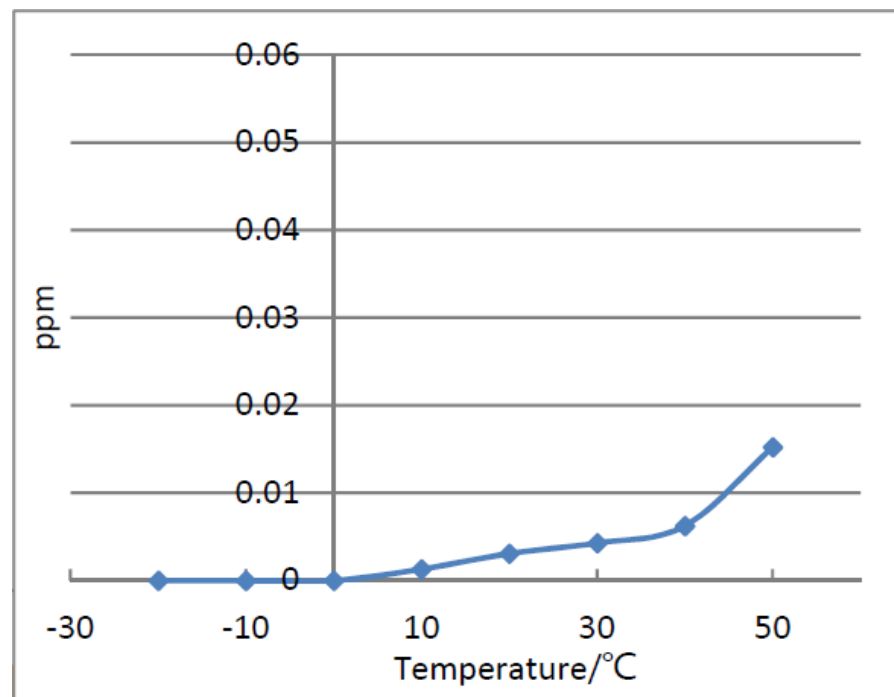


Рис. 2.12. Залежність дрейфу нуля датчика формальдегіду від температури

Компенсація впливу температури на чутливість датчика забезпечена терморезистором RT1.

## 2.7. Оптоелектронний датчик

Grove HM3301 - це лазерний датчик виявлення пилу, який використовується для безперервного виявлення пилу в повітрі в режимі реального часу. Стабільна продуктивність, низький рівень шуму і наднизьке енергоспоживання роблять його придатним для кондиціонерів, інтелектуальних очищувачів повітря та інших проектів з Інтернет речей, пов'язаних з якістю повітря.

На відміну від традиційного насосного датчика виявлення пилу, HM-3301 використовує лопаті вентилятора для переміщення повітря, а повітря, що протікає через камеру виявлення, використовується як тестовий зразок для проведення безперервного тестування пилу з різними розмірами частинок у повітрі в режимі реального часу.



Рис.2.13. HM3301 - Оптоелектронний (лазерний) датчик концентрації пилу (PM2.5)

Оптоелектронний датчик - це тип датчика, який використовує світло для вимірювання концентрації твердих частинок (PM) у повітрі. PM - це суміш твердих частинок і крапель рідини, які зависли в повітрі. Вони можуть надходити з різних джерел, включаючи викиди транспортних засобів, промислове

забруднення та лісові пожежі. Частинки PM10 - це частинки діаметром 10 мікрометрів або менше, а PM2.5 - 2.5 мікрометра або менше. Частинки PM2.5 вважаються більш шкідливими для здоров'я людини, ніж частинки PM10, оскільки вони можуть проникати глибше в легені.

Датчик пилу NM-3301 заснований на передовій теорії розсіювання Мі. Коли світло проходить через частинки, кількість яких дорівнює або перевищує довжину хвилі світла, відбувається розсіювання світла. Розсіяне світло розсіюється частинками та концентрується на високочутливому фотодіоді, який підсилюється і аналізується схемою. За допомогою спеціальної математичної моделі та алгоритму отримують концентрацію підрахунку та масову концентрацію частинок пилу.

Датчик пилу NM-3301 складається з таких основних компонентів, як вентилятор, джерело інфрачервоного лазера, конденсаційне дзеркало, світлочувлива трубка, схема посилення сигналу і схема сортування сигналу. Технічні характеристики датчику зазначені в таблиці 2.5.

Оптоелектронні датчики ТЧ є відносно новою технологією, але вони стають все більш популярними для моніторингу якості повітря. Вони відносно недорогі в експлуатації та обслуговуванні і можуть забезпечити безперервний моніторинг рівнів ТЧ.

Таблиця 2.5.

Технічні характеристики датчика NM3301

|                                      |                                                                                                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Робоча напруга                       | 3,3В/5В                                                                                           |
| Робоча температура                   | -10...+60°C                                                                                       |
| Робоча вологість                     | 10-90% відносної вологості (без конденсації)                                                      |
| Розмір часток                        | 3 канали - 2,5 мкм, 5 мкм, 10 мкм                                                                 |
| Діапазон (стандартне значення PM2.5) | 1-500 мкг/м <sup>3</sup> (ефективний діапазон)<br>1000 мкг/м <sup>3</sup> (максимальний діапазон) |
| Роздільна здатність                  | Концентрація: 1 мкг/м <sup>3</sup><br>Облікова концентрація: 1с/0,1л                              |
| Час стабільності                     | 30 секунд після увімкнення                                                                        |
| Інтерфейс                            | I2C                                                                                               |

## **Висновки до розділу 2.**

В другому розділі був розглянутий портативний монітор для оцінювання якості повітря DM72T. Цей індивідуальний прилад екологічного моніторингу можна використати для отримання оцінки якості повітря в приміщенні за шкалою AQI. За допомогою газоаналізатора можна дізнатися числові значення температури, вологості та концентрації забруднюючих речовин - формальдегіду (HCHO), летких органічних сполук (TVOC), CO<sub>2</sub>, мікрочастинок PM<sub>1.0</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>.

В даному розділі описані чотири датчики виміру концентрацій: інфрачервоний датчик (NDIR) для вимірювання вмісту вуглекислого газу, електрохімічні датчики летких органічних сполук і формальдегіду, оптоелектронний датчик частинок PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1.0</sub>.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МОДЕЛІ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ

### 3.1 Вхідні данні

Теоретичною основою для нечіткого моделювання існує чимало посібників, зокрема [8, 9, 10].

Сучасні задачі нечіткого моделювання в екології розглянуто в [11].

Для розробки нашої базової моделі було обрано алгоритм Мамдані. Наступним етапом розробки моделі є вибір параметрів оцінки якості повітря. Нами було обрано чотири забруднюючі речовини: формальдегід, леткі органічні сполуки, двоокис вуглецю та тверді частинки. Тобто, модель матиме чотири входи, кожен з яких відповідає одній з досліджуваних речовин, та один вихід.

В програмі MATLAB в командній стрічці визиваємо графічний редактор fuzzy logic. Моделюємо систему з чотирма входами та одним виходом, даємо їй назву «DM72-T\_v02». Даємо назву вхідним блокам: 1 блок – «HCHO» (формальдегід), 2 блок – «TVOC» (леткі органічні сполуки), 3 блок – «CO<sub>2</sub>», 4 блок – «PM<sub>2.5</sub>»(мікрочастинки пилу).

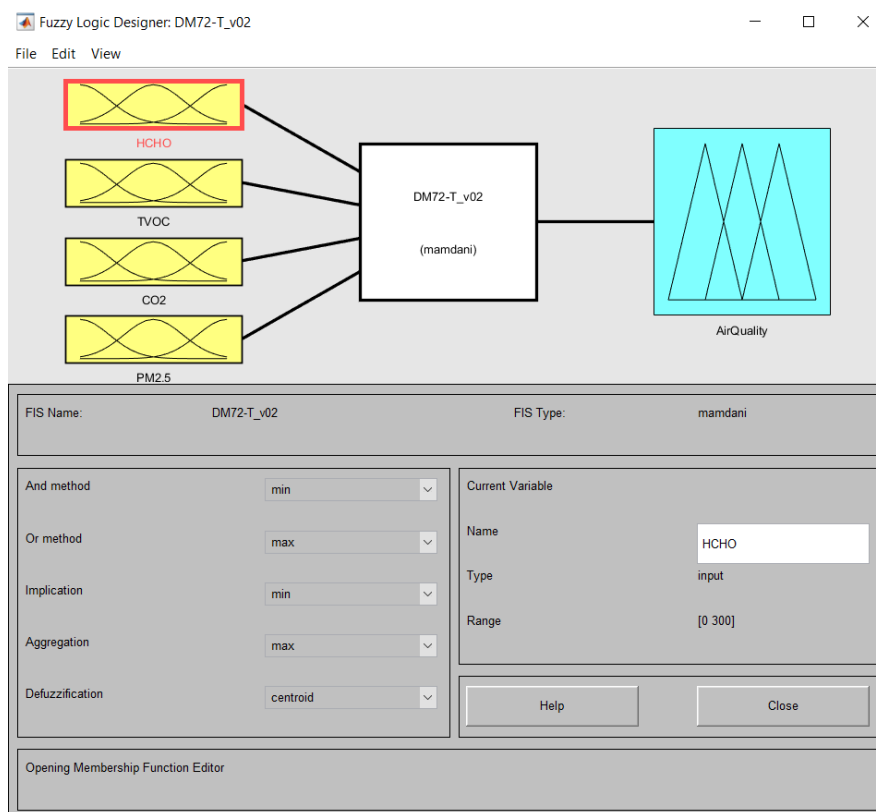


Рис. 3.1. Вхідні та вихідні блоки математичної моделі DM72-T\_v02

### 3.2 Функції належності

Встановимо та відредагуємо функції належності для вищеперелічених блоків. Кількість призначених функцій належності – по три для кожного із входів. Для блоків HCHO, TVOC, PM2.5 створюємо функції з однаковими назвами (рис.3.2):

- **мала** – низький показник;
- **середня** – середній показник;
- **велика** – високий показник.

Блоку CO<sub>2</sub> надаємо функції з іншими назвами (рис.3.3):

- **добра** – низький показник;
- **середня** – середній показник;
- **висока** – високий показник.

Усі вхідні функції належності мають гауссовий тип залежності.

Зазначаємо діапазон зміни та відображення: HCHO - від 0 до 300 мкг/м<sup>3</sup>; TVOC - від 0 до 600 мкг/м<sup>3</sup>; CO<sub>2</sub> - від 400 до 5000 ppm; PM2.5 - від 0 до 250 мкг.

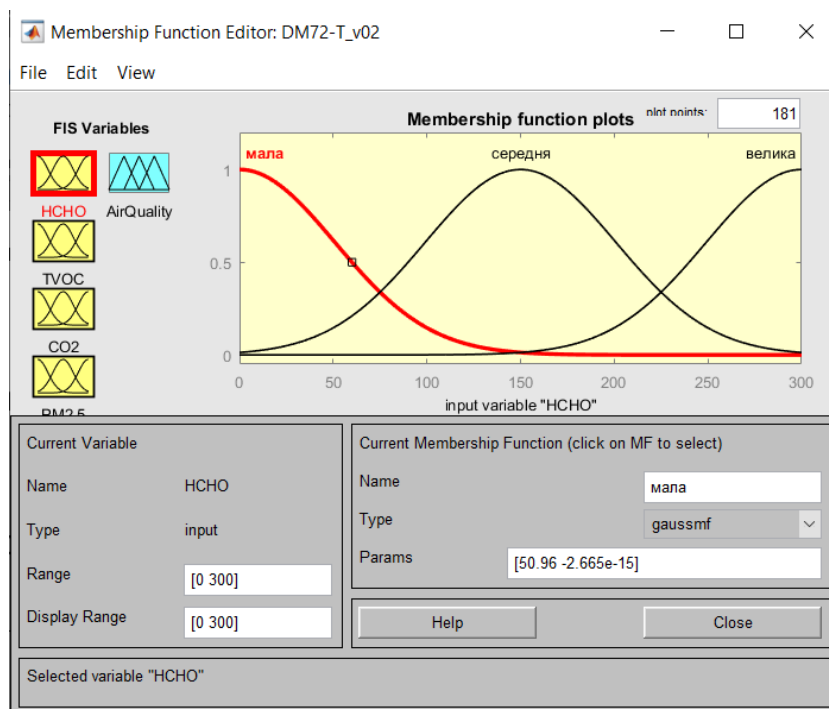


Рис. 3.2. Налаштування функцій належності гаусового типу для вхідного блоку HCHO

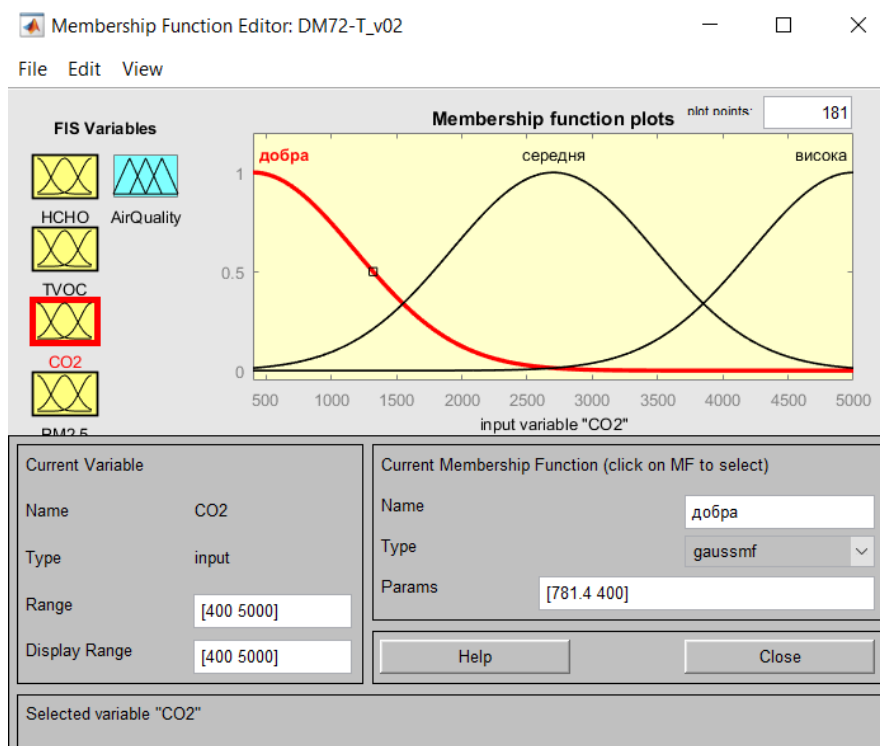


Рис. 3.3. Налаштування функцій належності гаусового типу для вхідного блоку CO2

Відредагуємо вихідний блок AirQuality. Діапазон зміни та відображення позначимо від 0 до 100 балів. Функціям належності виходу надаємо такі назви:

- **незадовільна** – низька якість;
- **задовільна** – середня (достатня) якість;
- **висока** – висока якість.

Для виходу призначено трикутні функції належності. Процес налаштування функцій належності виходу наведено на рисунку 3.6.

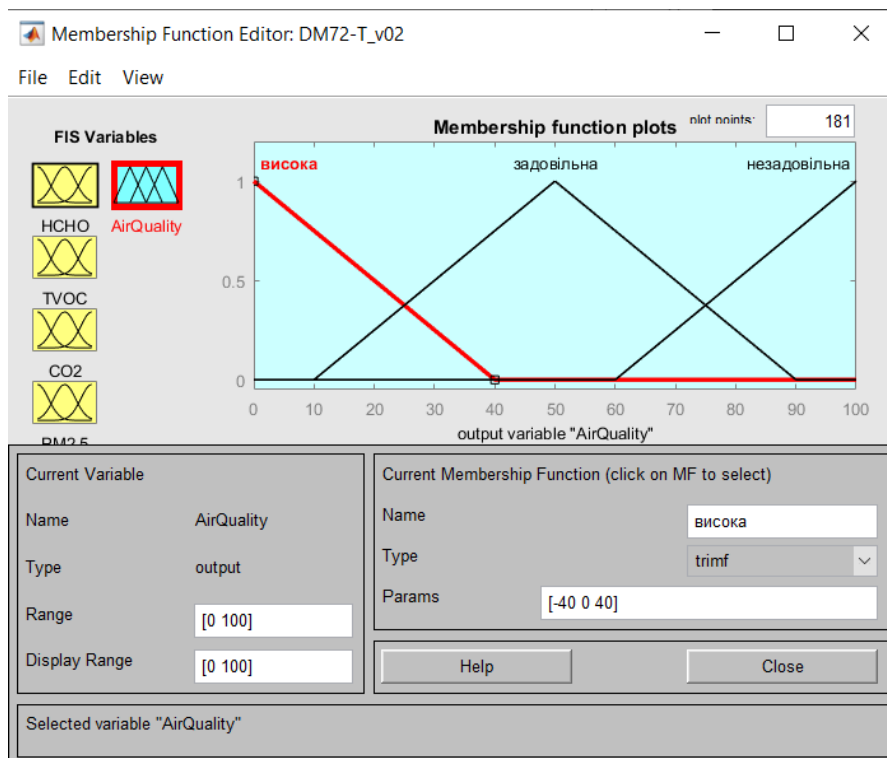


Рис. 3.4. Налаштування функцій належності трикутного типу для вихідного блоку

### 3.3 Розробка правил нечіткої моделі

Нами було обрано такі правила нечіткої логіки, щоб уникнути екстремальних оцінок, тобто оцінки 0 та 100 будуть виключені, як такі, що є ідеальними або зависокими і не можуть бути застосовані для реального оцінювання якості повітря в приміщенні.

Для усіх п'ятнадцяти функцій належності (дванадцяти вхідних та трьох вихідних) були розроблені правила нечіткої логіки. В правилах використано логічну функцію «І» (AND), що має також позначення **&**. Усім правилам надано однаковий ваговий коефіцієнт, який дорівнює 1. В результаті поєднання різних концентрацій забруднюючих речовин ми отримуємо показник якості повітря. Нами були створено 81 правило нечіткої логіки:

- 1) якщо мала & мала & добра & мала то висока – висока якість;
- 2) якщо мала & мала & добра & середня то висока – висока якість;
- 3) якщо мала & мала & добра & велика то задовільна – середня якість;





- 62) якщо **велика & мала & висока & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 63) якщо **велика & мала & висока & велика** то **незадовільна** – низька якість;
- 64) якщо **велика & середня & добра & мала** то **задовільна** – середня якість;
- 65) якщо **велика & середня & добра & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 66) якщо **велика & середня & добра & велика** то **незадовільна** – низька якість;
- 67) якщо **велика & середня & середня & мала** то **задовільна** – середня якість;
- 68) якщо **велика & середня & середня & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 69) якщо **велика & середня & середня & велика** то **незадовільна** – низька якість;
- 70) якщо **велика & середня & висока & мала** то **незадовільна** – низька якість;
- 71) якщо **велика & середня & висока & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 72) якщо **велика & середня & висока & велика** то **незадовільна** – низька якість;
- 73) якщо **велика & велика & добра & мала** то **незадовільна** – низька якість;
- 74) якщо **велика & велика & добра & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 75) якщо **велика & велика & добра & велика** то **незадовільна** – низька якість;
- 76) якщо **велика & велика & середня & мала** то **незадовільна** – низька якість;
- 77) якщо **велика & велика & середня & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 78) якщо **велика & велика & середня & велика** то **незадовільна** – низька якість;
- 79) якщо **велика & велика & висока & мала** то **незадовільна** – низька якість;
- 80) якщо **велика & велика & висока & середня** то **незадовільна** – низька якість;
- 81) якщо **велика & велика & висока & велика** то **незадовільна** – низька якість.

Налаштування правил нечіткої логіки **Rules** представлено на рис. 3.5.

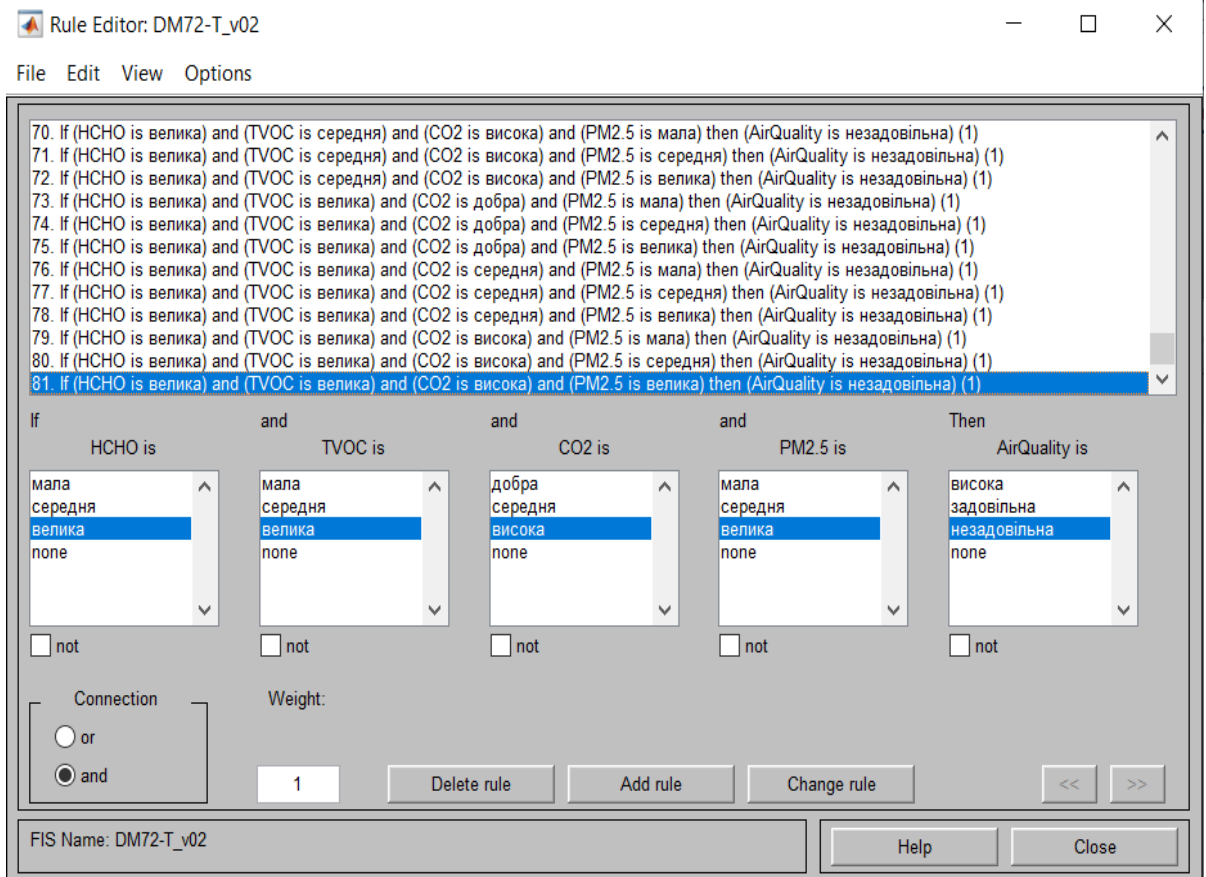


Рис.3.5. Налаштування правил нечіткої логіки функцій належності

В результаті дій правил нечіткої логіки сформована та візуалізована поверхня рішень для виходу (рис.3.6). Поверхня рішень будується на основі двох входів та одного виходу. Оскільки нечітка модель має чотири входи і один вихід, отримати візуалізацію можливо лише по двом блокам. Програмне середовище MATLAB дає нам змогу змінювати осі  $x$  та  $y$  на різні блоки, комбінуючи їх. В результаті таких комбінацій та співставлень отримаємо різні види поверхні рішень.

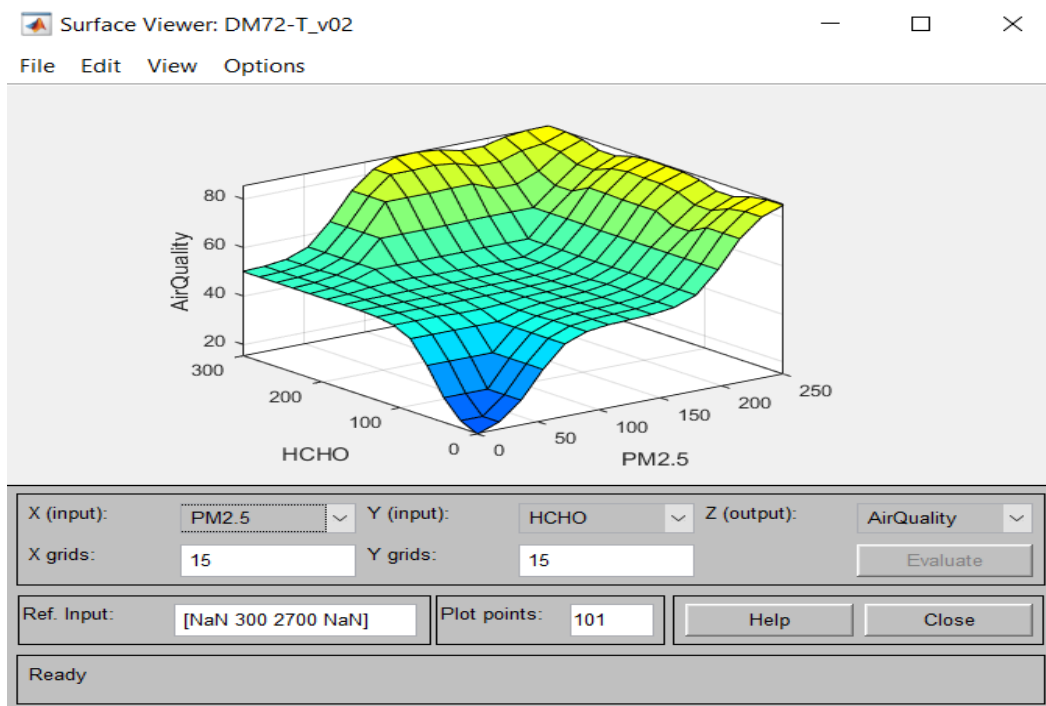


Рис.3.6. Поверхня рішень нечіткої моделі по двом показникам: PM2.5 та HCHO

### Висновки до розділу 3.

В результаті роботи побудована моделі нечіткої логіки для оцінювання якості повітря за чотирма показниками. Чотири вхідні блоки мають назву, що відповідає одному з забруднювачів повітря: TVOC – леткі органічні сполуки, HCHO – формальдегід, CO2 – вуглекислий газ, PM2.5 – мікрочастинки пилу. Вихідний блок представляє числовий показник оцінювання якості повітря в приміщеннях. Він представлений шкалою від 0 до 100.

## РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ПЕРЕВІРКА МОДЕЛІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

### 4.1 Оцінювання якості повітря в приміщеннях

Допустимі концентрації НСНО, TVOC, CO<sub>2</sub> та PM<sub>2.5</sub> у повітрі житлових та офісних приміщень регулюються Всесвітньої організацією здоров'я WHO[7]. WHO встановило стандарти для цих забруднювачів на основі найкращих наявних наукових даних, які спрямовані на захист здоров'я людей.

У таблиці 4.1. наведено допустимі концентрації цих забруднювачів у повітрі житлових та офісних приміщень.

Таблиця 4.1.

Норми забруднюючих речовин WHO

| Забруднювач                             | Середня допустима концентрація за 8 годин | Середня допустима концентрація за 1 годину |
|-----------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Формальдегід (НСНО)                     | 0,05 ppm                                  | 0,1 ppm                                    |
| Загальні леткі органічні сполуки (TVOC) | 50 ppm                                    | 150 ppm                                    |
| Вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> )      | 700 ppm                                   | 1000 ppm                                   |
| Тверді частинки (PM <sub>2.5</sub> )    | 15 мкг/м <sup>3</sup>                     | 35 мкг/м <sup>3</sup>                      |

#### 4.1.1 Загальні леткі органічні сполуки (TVOC)

Загальні леткі органічні сполуки (TVOC) - це група хімічних речовин, які легко випаровуються в повітря при кімнатній температурі. Вони містяться в багатьох продуктах і матеріалах, що використовуються в побуті, бізнесі та промисловості.

Вплив на здоров'я від впливу VOC може варіюватися в залежності від типу, концентрації та тривалості впливу. Деякі леткі органічні сполуки є більш шкідливими, ніж інші. Наприклад, бензол – це органічна сполука, що, як відомо, викликає рак.

VOC можуть бути шкідливими для здоров'я людини, викликаючи різноманітні проблеми зі здоров'ям, зокрема подразнення очей, носа та горла,

головний біль, запаморочення, нудоту, задишка, проблеми з диханням, рак, пошкодження печінки, нирок та центральної нервової системи. Вплив VOC може відбуватися через вдихання, ковтання або контакт зі шкірою. Вдихання - найпоширеніший спосіб впливу.

До найпоширеніших джерел VOC належать:

- будівельні матеріали, такі як фарби, килими та меблі;
- побутові товари, такі як миючі засоби, освіжувачі повітря та засоби особистої гігієни;
- офісне обладнання, наприклад, принтери та копіювальні апарати.
- бензин та інші види палива;
- забруднення зовнішнього повітря, яке може потрапляти у вашу оселю

Знаючи концентрацію VOC у вашому домі, ви можете вжити заходів, щоб зменшити вплив цих забруднювачів. Нижче наведено кілька порад, як зменшити вплив шкідливої речовини:

1. Покращити вентиляцію. Вентиляція – це найкращий спосіб зменшити вплив VOC. Відкривайте вікна та двері, коли це можливо, і використовуйте вентилятори для циркуляції повітря.

2. Обирайте продукти з низьким вмістом VOC. Купуючи будівельні матеріали, побутову хімію та офісне обладнання, шукайте продукти, які мають маркування з низьким вмістом VOC або його не містять.

3. Уникайте куріння в приміщенні. Куріння є основним джерелом летких органічних сполук повітрі в приміщенні.

#### **4.1.2 Формальдегід (HCHO)**

Формальдегід (HCHO) - безбарвний, легкозаймистий газ із сильним запахом. Це тип летких органічних сполук (VOC). Формальдегід використовується в різних продуктах, включаючи будівельні матеріали, побутову хімію та засоби особистої гігієни. Вплив високих рівнів формальдегіду може спричинити різноманітні проблеми зі здоров'ям.

Формальдегід часто зустрічається в повітрі приміщень. Це безбарвний, легкозаймистий газ із сильним запахом. Формальдегід використовується в різних продуктах, включаючи будівельні матеріали, побутову хімію та засоби особистої гігієни.

Вплив високих рівнів формальдегіду може спричинити різноманітні проблеми зі здоров'ям, зокрема подразнення очей, носа та горла, головний біль, запаморочення, нудоту, задишку, проблеми з диханням, рак, пошкодження печінки, нирок та центральної нервової системи.

До поширених джерел формальдегіду належать:

- будівельні матеріали, такі як пресована деревина, фанера та ДСП;
- побутові миючі засоби, такі як дезінфікуючі засоби та відбілювачі;
- засоби особистої гігієни, такі як засоби для укладання волосся та рідини для зняття лаку з нігтів;
- сигаретний дим.

З метою зменшення впливу формальдегіду доцільним є дотримання наступних порад:

1. Покращити вентиляцію. Вентиляція - найкращий спосіб зменшити вплив формальдегіду. Відкривайте вікна та двері, коли це можливо, і використовуйте вентилятори для циркуляції повітря.
2. Обирайте продукти з низьким вмістом формальдегіду. Купуючи будівельні матеріали, побутову хімію та засоби особистої гігієни, шукайте продукцію з позначкою "низький вміст формальдегіду" або "без формальдегіду".
3. Уникайте куріння в приміщенні. Куріння є основним джерелом формальдегіду в повітрі приміщень.
4. Проведіть перевірку вашого будинку на вміст формальдегіду. Якщо вас турбує рівень формальдегіду у вашій оселі, ви можете доручити фахівцю перевірити її на вміст формальдегіду.

### 4.1.3 Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>)

Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>) - це газ, який утворюється при диханні людини. Концентрація CO<sub>2</sub> в повітрі приміщень може збільшуватися через погану вентиляцію, що може призвести до ряду проблем зі здоров'ям, в тому числі головні болі, запаморочення, нудоту, втома, проблеми з диханням, підвищений ризик серцевих захворювань та інсульту. Крім того, високий рівень CO<sub>2</sub> може погіршити когнітивні функції та продуктивність.

Найпоширеніші джерела CO<sub>2</sub> включають:

- люди. Люди видихають CO<sub>2</sub> в процесі звичайного дихання;
- домашні тварини. Домашні тварини також видихають CO<sub>2</sub>;
- газові плити та духовки. Газові плити та духовки виробляють CO<sub>2</sub> під час використання;
- автомобілі та інші транспортні засоби. Автомобілі та інші транспортні засоби виробляють CO<sub>2</sub> під час роботи;
- забруднення повітря на вулиці. Забруднене зовнішнє повітря може потрапляти у вашу оселю через тріщини та зазори у вентиляційній системі.

Вжити заходів для зменшення впливу CO<sub>2</sub>. Щоб зменшити вплив цього забруднювача існує кілька порад:

1. Покращити вентиляцію. Вентиляція - найкращий спосіб зменшити вплив CO<sub>2</sub>. Відкривайте вікна та двері, коли це можливо, і використовуйте вентилятори для циркуляції повітря.
2. Обирайте електроприлади з низьким рівнем викидів CO<sub>2</sub>. Купуючи електроприлади, шукайте моделі, які мають маркування Energy Star. Прилади, сертифіковані Energy Star, є більш енергоефективними, що може допомогти зменшити викиди CO<sub>2</sub>.
3. Уникайте куріння в приміщенні. Куріння є основним джерелом CO<sub>2</sub> у повітрі в приміщенні.

4. Проведіть перевірку вашого будинку на вміст CO<sub>2</sub>. Якщо вас турбує рівень CO<sub>2</sub> у вашому домі, ви можете звернутися до фахівця, щоб він перевірів вашу оселю на вміст CO<sub>2</sub>.

Вимірявши концентрацію CO<sub>2</sub> в приміщенні, ви зможете визначити джерела цього забруднювача, оцінити ризики для здоров'я, пов'язані з впливом CO<sub>2</sub>, і вжити заходів для зменшення впливу цього шкідливого газу.

#### **4.1.4 Тверді частинки (PM<sub>2.5</sub>)**

Тверді частинки (PM<sub>2.5</sub>) – це суміш твердих частинок і крапель рідини, що містяться в повітрі. PM<sub>2.5</sub> відноситься до частинок діаметром 2,5 мікрометра або менше. Ці частинки досить малі, щоб потрапляти в легені та кров, де вони можуть викликати різноманітні проблеми зі здоров'ям, включаючи хвороби серця, інсульт, рак легенів, передчасну смерть. Діти, люди похилого віку та люди з респіраторними захворюваннями особливо вразливі до впливу PM<sub>2.5</sub> на здоров'я.

Концентрація PM<sub>2.5</sub> у приміщенні може бути вищою, ніж концентрація PM<sub>2.5</sub> на вулиці, через низку факторів, зокрема:

- погана вентиляція;
- використання дров'яних печей або камінів;
- наявність певних побутових засобів, таких як миючі засоби та освіжувачі повітря;
- куріння.

PM<sub>2.5</sub> на здоров'я може змінюватися залежно від концентрації, тривалості впливу та загального стану здоров'я. Деякі люди можуть бути більш чутливими до PM<sub>2.5</sub>, ніж інші.

Дізнавшись концентрацію PM<sub>2.5</sub> у вашому домі, ви можете вжити заходів, щоб зменшити вплив цього забруднювача. Ось кілька порад щодо зменшення впливу PM<sub>2.5</sub>:

1. Покращити вентиляцію. Вентиляція - найкращий спосіб зменшити вплив РМ2.5. Відкривайте вікна та двері, коли це можливо, і використовуйте вентилятори для циркуляції повітря.

2. Обирайте прилади з низьким рівнем викидів. Купуючи електроприлади, шукайте моделі, які мають маркування Energy Star. Прилади, сертифіковані Energy Star, є більш енергоефективними, що може допомогти зменшити викиди РМ2,5.

3. Уникайте куріння в приміщенні. Куріння є основним джерелом РМ2.5 у повітрі в приміщенні.

4. Використовуйте очищувач повітря. Очищувачі повітря можуть допомогти видалити РМ2.5 з повітря.

#### 4.2 Отримання оцінки якості повітря по зібраним даним

З метою експериментальної перевірки математичної моделі нечіткої логіки нами були зібрані данні за допомогою пристрію DM72T в трьох різних приміщеннях:

- приміщення офісного типу №1;
- приміщення офісного типу №2;
- приміщення жилого типу.

Данні з газоаналізатора наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Покази вимірів приладом DM72T

| Параметри виміру               | Тип приміщення              |                             |                          |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
|                                | Приміщення офісного типу №1 | Приміщення офісного типу №2 | Приміщення жилого типу   |
| Формальдегід (НСНО)            | 0,036 мкг/м <sup>3</sup>    | 0,024 мкг/м <sup>3</sup>    | 0,051 мкг/м <sup>3</sup> |
| Леткі органічні сполуки (TVOC) | 0,088 мкг/м <sup>3</sup>    | 0,33 мкг/м <sup>3</sup>     | 0,038 мкг/м <sup>3</sup> |
| Температура                    | 21°C                        | 23°C                        | 22°C                     |

Продовження таблиці 4.2

|                       |          |         |          |
|-----------------------|----------|---------|----------|
| Вологість             | 57%      | 45%     | 53%      |
| PM2.5                 | 9 мкг    | 3 мкг   | 97 мкг   |
| PM1.0                 | 5 мкг    | 1 мкг   | 54 мкг   |
| PM10                  | 11 мкг   | 3 мкг   | 120 мкг  |
| Вуглекислий газ (CO2) | 1435 ppm | 703 ppm | 1626 ppm |

З метою перевірки розробленої нами моделі підставимо числові показники вимірів забруднюючих речовин та отримаємо числовий показник якості повітря в приміщенні. Для цього визиваємо вікно **Rule Viewer** та зазначаємо вхідні дані.

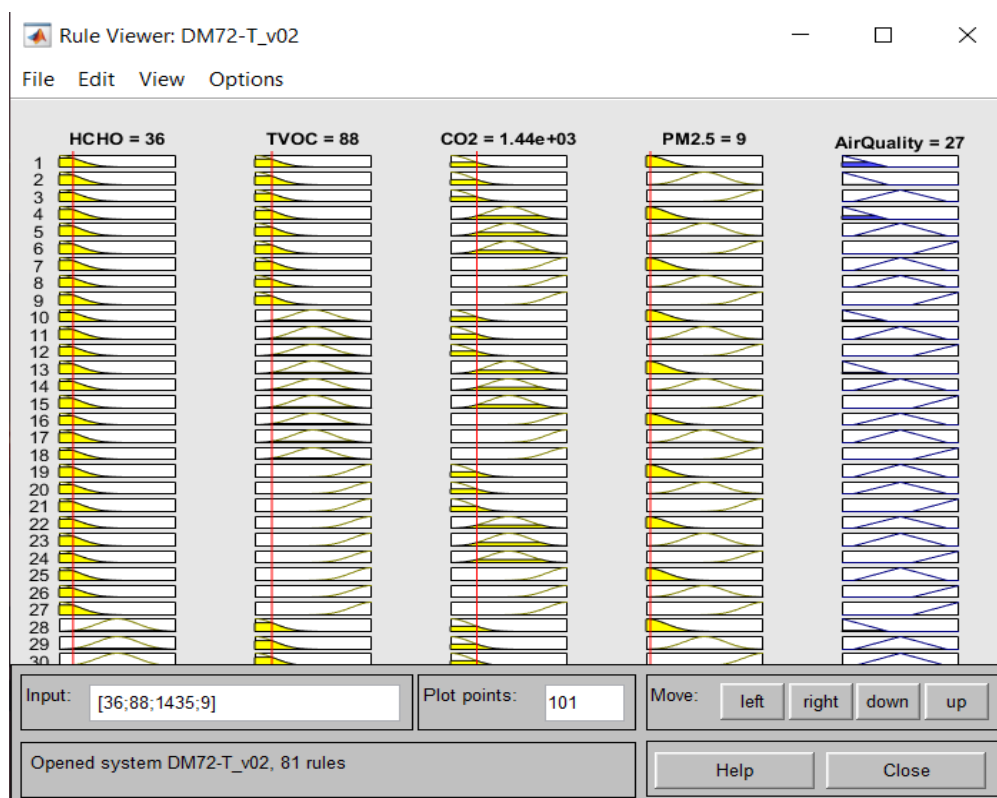


Рис. 4.1. Оцінка якості повітря в офісному приміщенні №1; показник AirQuality дорівнює 27

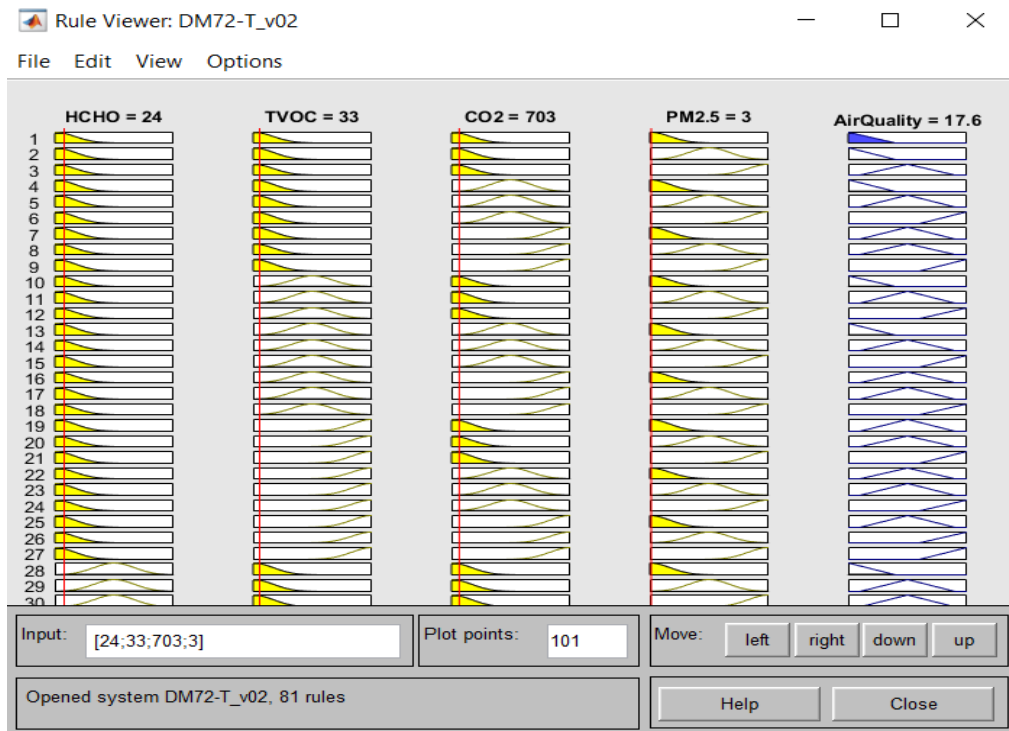


Рис. 4.2. Оцінка якості повітря в офісному приміщенні №2; показник AirQuality дорівнює 17,6

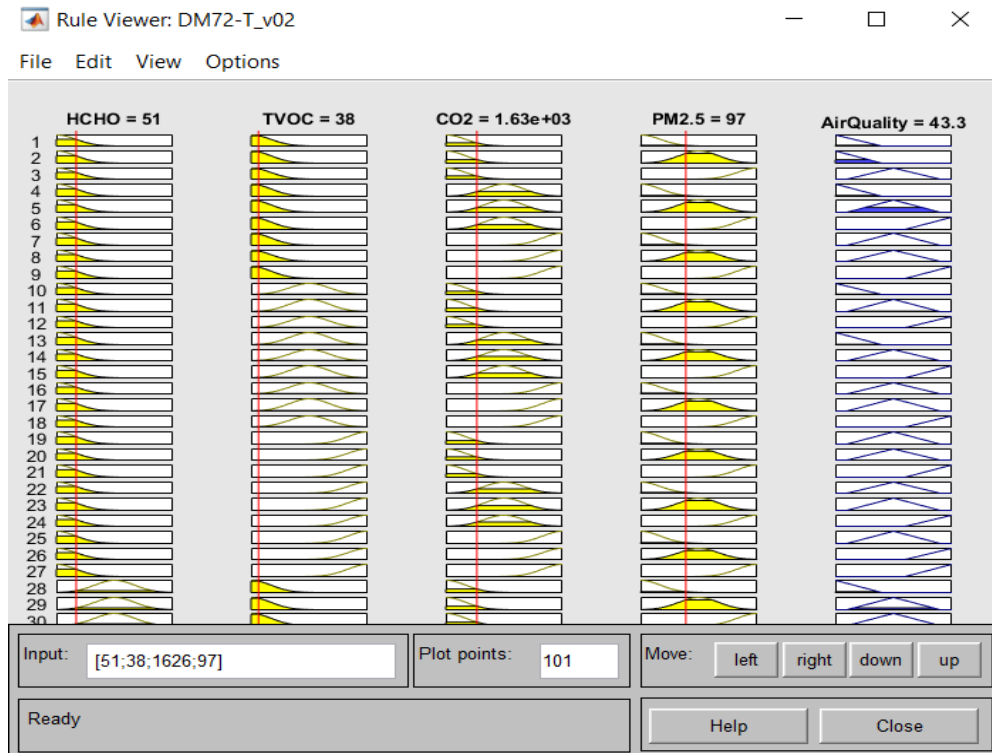


Рис. 4.3. Оцінка якості повітря в житлому приміщенні; показник AirQuality дорівнює 43,3

В результаті перевірки моделі нечіткої логіки отримано числові показники якості повітря в офісних та жилому приміщенні по шкалі від 0 до 100. В кімнаті жилого типу коефіцієнт якості повітря майже вдвічі більший, ніж в офісних приміщеннях №1 та №2.

Отриманий результат можна обумовити тим, що в основним джерелом забруднення є людина. В процесі своїй життєдіяльності людина виробляє чи сприяє виробленню речовин, що в тій чи іншій мірі забруднюють повітря:

1. Викиди від будівельних матеріалів. Будівельні матеріали можуть виділяти леткі органічні сполуки (VOC), які вступають у реакцію з утворенням широкого спектру вторинних продуктів, деякі з яких мають несприятливий вплив на здоров'я.
2. Велика кількість меблів та декоративних елементів. Килими, наприклад, покривають поверхні в приміщеннях і суттєво впливають на якість повітря в приміщенні через велику площу поверхні та багаточисельність компонентів матеріалу.
3. Діяльність людини. Діяльність людини, така як приготування їжі, прибирання та куріння, також може сприяти забрудненню повітря в приміщенні.
4. Погана вентиляція. Недостатня вентиляція також може спричинити підвищення рівня вологості в приміщенні, що може сприяти росту плісняви та інших біологічних забруднювачів.
5. Забруднення зовнішнього повітря. Забруднювачі, такі як тверді частинки та оксиди азоту, можуть потрапляти в будівлі через відкриті вікна та двері або через тріщини в стінах і підлозі

Покращення якості повітря в приміщеннях вимагає усунення цих джерел забруднення за допомогою таких заходів, як належна вентиляція, зменшення використання шкідливих матеріалів та обмеження діяльності, що сприяє забрудненню повітря в приміщеннях.

#### **Висновки до розділу 4.**

В даному розділі були опрацьовані дані, отримання з приладу DM72T в жилому та офісних приміщеннях. Нечітка модель для вимірювання концентрації пилу в повітрі виявила свою дієвість для рейтингової оцінки стану повітря в різних типах приміщень. Запропонований показник запиленості повітря є аналогом AQI, але для оцінювання якості повітря всередині приміщень.

Доведена дієвість моделей нечіткої логіки для експертної оцінки якості повітря за чотирма критеріями. Таким чином отримано інструмент для якісного оцінювання стану повітря.

Аналіз останніх результатів досліджень в сфері задач моніторингу повітря у приміщеннях [12] ще раз свідчить про актуальність обраної нами теми.

## ВИСНОВКИ

В першому розділі розглянуто основні принципи розробки математичних моделей нечіткої логіки, зокрема алгоритм Мамдані. Виконано огляд сучасного стану розвитку систем моніторингу повітря в межах офісних та жилих приміщеннях.

В другому розділі детально розглянуто монітор оцінювання якості повітря DM72T. Наведено інформацію про принцип роботи газоаналізатора та окремо про кожен з датчиків, що відповідають вхідним блокам в математичній моделі.

В третьому розділі покроково була побудована нечітка модель оцінювання якості повітря за чотирма каналами вимірювання – НСНО, TVOC, CO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>. Середовищем моделювання обрано програму MATLAB, модуль Fuzzy Logic. Алгоритм моделі – Мамдані.

В четвертому розділі проведено експериментальну перевірку математичної моделі, підтверджено її дієвість. Отримано числові показники якості повітря в трьох приміщеннях різних видів.

В процесі виконання проєкту були також розроблені:

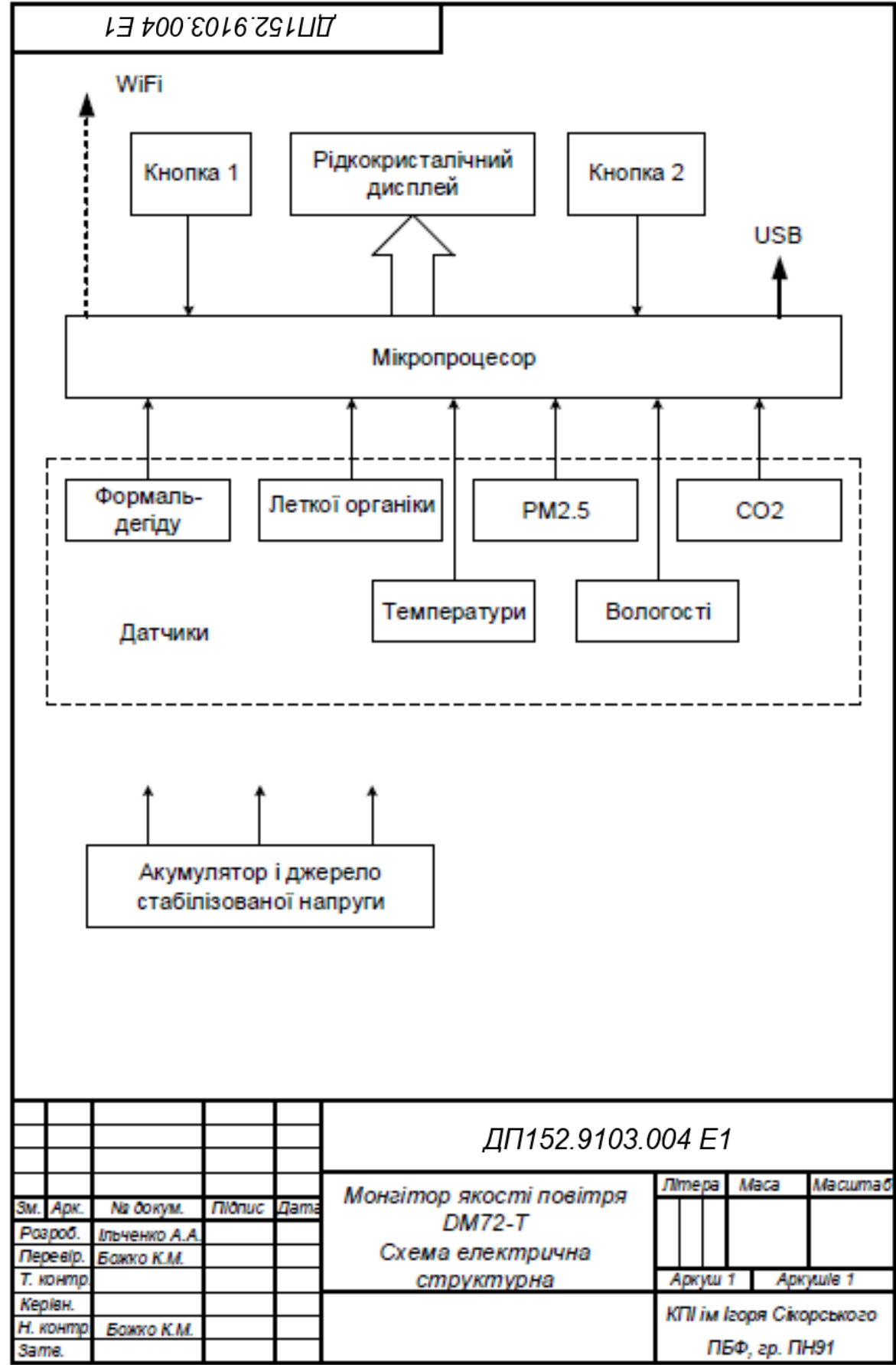
- схема електрична структурна вимірювача концентрації пилу із розширеними функціями (монітору якості повітря) DM72-T;
- схема електрична структурна датчика формальдегіду;
- схема електрична принципова датчика формальдегіду.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

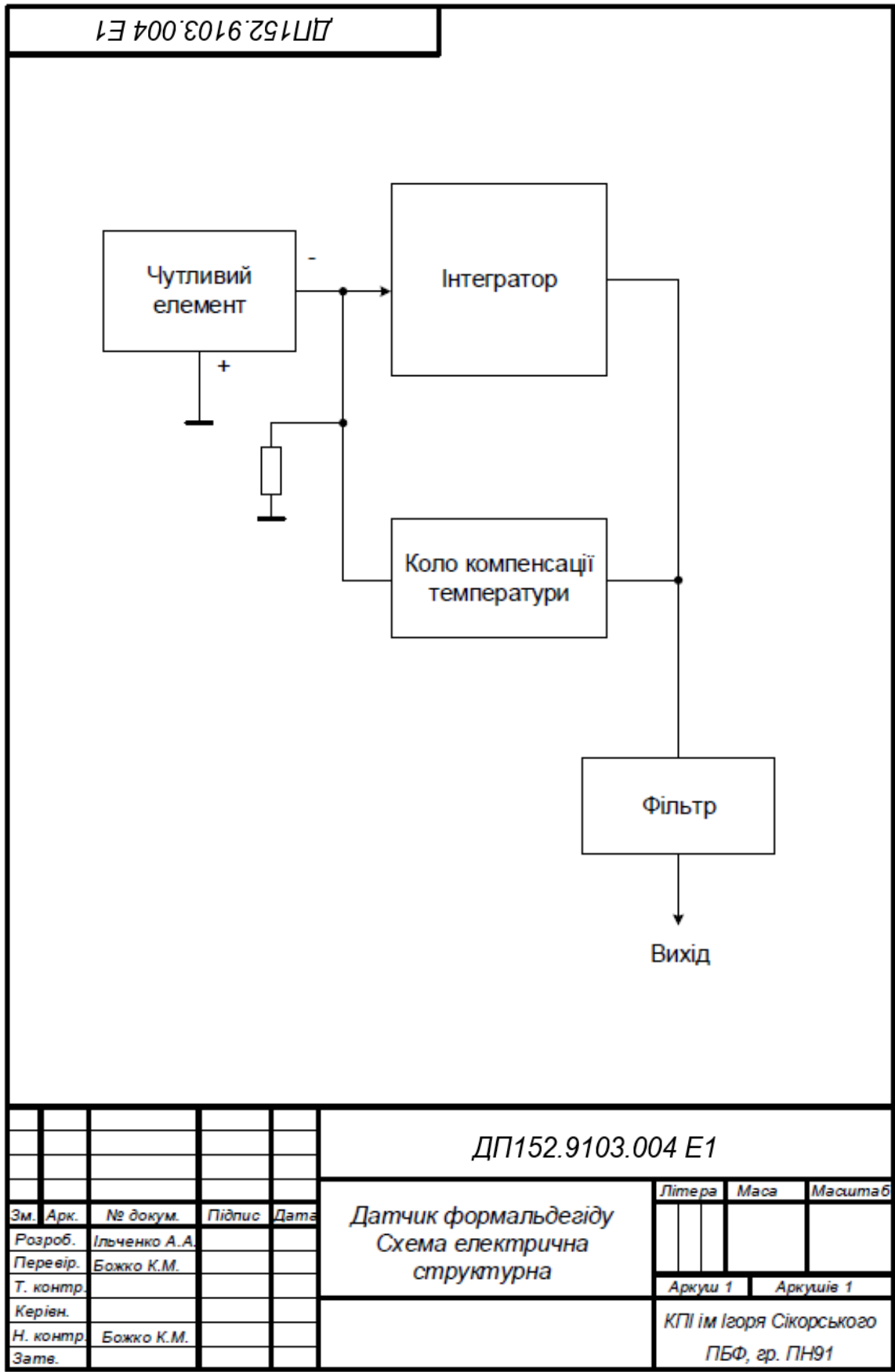
1. Олійник Я.Б., Шищенко П.Г., Гавриленко О.П. // Основи екології. – К., 2012. – с. 288-289.
2. І.Ю. Семенова. Математичні моделі МСС. // Навчальний посібник. – 2014. – с. 82.
3. Кириленко Є.О. Вдосконалення методу вимірювання концентрації пилу в повітрі//Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – 2021 р. –89 с.
4. Нечітка логіка// Теорія алгоритмів і математична логіка: електрон. конспект лекцій Сумський державний університет. URL: [http://knmu.kharkov.ua/attachments/3659\\_8302-2015.PDF](http://knmu.kharkov.ua/attachments/3659_8302-2015.PDF)
5. Zadeh L.A. Fuzzy Sets //Information and Control. – 1965, vol. 8. – Pp. 338–353.
6. Zadeh L.A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic.//Fuzzy Sets and Systems. – 1997, vol. 90. – Pp. 111–127.
7. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants// World Health Organization, 2010. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789289002134>
8. Kosko B. Neural networks and fuzzy systems. – Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall. – 1991. – 449 p.
9. Ross T.J. Fuzzy logic with engineering applications. 3rd ed. – Chichester, UK, :Wiley. – 2010. – 606 p.
- 10.Fuzzy Inference System - Theory and Applications. /Edited by Dr. Mohammad Fazle Azeem. – Publisher: InTech. – 2012. – 504 p.
- 11.Abhijit Pandit. Mathematical Modeling using Fuzzy Logic Applications to Sustainability. – CRC Press. Taylor and Francis Group. – 2021. – 212 p.
- 12.MD KAMAL, Mahanijah; SAZALI, Ahmad Syahir; SARNIN, Suzi Seroja. Real-time indoor air quality monitoring association with humidity, temperature, and carbon monoxide level in the residential environment. //Malaysian Journal

of Chemical Engineering and Technology (MJCET). – [S.l.], v. 4, n. 2. – 2021. – Pp. 107-113.

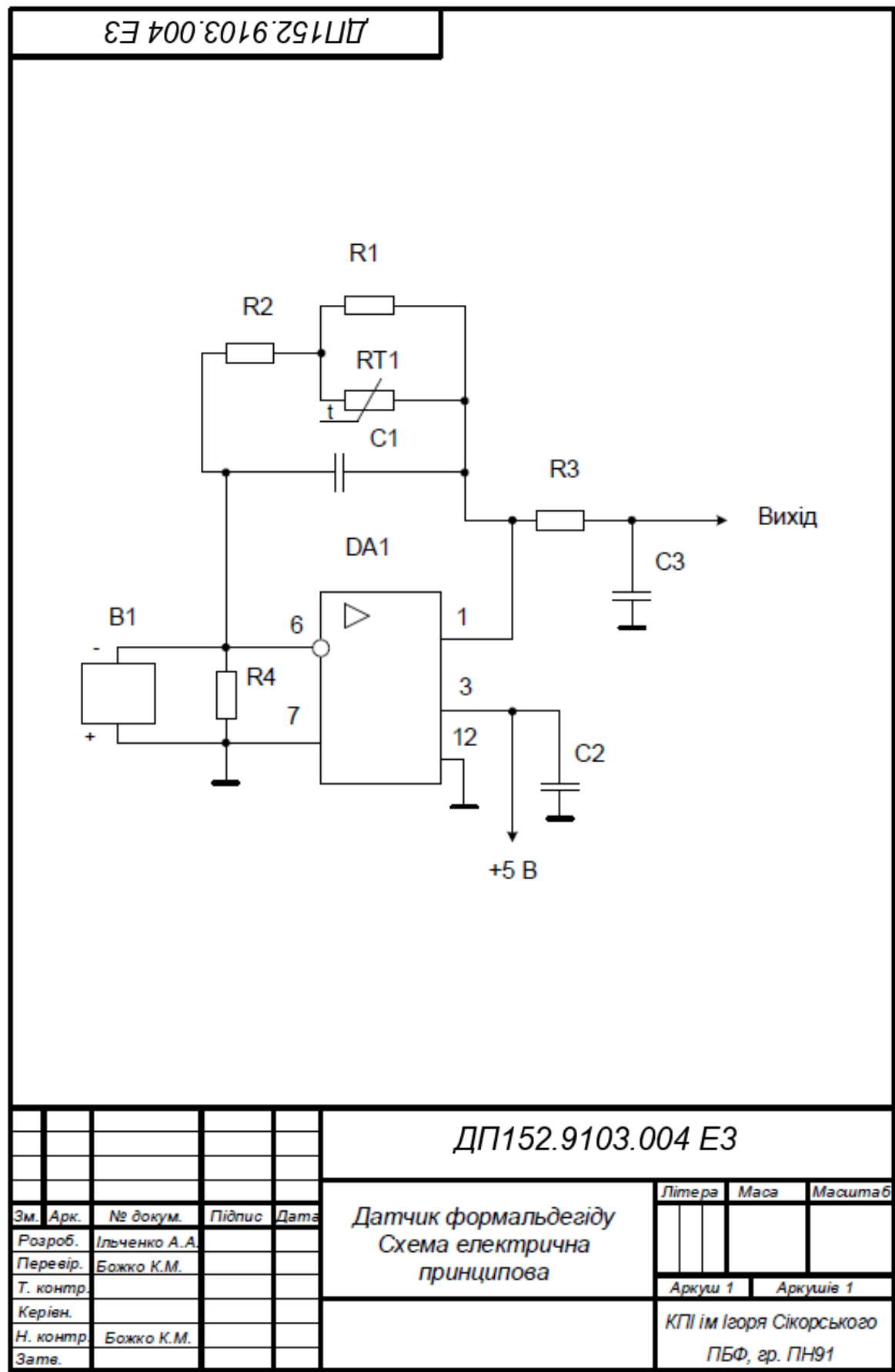
ДОДАТОК А. МОНІТОР ЯКОСТІ ПОВІТРЯ DM72-T. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА



ДОДАТОК Б. ДАТЧИК ФОРМАЛЬДЕГІДУ. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУКТУРНА



ДОДАТОК В. ДАТЧИК ФОРМАЛЬДЕГІДУ. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА.





## ДОДАТОК Е. ЛІСТИНГ ПРОГРАМИ НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ

[System]

Name='DM72-T\_v02'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=4

NumOutputs=1

NumRules=81

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='HCHO'

Range=[0 300]

NumMFs=3

MF1='мала': 'gaussmf', [50.96 -1.776e-15]

MF2='середня': 'gaussmf', [50.96 150]

MF3='велика': 'gaussmf', [50.96 300]

[Input2]

Name='TVOC'

Range=[0 600]

NumMFs=3

MF1='мала': 'gaussmf', [101.9 -3.553e-15]

MF2='середня': 'gaussmf', [101.9 300]

MF3='велика': 'gaussmf', [101.9 600]

[Input3]

Name='CO2'

Range=[400 5000]

NumMFs=3

MF1='добра': 'gaussmf', [781.4 400]

MF2='середня': 'gaussmf', [781.4 2700]

MF3='висока': 'gaussmf', [781.4 5000]

[Input4]

Name='PM2.5'

Range=[0 250]

NumMFs=3

MF1='мала': 'gaussmf', [42.48 1.735e-15]

MF2='середня': 'gaussmf', [42.47 125]

MF3='велика': 'gaussmf', [42.47 250]

[Output1]

Name='AirQuality'

Range=[0 100]

NumMFs=3

MF1='висока': 'trimf', [-40 0 40]

MF2='задовільна': 'trimf', [10 50 90]

MF3='незадовільна': 'trimf', [60 100 140]

[Rules]

1 1 1 1, 1 (1) : 1

1 1 1 2, 1 (1) : 1

1 1 1 3, 2 (1) : 1

1 1 2 1, 1 (1) : 1

1 1 2 2, 2 (1) : 1

1 1 2 3, 3 (1) : 1

1 1 3 1, 2 (1) : 1

1 1 3 2, 2 (1) : 1

1 1 3 3, 3 (1) : 1

1 2 1 1, 1 (1) : 1

1 2 1 2, 2 (1) : 1

1 2 1 3, 3 (1) : 1

1 2 2 1, 1 (1) : 1

1 2 2 2, 2 (1) : 1

1 2 2 3, 3 (1) : 1

1 2 3 1, 2 (1) : 1

1 2 3 2, 2 (1) : 1

1 2 3 3, 3 (1) : 1

1 3 1 1, 2 (1) : 1

1 3 1 2, 2 (1) : 1

1 3 1 3, 3 (1) : 1

1 3 2 1, 2 (1) : 1

1 3 2 2, 2 (1) : 1

1 3 2 3, 3 (1) : 1

1 3 3 1, 2 (1) : 1

1 3 3 2, 3 (1) : 1

1 3 3 3, 3 (1) : 1

2 1 1 1, 1 (1) : 1

2 1 1 2, 2 (1) : 1

2 1 1 3, 2 (1) : 1

2 1 2 1, 2 (1) : 1

2 1 2 2, 2 (1) : 1

2 1 2 3, 3 (1) : 1

2 1 3 1, 2 (1) : 1

2 1 3 2, 2 (1) : 1

2 1 3 3, 3 (1) : 1

2 2 1 1, 2 (1) : 1

2 2 1 2, 2 (1) : 1

2 2 1 3, 3 (1) : 1

2 2 2 1, 2 (1) : 1

2 2 2 2, 2 (1) : 1

2 2 2 3, 3 (1) : 1

2 2 3 1, 2 (1) : 1

2 2 3 2, 2 (1) : 1

2 2 3 3, 3 (1) : 1

2 3 1 1, 2 (1) : 1

2 3 1 2, 2 (1) : 1

2 3 1 3, 3 (1) : 1

2 3 2 1, 2 (1) : 1

2 3 2 2, 2 (1) : 1

2 3 2 3, 3 (1) : 1

2 3 3 1, 3 (1) : 1

2 3 3 2, 3 (1) : 1

2 3 3 3, 3 (1) : 1

3 1 1 1, 2 (1) : 1

3 1 1 2, 3 (1) : 1

3 1 1 3, 3 (1) : 1

3 1 2 1, 2 (1) : 1

3 1 2 2, 2 (1) : 1

3 1 2 3, 3 (1) : 1

3 1 3 1, 2 (1) : 1

3 1 3 2, 3 (1) : 1

3 1 3 3, 3 (1) : 1

3 2 1 1, 2 (1) : 1

3 2 1 2, 3 (1) : 1

3 2 1 3, 3 (1) : 1

3 2 2 1, 2 (1) : 1

3 2 2 2, 3 (1) : 1

3 2 2 3, 3 (1) : 1

3 2 3 1, 3 (1) : 1

3 2 3 2, 3 (1) : 1

3 2 3 3, 3 (1) : 1

3 3 1 1, 3 (1) : 1

3 3 1 2, 3 (1) : 1

3 3 1 3, 3 (1) : 1

3 3 2 1, 3 (1) : 1

3 3 2 2, 3 (1) : 1

3 3 2 3, 3 (1) : 1

3 3 3 1, 3 (1) : 1

3 3 3 2, 3 (1) : 1

3 3 3 3, 3 (1) : 1