

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

РОЗРОБКА АВАРІЙНОЇ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ ПОВІТРЯ

\_\_\_\_\_  
(тема)

Виконав:  
студент 4 курсу, групи ЕЕПС-21-1  
Горшенєв М.А.  
(прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
Спеціальність 171 Електроніка  
(код і повна назва спеціальності)  
Тип програми освітньо-професійна  
Освітня програма  
«Електронні пристрої та системи»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник Ст. викл. Васильєв Ю.С.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри МЕЕПП

(підпис) (прізвище, ініціали)

\_\_\_\_\_  
Бондаренко І.М.

2025 р.

## Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
 Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв  
 Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
 Спеціальність 171 Електроніка  
 (код і повна назва)  
 Тип програми освітньо-професійна  
 Освітня програма «Електронні пристрої та системи»  
 (повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Горшеневу Максиму Андрійовичу  
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи РОЗРОБКА АВАРІЙНОЇ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ ПОВІТРЯ затверджена наказом університету від «28» квітня 2025 р. № 327 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії «09» червня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи САПР: LTspice 24.1.9, Fusion 360.  
Живлення: Li-Ion 3.7 В, 2500 мА·год; живлення логіки — 3.3 В; HV-модуль — 5 В, до 300 мА.  
Мікроконтролер: ESP32 DevKit, PWM, UART, ADC, BLE.  
Сенсори: PMS5003 (UART). HV-модуль: 3.7–5 В → 12–15 кВ, споживання до 1 Вт.  
Баластний резистор: 470 кОм – 1 МОм; обмеження струму до 0.1 мА.  
Умови спрацювання: PM2.5 > 80 мкг/м<sup>3</sup>, газів > 150 ppm, температура > +65 °С, низький заряд < 3.3 В, відмова сенсора > 5 с.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі  
Сучасні технічні рішення у сфері очищення повітря в умовах надзвичайних ситуацій. Переваги та недоліки різних типів методів фільтрації з позицій на- дійності, автономності та ефективності. Принципова схема електричної системи автономного фільтраційного пристрою з урахуванням специфікацій обладнання. Комп'ютерне моделювання роботи системи із застосуванням програмного забезпечення LTspice.
5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Схеми: схема електрична структурна,

Слайди: 8 одиниць


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата
Аналітична частина	Ст. викл. Васильєв Юрій Сергійович		09.11.2025

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виробничої практики	Терміни виконання етапів роботи	Відмітки про виконання
1	Інформаційно-тематичний пошук	05.05.25	
2	Аналіз зібраної інформації	06.05.2025 – 16.05.25	
3	Пошук додаткових джерел	17.05.25 – 25.05.25	
4	Структурування матеріалу	25.05.25 – 01.06.25	
5	Підготовка презентації	02.06.25	
6	Рецензування, нормоконтроль	03.06.23 – 09.06.23	
7	Оформлення звіту та захист	12.06.2025	

Дата видачі завдання 1 квітня 2025 р.

Студент  Горшенєв М.А.  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Ст. викл. Васильєв Ю.С.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до звіту кваліфікаційної роботи містить 40 сторінок, 4 рисунки, 8 використаних джерел, 3 табл.

### РОЗРОБКА АВАРІЙНОЇ СИСТЕМИ ФІЛЬТРАЦІЇ ПОВІТРЯ.

Об'єкт дослідження: автономні аварійні системи фільтрації повітря для використання в умовах надзвичайних ситуацій.

Мета роботи: дослідження сучасних рішень у сфері аварійних систем фільтрації повітря, розробка конструкції індивідуального фільтра, виготовленого за допомогою 3D-друку, з можливістю встановлення змінного НЕРА-фільтра.

Метод: теоретичний та розробка, аналіз літературних джерел.

Актуальність теми: У сучасних умовах — особливо в контексті воєнних дій, техногенних катастроф, хімічних викидів та системних відключень електроенергії — забезпечення захисту органів дихання є пріоритетним напрямом технічної безпеки. Більшість існуючих систем фільтрації залежать від електромережі або не адаптовані до мобільного використання. У зв'язку з цим постає потреба в автономних, доступних та ефективних індивідуальних засобах очищення повітря, які можна швидко виготовити та застосувати в умовах обмеженого доступу до ресурсів. Запропоноване рішення — багаторазова фільтраційна маска з елементами цифрової інтеграції — відповідає цим вимогам і має потенціал до широкого застосування у цивільному та волонтерському середовищі.

## ABSTRACT

Explanatory note to the qualification work report: 40 pages, 4 drawings, 8 textual pages, 3 tables.

### DISCONNECTION OF THE EMERGENCY FILTRATION SYSTEM.

Object of investigation: autonomous emergency air filtration systems for emergency response in emergency situations.

Meta-works: investigation of current solutions in the field of emergency air filtration systems, development of the design of an individual filter prepared using an additional 3D-hand, with the possibility of installing a replacement one HEPA filter.

Method: theoretical and development, analysis of literary sources.

Relevance: In current minds - especially in the context of military operations, man-made disasters, chemical spills and systemic power outages - ensuring the protection of respiratory organs is a priority directly to technical safety. Most of the basic filtration systems are left without electricity or are not adapted to a mobile power station. In connection with this, there is a need for autonomous, accessible and effective individual methods of air purification, which can be quickly prepared and stored in the minds of those with limited access to resources. The proposed solution - a gas-rich filtration mask with elements of digital integration - demonstrates these benefits and has the potential to be widely used by the civilian and volunteer community.

## ЗМІСТ

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФІЛЬТРАЦІЇ ПОВІТРЯ .....	10
1.1 Типи забруднень атмосферного повітря .....	10
1.2 Історія та Методи очищення повітря .....	11
1.3 Перспективи розвитку фільтраційних систем.....	14
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ .....	16
2.1 Фільтраційні маски та мобільні засоби очищення повітря .....	16
2.2 НЕРА-фільтрація .....	18
2.3 Вугільна (адсорбційна) фільтрація .....	22
2.4 Електророзрядна фільтрація.....	23
2.5 Порівняльний аналіз систем фільтрації повітря.....	25
2.6 Сучасний стан ринку фільтраційних систем .....	26
3 РОЗРОБКА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ФІЛЬТРУВАЛЬНОЇ МАСКИ .....	27
3.1 Загальна архітектура портативної системи очищення повітря.....	27
3.2 Технічна реалізація та електронна складова фільтру .....	30
ВИСНОВКИ.....	38
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ .....	40
ДОДАТОК А.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ДОДАТОК Б .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ДОДАТОК В.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
ДОДАТОК Г .....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ

АСФП — автономна система фільтрації повітря;

ЛОС — леткі органічні сполуки;

УФ — ультрафіолетове випромінювання;

HEPA — High Efficiency Particulate Air (високоєфективний повітряний фільтр);

PM<sub>2.5</sub> / PM<sub>10</sub> — тверді частки діаметром до 2.5 / 10 мкм (Particulate Matter);

CADR — Clean Air Delivery Rate (швидкість подачі очищеного повітря);

VOC — Volatile Organic Compounds (леткі органічні сполуки, англійський аналог ЛОС);

CAD — Computer-Aided Design (системи автоматизованого проєктування);

3D — тривимірна (технологія друку або моделювання);

STL — Standard Tessellation Language (формат файлів для 3D-друку).

## ВСТУП

Забруднення повітря — одна з найгостріших екологічних і техногенних проблем XXI століття. Згідно з даними ВООЗ, понад 90% населення Землі дихає повітрям, якість якого не відповідає нормам. У мирний час основними джерелами забруднень виступають транспорт, промисловість, спалювання біомаси, будівництво, але в умовах надзвичайних ситуацій — особливо під час техногенних аварій, пожеж, військових дій чи витоків хімічних речовин — концентрація шкідливих домішок може зростати в десятки разів. Повітря в приміщеннях і укриттях, яке здається захищеним, також може стати смертельно небезпечним без відповідної фільтрації.

Особливу актуальність проблема набуває в контексті воєнних дій на території України, де мільйони людей змушені тривалий час перебувати в укриттях, бомбосховищах, погано вентильованих приміщеннях або тимчасових евакуаційних пунктах. Наявність автономної, доступної та ефективної системи очищення повітря в таких умовах може врятувати життя, попередити масові отруєння та захворювання органів дихання.

Сучасні комерційні системи очищення повітря зазвичай вимагають постійного електроживлення, є громіздкими або розраховані на довготривалу експлуатацію в стабільному середовищі. В умовах війни, техногенної катастрофи або стихійного лиха виникає потреба у зовсім іншому класі пристроїв — автономних аварійних системах фільтрації повітря (АСФП), здатних до негайної активації, роботи без електрики, заміни або централізованої підтримки. Такі системи повинні бути легкими у виготовленні, розрахованими на багаторазове використання і здатними очищати як тверді частки (пил, сажу, спори), так і газоподібні токсини.

Метою цієї роботи є створення концепції такої аварійної системи, зокрема розробка прототипу на основі індивідуальної фільтраційної маски, яка

може бути надрукована на 3D-принтері з використанням стандартних матеріалів (PLA або PETG) та оснащена змінним НЕРА-фільтром і вентилятором. Це дозволяє реалізувати рішення, яке не залежить від постачання з-за кордону, не потребує складного технічного обслуговування та є доступним для громадських ініціатив, волонтерів і місцевих громад.

У ході роботи проведено аналіз основних типів забруднень, методів очищення повітря, сучасних досягнень у сфері механічної, адсорбційної та фотокаталітичної фільтрації. Особливу увагу приділено проблемі індивідуального захисту в умовах обмеженого доступу до електроенергії. Досліджено можливості цифрової модернізації таких пристроїв — використання сенсорів, мікроконтролерів, мобільних додатків тощо.

Впровадження концепції АСФП не лише відповідає нагальним запитам часу, а й відкриває перспективи для розвитку вітчизняних технологій у сфері безпеки, екології та інженерного захисту. Вона сприяє формуванню культури самозахисту населення, підвищує стійкість громад до надзвичайних подій і може слугувати основою для створення державних та муніципальних програм з виготовлення простих засобів очищення повітря в умовах кризи.

## 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФІЛЬТРАЦІЇ ПОВІТРЯ

### 1.1 Типи забруднень атмосферного повітря

Атмосферне повітря є складною сумішшю газів, водяної пари, аерозолів, пилу, мікроорганізмів та інших компонентів, які у нормальних умовах не становлять небезпеки для здоров'я людини. Проте при перевищенні певної концентрації шкідливих домішок таке повітря вважається забрудненим і може негативно впливати на дихальну, серцево-судинну та імунну системи.

До основних типів забруднень повітря, які враховуються при проектуванні фільтраційних систем, належать:

- тверді частки — пил, сажа, зола, мінеральні волокна. Ці частинки, потрапляючи в дихальні шляхи, можуть викликати подразнення, алергії або хронічні хвороби легенів. Особливо небезпечні дрібнодисперсні частинки — PM2.5 та PM10, які мають мікронні розміри та здатні проникати глибоко в легені;

- газоподібні сполуки — оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), діоксид сірки (SO<sub>2</sub>), озон (O<sub>3</sub>), аміак (NH<sub>3</sub>) та інші. Ці речовини часто виникають у результаті згоряння палива, витоків хімічних речовин, промислових процесів та є небезпечними навіть у малих концентраціях;

- леткі органічні сполуки (ЛОС) — це речовини, які випаровуються при кімнатній температурі та утворюють пари, шкідливі для здоров'я. Прикладами є формальдегід, бензол, толуол, ацетон. Вони можуть виділятися з меблів, будматеріалів, лакофарбових покриттів і є потенційними канцерогенами;

- біологічні забруднювачі — віруси, бактерії, грибки, спори плісняви, пилок рослин, які є збудниками інфекцій або алергій. Особливо небезпечні в умовах скупчення людей (лікарні, укриття, школи);

- радіоактивні аерозолі та продукти згоряння — виникають при пожежах, вибухах, вибоках з атомних електростанцій. Їх поява загрожує як отруєннями, так і довготривалим опроміненням;

Розуміння природи забруднення є ключовим для правильного вибору методу фільтрації. Одні технології ефективні проти часток, інші — проти газів чи біологічних агентів, тому система очищення має враховувати реальні загрози в заданому середовищі.

## 1.2 Історія та Методи очищення повітря

Ідея очищення повітря виникла задовго до розвитку сучасної науки. Ще в античності люди намагалися захистити органи дихання від диму та токсичних випарів за допомогою вологої тканини або примітивних масок. У Стародавньому Єгипті та Греції шахтарі, ковалі й гончарі застосовували прості способи фільтрації, хоча й не усвідомлювали фізичних принципів цих процесів.

У середньовіччі, особливо в Європі, зростання кількості ремесел і тісних приміщень викликало потребу у захисті від пилу та диму. Але перші інженерні рішення з'явилися лише у XIX столітті під час промислової революції. У 1823 році англійські інженери Джон і Чарльз Дін запропонували перший дихальний апарат для пожежників і шахтарів, який мав змінний фільтр і сприяв безпечному диханню в задимленому середовищі.

Під час Першої світової війни були створені перші протигази з активованим вугіллям, які захищали солдатів від хімічної зброї. Ці технології лягли в основу розвитку цивільних засобів очищення повітря. Справжній прорив стався під час Другої світової війни, коли в рамках проєкту «Манхеттен» було розроблено перший HEPA-фільтр (High Efficiency Particulate Air), здатний затримувати понад 99,97% часток розміром понад 0,3 мкм.

Після війни технології очищення повітря швидко поширилися в медичних закладах, на атомних станціях, у лабораторіях і навіть у побуті. З 1970-х років розпочалась стандартизація HEPA-фільтрів і впровадження нових систем:

фотокаталітичних, електростатичних, іонізаторів, фільтрів на основі вуглецевих сорбентів.

На початку XXI століття розвиток нанотехнологій відкрив нову еру фільтрації: з'явилися фільтрувальні матеріали на основі графену, мембрани з молекулярним ситом, композитні касети з самоочищенням. Активно впроваджуються інтелектуальні фільтраційні системи, здатні оцінювати якість повітря в реальному часі та автоматично адаптувати свою роботу.

Системи очищення повітря базуються на використанні одного або кількох технологічних методів, які реалізують процес видалення забруднень з повітряного середовища. Методи очищення класифікують за принципами дії:

Механічна фільтрація застосовується для видалення твердих часток та аерозолів. Найпоширеніший приклад — HEPA-фільтри (High Efficiency Particulate Air), які мають ступінь затримання до 99,97% частинок розміром понад 0,3 мкм. Повітря проходить крізь шар волокон, де частинки затримуються завдяки інерції, дифузії та захопленню. Метод є безпечним, надійним та не утворює шкідливих побічних продуктів.

Адсорбційна фільтрація передбачає поглинання молекул шкідливих газів і летких речовин на поверхні активованого вугілля або спеціалізованих сорбентів. Цей метод ефективний для очищення повітря від запахів, ЛОС, озону, сірководню тощо. Фільтруючий елемент має велику питому поверхню (до 1500 м<sup>2</sup>/г), завдяки чому затримує значну кількість шкідливих сполук. Недоліком є поступове насичення вугільного шару, що вимагає періодичної заміни.

Фотокаталітична очистка базується на хімічному розкладанні органічних речовин за участю TiO<sub>2</sub> (діоксид титану), який активується під впливом ультрафіолетового світла. У процесі утворюються активні форми кисню (радикали), які розщеплюють складні молекули до води та вуглекислого газу. Цей метод ефективно знищує мікроорганізми, віруси, сполуки бензольного ряду. Переваги: саморегенерація каталізатора, відсутність фільтрувального шару. Недоліки: потреба в УФ-освітленні, обмежена швидкість реакції.

Електростатичне очищення реалізується шляхом заряджання часток та осадження їх на електродах або сітках. Повітря проходить крізь іонізатор, після чого частинки осідають на пластинах-колекторах. Метод є ефективним проти диму, пилу та алергенів, здатні багаторазово використовуватись (після очищення), проте також можуть утворювати озон і потребують складного догляду.

Іонізація та озонування ці методи часто комбінуються з іншими. Іонізатори створюють негативно заряджені іони, які приєднуються до частинок у повітрі та змушують їх осідати. Озонатори виробляють озон ( $O_3$ ), який знищує бактерії та віруси, але може бути токсичним для людини при перевищенні допустимої концентрації.

У сучасних автономних системах очищення повітря найбільш ефективними вважаються комбіновані рішення. Наприклад, поєднання НЕРА-фільтра, вугільного модуля та фотокаталітичного етапу дозволяє забезпечити комплексне очищення — механічне, газове і біохімічне — в одній системі. Саме такий підхід є доцільним у аварійних умовах.

Попри технологічний прогрес, існуючі фільтраційні системи мають низку обмежень, що унеможливають їх ефективне використання в умовах надзвичайних ситуацій:

- залежність від електромережі. У разі аварійного знеструмлення більшість систем виходять з ладу;
- відсутність автоматичного запуску при перевищенні допустимих норм забруднення;
- орієнтація на тривалу експлуатацію, а не на швидке реагування в екстрених умовах;
- висока вартість або складність розгортання в умовах обмеженого часу.

Це створює об'єктивну потребу в новій категорії пристроїв — автономних аварійних системах фільтрації повітря (АСФП). Такі рішення повинні бути здатними до миттєвої активації, мобільного використання, автономної роботи

без живлення від мережі та забезпечення ефективного очищення в обмеженому просторі.

У деяких країнах вже розробляються портативні модулі або індивідуальні засоби захисту з активною фільтрацією. Проте повноцінні автономні стаціонарні системи для використання в житлових чи громадських приміщеннях залишаються, переважно, на рівні концепцій. Це відкриває перспективи для створення ефективних рішень, адаптованих до реалій України та потреб цивільного населення в умовах ризику техногенних аварій, бойових дій або екологічних катастроф.

### 1.3 Перспективи розвитку фільтраційних систем

У найближчому майбутньому розвиток технологій фільтрації повітря буде визначатися декількома ключовими тенденціями, орієнтованими на підвищення ефективності, безпеки, енергоощадності та інтелектуальної адаптації систем до умов середовища. Найперспективніші напрями включають:

Застосування мікроконтролерів та сенсорних мереж дозволить створювати системи з динамічним реагуванням на зміну забруднення. Інтелектуальні алгоритми (на основі ШІ або fuzzy logic) можуть автоматично змінювати потужність вентиляції, вмикати додаткові модулі фільтрації або сигналізувати про зношення фільтрів.

Використання наноматеріалів (зокрема, графену та його оксидів) дозволить створити тонші, легші та більш селективні фільтри, здатні затримувати навіть віруси або токсичні мікрочастинки. Такі фільтри матимуть менший опір повітряному потоку та більший термін служби.

Розробка фільтрів із фотокаталітичними або плазмовими властивостями дозволить реалізувати системи, які не потребують ручного обслуговування. Вони будуть самостійно знищувати органіку, бактерії, леткі сполуки та інші забруднювачі.

Фокус зміщується в бік мобільних пристроїв (для укриттів, транспорту, особистого захисту), які працюють на акумуляторах, мають малі габарити та включають комбіновані фільтраційні касети. Такі рішення будуть особливо затребувані в умовах нестабільного середовища, війн, екологічних катастроф.

Використання капілярних структур, сорбуючих мембран або гібридних матеріалів, що працюють без електроживлення, дозволить створювати системи «останнього рубежу» — для критичних ситуацій без доступу до енергії.

Загалом, у найближчі 5–10 років очікується синтез усіх переваг існуючих технологій в адаптивні, компактні, доступні та безпечні фільтраційні системи нового покоління, які зможуть застосовуватись у цивільному, медичному, військовому та гуманітарному контексті.

## 2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

### 2.1 Фільтраційні маски та мобільні засоби очищення повітря

У контексті надзвичайних ситуацій (НС) фільтраційні маски є одним з найефективніших засобів індивідуального захисту органів дихання. Їхня мобільність, простота використання, доступність та здатність забезпечити базовий рівень очищення повітря роблять їх невід'ємною частиною засобів першого реагування. У поєднанні з портативними системами фільтрації маски формують персональний захисний комплекс, особливо актуальний у разі задимлення, хімічних викидів або інфекційної загрози.

Класифікація фільтраційних масок:

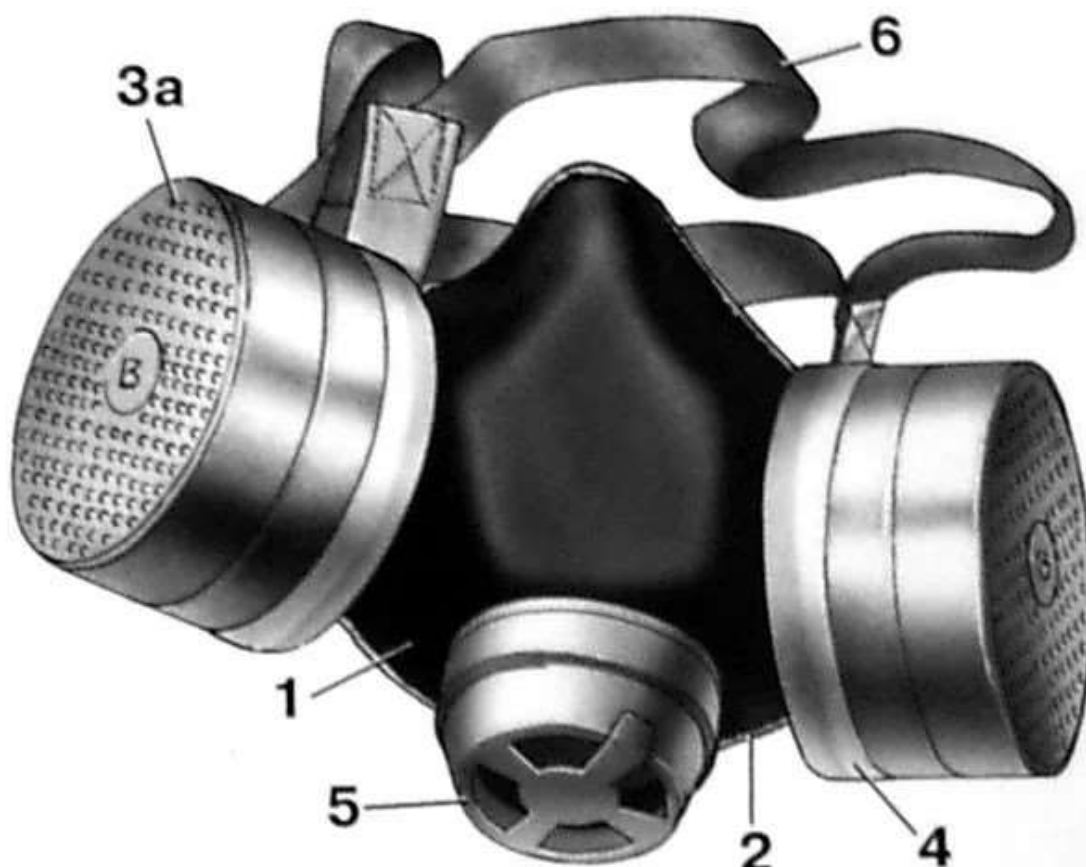
- медичні (хірургічні) маски — призначені переважно для стримування біологічних крапель. Не забезпечують герметичного прилягання і не захищають від дрібнодисперсних часток чи газів;

- фільтрувальні напівмаски типу FFP (EN 149) — Існує три основні категорії FFP1 – базовий рівень захисту від пилу ( $\geq 80\%$ ), FFP2 (аналог N95) – захист від вірусів, туману, дрібного пилу ( $\geq 94\%$ ), FFP3 – захист від токсичних аерозолів і мікрочастинок ( $\geq 99\%$ );

- маски з активованим вугіллям — містять вугільний шар, що адсорбує запахи, леткі органічні сполуки, аміак, озон. Особливо ефективні в умовах задимлення або присутності хімічних домішок;

- протигази (цивільні, військові) — використовуються в умовах надзвичайної хімічної або біологічної небезпеки. Забезпечують повний захист від газоподібних сполук, отруйних парів, аерозолів та бактеріологічних агентів;

- багаторазові фільтраційні маски з касетними фільтрами — мають змінні НЕРА, вугільні чи комбіновані фільтри. Забезпечують гнучкість у виборі типу захисту, економічність та придатність до тривалого використання.



1 — гумова півмаска; 2 — обтюратор; 3 — поглинаючий патрон; 3а — фільтрувально-поглинаючий патрон; 4 — пластикові манжети з клапанами вдиху; 5 — клапан видиху з запобіжним екраном; 6 — оголів'я

Рисунок 2.1 - Схема багаторазовий фільтраційні маски

Вони поєднують у собі компактність, автономність і ефективність, що робить їх незамінними у надзвичайних ситуаціях. Основними перевагами таких масок є незалежність від електроживлення, можливість миттєвого застосування у критичний момент, зручність транспортування та зберігання, а також висока ефективність очищення повітря за умови правильного прилягання до обличчя користувача. Мобільні фільтраційні рішення

Окрім індивідуальних засобів, сучасний ринок пропонує також мобільні фільтраційні системи — портативні очищувачі повітря з автономним живленням на базі акумуляторів або батарей. Такі пристрої, як правило,

поєднують у собі HEPA-фільтрацію, адсорбційні елементи для поглинання газоподібних речовин, а також додаткові модулі для іонізації або ультрафіолетової дезінфекції. Завдяки такому поєднанню вони здатні забезпечити багаторівневе очищення повітря навіть у польових умовах.

Застосування мобільних очищувачів є доцільним у різних умовах, зокрема в укриттях, наметах, транспортних засобах, або для індивідуального використання в середовищі з підвищеним ризиком. У деяких розробках реалізовано концепцію персонального очищення зони дихання — коли очищувач кріпиться до рюкзака, пояса або маски і створює локальну зону чистого повітря. Це особливо важливо для рятувальників, військових або працівників хімічно небезпечних об'єктів.

У зв'язку з тривалими загрозами — військовими, техногенними та екологічними — розробка та широке впровадження ефективних фільтраційних масок і мобільних рішень набуває особливої актуальності. Ці засоби можуть стати основою захисту цивільного населення у випадку надзвичайних подій без доступу до централізованих систем очищення повітря.

## 2.2 HEPA-фільтрація

HEPA-фільтрація (High Efficiency Particulate Air) — це одна з найефективніших та найпоширеніших технологій очищення повітря, яка забезпечує видалення до 99,97% частинок розміром 0,3 мкм. Такий рівень очищення дозволяє затримувати більшість алергенів, пилу, вірусів, бактерій, спор грибів, тютюнового диму та дрібнодисперсних часток (зокрема PM<sub>2.5</sub> і PM<sub>10</sub>), що є особливо актуальним у контексті зростання кількості забруднень внаслідок урбанізації, промислового виробництва та військових подій. У сучасних умовах вона є невід'ємною частиною систем вентиляції та кондиціонування (HVAC), очищувачів повітря, повітряних шлюзів, автомобільних салонів, кабін літаків та навіть операційних залів.

HEPA-фільтр виготовляється з надтонких скловолокон або синтетичних матеріалів, щільно укладених у вигляді багат шарового мату. Повітря, проходячи через цей шар, залишає в ньому забруднення завдяки трьом основним механізмам:

Інерційна імпація — великі частинки (понад 1 мкм) не можуть змінити напрям потоку та стикаються з волокнами, після чого залишаються на них.

Перехоплення — середні за розміром частинки, що слідує за потоком повітря, проходять досить близько до волокон і "прилипають" до них.

Дифузія — дуже дрібні частинки (менше 0,3 мкм) поводяться непередбачувано через ефект Браунівського руху, що збільшує ймовірність контакту з волокнами.

Ці три процеси забезпечують високу ефективність очищення у широкому діапазоні розмірів частинок — від кількох мікронів до наночастинок.

Згідно з європейським стандартом EN 1822:2009, HEPA-фільтри поділяються на кілька класів ефективності:

E10–E12 — EPA (Efficient Particulate Air);

H13–H14 — HEPA (High Efficiency Particulate Air);

U15–U17 — ULPA (Ultra Low Penetration Air);

Найбільш поширеним у побутових пристроях є клас H13, який забезпечує затримання 99,95% частинок. Високоточні та критичні об'єкти (наприклад, фармацевтичне виробництво, медичні операційні) використовують HEPA H14 або ULPA U15.

Переваги технології HEPA полягають насамперед у високій ефективності затримання твердих частинок, включаючи пил, аерозолі, алергени, бактерії та віруси. Ця технологія не передбачає використання хімічних речовин, тому є безпечною для здоров'я користувача та навколишнього середовища. Фільтрація відбувається виключно фізичним способом, що виключає утворення токсичних побічних продуктів. Крім того, HEPA-фільтри сумісні з іншими типами фільтрації — адсорбційною, фотокаталітичною, ультрафіолетовою — і можуть бути інтегровані у багатоступеневі системи. HEPA-фільтри не потребують

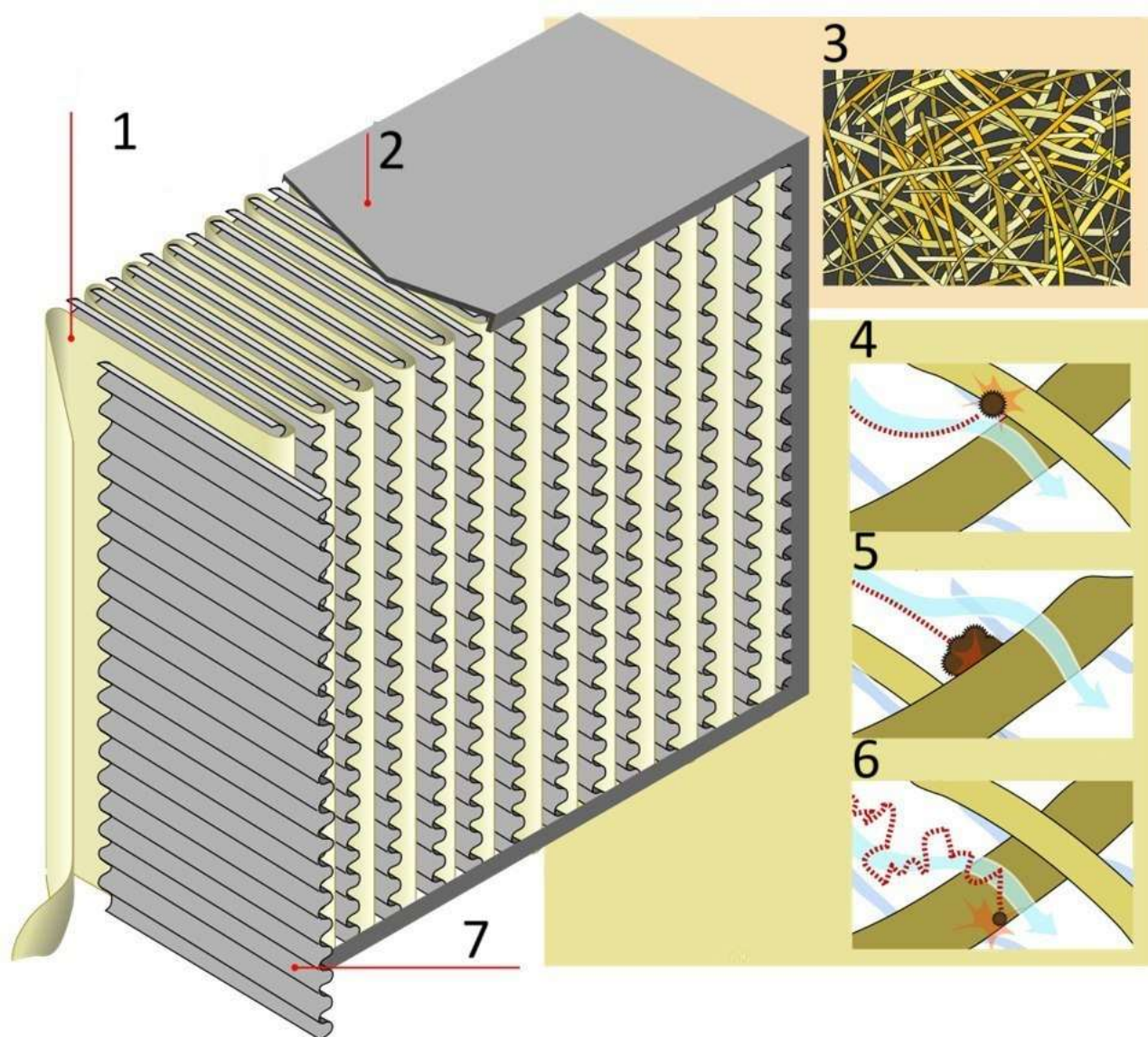
складного обслуговування: у більшості випадків достатньо періодичної заміни згідно з регламентом виробника (зазвичай кожні 6–12 місяців у побутових умовах).

Попри беззаперечну ефективність, технологія HEPA має низку обмежень, які необхідно враховувати. Найсуттєвішим недоліком є те, що фільтри цього типу не здатні видаляти газоподібні забруднювачі, зокрема вуглекислий газ, формальдегід або леткі органічні сполуки. Для усунення таких речовин необхідно використовувати додаткові сорбційні модулі. Також HEPA-фільтри створюють значний опір повітряному потоку через щільну структуру волокон, що потребує встановлення потужних вентиляторів для забезпечення належної продуктивності системи. Ще одним обмеженням є обмежений термін служби фільтра, який у разі інтенсивного забруднення може суттєво зменшуватися. Крім того, за умов підвищеної вологості або неправильного зберігання у фільтрувальному матеріалі можуть розвиватися мікроорганізми, що знижує гігієнічність використання.

З огляду на вищезазначене, при створенні автономної системи очищення повітря особливу увагу слід приділити оптимальному розміщенню HEPA-фільтра, забезпеченню щільності його прилягання до корпусу та зменшенню втрат тиску в повітряному каналі. У сучасних розробках автономних масок і фільтрувальних пристроїв все частіше застосовуються змінні HEPA-картриджі, які легко замінюються користувачем без потреби в спеціальному інструменті. Такі рішення дозволяють підтримувати постійно високий рівень очищення без значного технічного обслуговування. Деякі конструкції також передбачають комбіновані фільтри, де HEPA-шар поєднаний з активованим вугіллям або антибактеріальним покриттям, що підвищує загальну ефективність системи, особливо у критичних умовах експлуатації — наприклад, під час бойових дій або перебування в забрудненому середовищі.

У системах автономного очищення повітря HEPA-фільтри є основним елементом, який забезпечує механічне видалення твердих частинок, включаючи небезпечні аерозолі, мікроби, пил. Вони є першим щаблем у багатоступеневій

фільтрації, створюючи передумови для ефективної роботи наступних модулів — вугільного та фотокаталітичного.



1 — суцільний лист фільтрувального матеріалу; 2 — рамка фільтра; 3 — фільтрувальний лист із хаотично розташованих волокон; 4 — зачеплення ( $< 0,1$  мкм); 5 — інерція ( $> 1$  мкм); 6 — дифузія ( $< 0,1$  мкм); 7 — алюмінієвий роздільник

Рисунок 2.2 - Схема HEPA фільтру

У критичних ситуаціях, таких як пожежа, вибух, хімічний викид або військове застосування димових засобів, HEPA-фільтрація дозволяє значно знизити рівень твердих забруднювачів у повітрі навіть без електромережі.

### 2.3 Вугільна (адсорбційна) фільтрація

Ще одним ключовим методом очищення повітря є використання активованого вугілля — матеріалу з високою питомою площею поверхні, здатного поглинати газоподібні сполуки. Цей тип фільтрації належить до адсорбційних методів і використовується у більшості сучасних фільтрувальних систем у парі з HEPA-фільтрами.

Активоване вугілля має здатність затримувати такі шкідливі речовини, як формальдегід, аміак, бензол, толуол, озон, а також неприємні запахи (від диму, побутової хімії, продуктів згорання тощо). Принцип дії ґрунтується на фізичному прилипанні молекул забруднювача до поверхні вуглецевого сорбенту.

В умовах надзвичайних ситуацій — наприклад, при витокі хімікатів або задимленні — вугільний фільтр забезпечує захист органів дихання шляхом очищення повітря від газоподібних домішок, що не видаляються механічними методами. Саме тому він є обов'язковим компонентом аварійних респіраторів та автономних фільтраційних систем.

Серед переваг слід відзначити: ефективне усунення запахів та летких органічних сполук, простоту конструкції та безпеку використання. Водночас до недоліків належать: обмежена ємність (фільтр швидко насичується), необхідність заміни та неможливість очищення від твердих часток.

Вугільна фільтрація має певні обмеження. Основна проблема — обмежена сорбційна ємність. У разі насичення активного шару вугілля його ефективність стрімко знижується, і фільтр починає пропускати або навіть віддавати накопичені забруднювачі назад у повітря. Через це потрібна своєчасна заміна сорбенту. Крім того, активоване вугілля не затримує аерозольні та тверді частки — його дія спрямована виключно на газову фазу.

З метою підвищення ефективності у спеціалізованих фільтрах використовується імпрегноване активоване вугілля — просочене хімічними

реагентами (наприклад, кислотами, лугами, металами), що дозволяє краще поглинати специфічні речовини, зокрема аміак, діоксид сірки або органічні кислоти. Такі фільтри використовуються у лабораторіях, медичних закладах, системах військового захисту.

У системах автономного очищення повітря вугільний модуль зазвичай встановлюється після НЕРА-фільтра. Це дозволяє спочатку видалити тверді частки, що знижують ефективність сорбційного шару, а потім провести хімічне очищення газової фази. Така послідовність дає змогу максимально подовжити ресурс вугільної касети та забезпечити комплексний захист користувача.

#### 2.4 Електророзрядна фільтрація

Електророзрядна фільтрація, яка також відома як електростатична або електрофільтрація, є сучасним методом очищення повітря, що базується на використанні впливу електричного поля на аерозольні частинки. На відміну від механічних фільтрів, що фізично утримують забруднювачі, електророзрядна фільтрація реалізує принцип безконтактного впливу на частинки шляхом іонізації та осадження, що дозволяє значно зменшити аеродинамічний опір і забезпечити ефективність навіть для найдрібніших частинок, зокрема тих, що мають розміри менше 0,3 мікрметра.

Процес електрофільтрації полягає у створенні електричного поля високої напруги між двома типами електродів: коронуючими та осаджувальними. Повітря, забруднене пилом, димом або мікрочастинками, спочатку проходить через іонізаційний блок, де встановлені тонкі металеві дроти (діаметром 0,1–0,3 мм), виготовлені зазвичай з вольфраму або ніхром. До них підводиться постійна напруга величиною від 3 до 15 кіловольт, що призводить до виникнення коронного розряду — типу електричного розряду, при якому утворюється потік заряджених частинок. Цей розряд іонізує навколишнє повітря і заряджає зважені в ньому частинки переважно негативним зарядом.

Далі відбувається процес електростатичної міграції заряджених частинок у напрямку до осаджувальних електродів, які заземлені або мають протилежний заряд. Осаджувальні електроди, як правило, мають форму пластин або сіток, виготовлених з алюмінію, нержавіючої сталі або графітовмісних композитів. Завдяки дії кулонівської сили заряджені частинки рухаються по прямій траєкторії та осідають на поверхні осаджувальних електродів.

Для підтримання стабільного електричного поля в системі застосовуються високовольтні джерела живлення. Найчастіше це DC-DC перетворювачі, які здатні формувати напругу до 12...15 кВ, працюючи при цьому від джерел постійного струму з низькою напругою — акумуляторів на 3,7В або 7,4 В. У сучасних розробках електророзрядних фільтрів додатково застосовуються мікроконтролери для моніторингу рівня напруги, запобігання перенавантаженню та автоматичного відключення у разі виявлення несправностей.

Серед головних переваг електророзрядної фільтрації варто виділити її високу ефективність при видаленні найдрібніших частинок (включно з РМ 0.3 і менше), низький опір повітряному потоку та відсутність витратних матеріалів, що підлягають регулярній заміні. Також даний метод може бути інтегрований у смарт-системи керування з використанням сенсорів, Bluetooth та мобільного керування.

Найбільш критичним обмеженням є утворення озону в процесі коронного розряду, що є побічним продуктом іонізації. Високі концентрації озону можуть бути шкідливими для здоров'я, тому необхідно передбачати засоби контролю його рівня. Крім того, суттєвим недоліком є неспроможність електрофільтра затримувати газоподібні токсичні домішки, які проходять крізь електричне поле без змін.

## 2.5 Порівняльний аналіз систем фільтрації повітря

Для вибору оптимальної архітектури аварійної системи фільтрації повітря (АСФП) необхідно оцінити ефективність існуючих типів фільтраційних технологій. У таблиці наведено порівняння основних типів фільтрів за ключовими параметрами.

Таблиця 2.1 Порівняння основних типів фільтрів

Тип фільтрації	Принцип роботи	Затримувані речовини	Ефективність	Переваги	Недоліки
HEPA	Механічне захоплення дрібнодисперсних часток	PM2.5, пилок, спори, алергени	до 99,97%	Висока ефективність, не створює озону	Не видаляє газів та запахи
Активоване вугілля	Адсорбція молекул газів і ЛОС	VOC, запахи, чадний газ (частково)	70–90%	Ефективний проти запахів і хімікатів	Потребує частої заміни, не діє на частки
Фотокаталітична (TiO <sub>2</sub> )	Окислення забруднень під UV-світлом	VOC, бактерії, віруси	до 95%	Самоочищується, знищує органіку	Потребує UV-лампи, повільна дія
Електростатична	Зарядження часток і осадження на пластини	Пил, дим	85–98%	Перезаряджається, мало шуму	Генерує озон, складна очистка
Іонізатор	Насичення повітря іонами	Пил, бактерії (опосередковано)	~60–70%	Компактний, тихий	Генерує озон, сумнівна ефективність

## 2.6 Сучасний стан ринку фільтраційних систем

Системи очищення повітря стрімко розвиваються у відповідь на глобальні виклики: зростання урбанізації, екологічну нестабільність, збільшення кількості алергічних і респіраторних захворювань, а також поширення інфекційних загроз, таких як COVID-19. Попит на ці системи охоплює побутові, медичні, освітні та комерційні сфери, а також надзвичайні ситуації.

На ринку домінують бренди Dyson, Philips, Xiaomi, IQAir, Honeywell, які пропонують широке різноманіття моделей — від компактних портативних пристроїв до великих стаціонарних комплексів із багатоступеневою фільтрацією. Більшість із них поєднують HEPA-фільтрацію, вугільне очищення, іонізацію, УФ-дезінфекцію та смарт-контроль.

Попри високий рівень технологічності, основна маса комерційних приладів має спільні недоліки — вони залежать від електромережі, потребують постійного техобслуговування, не адаптовані до надзвичайних умов та не можуть працювати автономно. Для використання в укриттях, польових умовах або під час затяжних відключень електроенергії більшість таких систем виявляються малоефективними.

В Україні попит на автономні фільтраційні системи суттєво зріс після 2022 року. Укриття, лікарні, тимчасові пункти перебування внутрішньо переміщених осіб, навчальні заклади — усі ці об'єкти потребують базового захисту від задимлення, хімічних домішок та пилу. Проте імпортна техніка часто дорога або технічно непридатна для таких сценаріїв, а національні виробники практично не представлені в цьому сегменті.

Таким чином, український ринок відкриває можливість створення власних адаптованих рішень — автономних, простих у реалізації, доступних за вартістю та орієнтованих на екстрене використання. Саме така модель і стала основою розробки концепції АСФП, викладеної у цій роботі.

## 3 РОЗРОБКА ІНДИВІДУАЛЬНОЇ ФІЛЬТРУВАЛЬНОЇ МАСКИ

### 3.1 Загальна архітектура портативної системи очищення повітря

У сучасних умовах зростаючих екологічних, військових і техногенних загроз в Україні особливої актуальності набуває створення ефективних засобів індивідуального захисту органів дихання. Одним із перспективних напрямів є розробка пристроїв, які можуть бути виготовлені автономно — без залежності від централізованих постачань або заводського виробництва. Це важливо у випадках перебування в укриттях, пунктах евакуації, польових умовах або за відсутності доступу до традиційних засобів захисту.

Метою проєкту є розробка багаторазової фільтрувальної маски, корпус якої може бути виготовлений методом FDM 3D-друку, з можливістю встановлення змінного фільтрувального елемента типу HEPA, а також додаткового вентиляційного модуля. Такий підхід дозволяє швидко масштабувати виробництво та адаптувати конструкцію під конкретні потреби. Основним об'єктом розробки є корпусна частина маски, яка забезпечує герметичне прилягання до обличчя користувача та сумісність зі стандартними елементами фільтрації.

Розроблена модель має посадкове місце під змінний фільтр розмірами 60 на 60 міліметрів та глибиною до 20 міліметрів. Передбачена можливість встановлення вентилятора розмірами 40 мм на 40 мм або 60 мм на 60 мм з живленням від зовнішнього джерела, наприклад, через USB або батареї. У конструкції також реалізовані отвори для кріплення за допомогою еластичних стрічок або текстильних ременів, що дозволяє зафіксувати маску на голові. В конструкцію може бути інтегрований зворотній або пасивний клапан видиху. Матеріалом виготовлення корпусу є термопластики PLA або PETG, які

придатні для побутового 3D-друку. Форма корпусу адаптована до анатомії обличчя для забезпечення герметичності та комфорту під час носіння.

Габарити готового виробу становлять приблизно 120 мм на 95 мм на 70 мм. Посадкова зона під фільтр відповідає стандарту 60мм на 60мм на 20 мм. Кріплення під вентилятор дозволяє встановлювати стандартні модулі. Вага корпусу без урахування фільтра становить близько 120 грамів. Як основний фільтрувальний елемент рекомендовано використовувати HEPA-фільтр класу H13 з додатковим шаром активованого вугілля.

Таблиця 2.2 - Технічні параметри маски

Параметр	Значення
Загальні габарити	120×95×70 мм
Посадкове місце під фільтр	60×60×20 мм
Кріплення під вентилятор	40×40 або 60×60 мм
Вага без фільтра	40×40 або 60×60 мм
Вага без фільтра	HEPA H13 + активоване вугілля

Друк маски здійснюється на стандартному FDM-принтері з використанням насадки діаметром 0,4 мм. Рекомендовані налаштування друку: температура екструдера від 200 до 220 градусів Цельсія, заповнення від 40 до 60 %, товщина шару — 0,2 мм. Загальний час друку однієї маски складає приблизно 4 години. Конструкція передбачає складання без використання клею або пайки — всі елементи з'єднуються за допомогою фіксаторів, заціпок або гвинтів.

Модель маски призначена для використання в умовах, де існує ризик потрапляння до дихальних шляхів шкідливих часток або газів. Наприклад, вона може використовуватись під час перебування у бомбосховищах під час пожеж, хімічних атак, у зоні задимлення, при високій концентрації пилу або в момент евакуації. Також вона може бути корисною для волонтерів, працівників комунальних служб, медичного персоналу та рятувальників.

Згідно з теоретичними розрахунками та специфікацією фільтрів класу Н13, маска показала здатність затримувати до 95 % частинок розміром менше ніж 0,3 мікрона за наявності встановленого НЕРА - фільтра та активного вентилятора. Це дозволяє використовувати її протягом тривалого часу без значного дискомфорту або утруднення дихання.



Рисунок 3.1 - Модель 3D маски

Практичне значення цієї розробки полягає в її відкритості, доступності та простоті повторення. STL-файл конструкції може бути розповсюджений у відкритому доступі для друку на доступних 3D-принтерах у будь-якій точці

країни. Це дозволяє швидко налагодити виготовлення таких масок навіть у польових умовах, без потреби в складному виробничому обладнанні.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що запропонована конструкція індивідуального фільтра є ефективним, ергономічним і доступним рішенням для захисту органів дихання у надзвичайних ситуаціях. Вона базується на сучасних технологіях 3D-друку та дає змогу адаптувати конструкцію під конкретні умови експлуатації. Такий підхід може бути корисним у системі цивільного захисту, для волонтерських ініціатив, навчальних закладів, медичних та військових підрозділів.

### 3.2 Технічна реалізація та електронна складова фільтру

У межах дипломної роботи було розроблено функціональну схему електронної частини автономного електрофільтра для аварійного очищення повітря. Основу складає мікроконтролер ESP32, що керує високовольтним модулем через MOSFET, використовуючи дані з сенсора забруднення повітря PMS5003.

Основні блоки:

- джерело живлення — акумулятор Li-Ion 18650 3.7 В;
- контролер — ESP32 DevKit (2×19 пінів);
- сенсор якості повітря — PMS5003 (UART);
- керувальний транзистор — IRF540N (MOSFET);
- баластний резистор — 470 кОм;
- HV-модуль — підвищувальний DC-DC перетворювач на 5–15 кВ;
- навантаження — електроди (коронуючий + осаджувальні);
- LED-індикація / OLED — виведення стану системи.

Таблиця 2.3 - Основних елементів:

Позначення	Назва елемента	Модель / тип	Функція
U1	Мікроконтролер	ESP32 DevKit	Прийом даних, логіка керування
S1	Сенсор якості повітря	PMS5003	Визначення забруднення повітря
Q1	MOSFET-транзистор	IRF540N	Ключ для HV-модуля
HV	Високовольтний модуль	DC-DC 5–15 кВ	Створення електростатичного поля
R1	Баластний резистор	470 кОм	Захист високовольтного каналу
D1	LED / OLED дисплей	WS2812	Візуальна індикація
BATT	Акумулятор	3.7 В, 2500 мА·год	Живлення системи

У запропонованій системі очищення повітря реалізовано керування високовольтним фільтраційним модулем за допомогою мікроконтролера ESP32. Основу електронної частини становить ключовий керувальний каскад на MOSFET-транзисторі IRF540N, який забезпечує комутацію живлення HV-блоку (високовольтного модуля), що формує електростатичне поле для осадження зважених у повітрі частинок.

Принцип роботи побудовано на наступній логіці: мікроконтролер, отримуючи вхідні сигнали з сенсора якості повітря (MQ-135 або PMS5003), аналізує рівень забруднення середовища. У разі перевищення встановленого порогового значення концентрації шкідливих речовин, ESP32 генерує логічний сигнал високого рівня на GPIO-вивід, який безпосередньо підключено до затвору MOSFET-транзистора. Це викликає відкриття каналу транзистора,

внаслідок чого HV-модуль отримує живлення від акумулятора (3,7 В) та починає формувати високу напругу — від 5 до 12 кіловольт.

На виході HV-модуля підключено коронуючий електрод, який створює електростатичне поле між собою та заземленими осаджувальними пластинами. У цьому полі зважені частинки отримують заряд і, під дією електричних сил, осідають на поверхні електродів. Таким чином досягається ефект очищення повітря без використання традиційного механічного фільтра, або у поєднанні з HEPA-фільтрацією.

Для забезпечення електробезпеки в ланцюг високої напруги включено баластний резистор R1 номіналом 470 кОм. Його призначення полягає у обмеженні струму в разі короткого замикання або пробією ізоляції. За рахунок високого опору навіть при напрузі 12 кВ струм не перевищує 25 мА, що відповідає вимогам до безпечного використання електростатичних фільтрів у побуті.

MOSFET IRF540N обрано з огляду на його високу надійність і здатність працювати у ключовому режимі з напругою до 100 В та струмом до 33 А. У цьому проекті він працює із значно меншим навантаженням (не більше 300 мА), що гарантує стабільність і тривалий термін служби. Залежно від потреб, замість простого логічного керування можна реалізувати широтно-імпульсну модуляцію (PWM), яка дозволяє поступово подавати напругу або регулювати частоту імпульсів, що забезпечує кращу ефективність та довговічність електричного кола.

Система побудована з урахуванням можливості автономної роботи. При нормальній якості повітря HV-модуль залишається вимкненим, а сам ESP32 перебуває у режимі енергозбереження (deep sleep), що значно подовжує час автономної роботи від акумулятора. Уся логіка комутації і контролю вбудована у програмне забезпечення мікроконтролера, а критичні параметри (рівень напруги, струму або перегрів) можуть бути додатково відстежувані за допомогою відповідних сенсорів або програмних лімітів. Таким чином, схемотехнічна структура пристрою забезпечує баланс між простотою реалізації,

безпекою, ефективністю очищення та низьким енергоспоживанням, що відповідає вимогам до сучасних мобільних систем аварійної фільтрації повітря.

Для забезпечення автономної роботи аварійної системи фільтрації повітря критичне значення має оптимізація енергоспоживання. У межах цього проєкту використано мікроконтролер ESP32, сенсор якості повітря PMS5003, OLED-дисплей та високовольтний модуль на основі DC-DC перетворювача. Усі ці компоненти живляться від акумулятора типу Li-Ion 18650 ємністю 2500 мА·год.

Оцінку енергоспоживання системи проведено на основі паспортних характеристик елементів, з урахуванням режиму максимального навантаження — тобто одночасної роботи усіх блоків.

Орієнтовні параметри компонентів у активному режимі:

- ESP32 3.3 В 80 мА 264 мВт;
- PMS5003 5.0 В 100 мА 500 мВт;
- HV-модуль 5.0 В 200 мА 1000 мВт;
- OLED-дисплей 3.3 В 25 мА 82.5 мВт;

Загальне споживання системи становить приблизно 405 мА при напрузі 3.7–5.0 В. Враховуючи внутрішні втрати на перетворення енергії та можливу варіацію струму в залежності від робочого навантаження HV-модуля, для розрахунку використаємо усереднене значення потужності системи — приблизно 1.8–2.0 Вт.

Акумулятор ємністю 2500 мА·год при напрузі 3.7 В має загальну енергетичну місткість:

$$E=3.7 \text{ В} \times 2.5 \text{ А} \cdot \text{год} = 9.25 \text{ Вт} \cdot \text{год}$$

$$T=P/E=9.25/1.85 \approx 5 \text{ годин}$$

Отже, у режимі максимального навантаження, коли всі компоненти працюють одночасно (включно з дисплеєм, HV-модулем та активною передачею даних), система здатна функціонувати приблизно 5 годин.

Проте в реальних умовах робота є циклічною: мікроконтролер переходить у режим deep sleep у разі нормального стану повітря, HV-модуль активується лише періодично, дисплей вимикається в режимі очікування. У

такому режимі середнє енергоспоживання зменшується майже вдвічі, що дозволяє розраховувати на автономну роботу до 8–10 годин, а в деяких випадках — і більше.

Додатково можливо підвищити енергоефективність за допомогою таких заходів:

- реалізація енергоощадної логіки (періодичне опитування сенсора замість постійного);
- використання OLED-дисплея з автоматичним затемненням;
- повне відключення HV-модуля через транзистор або реле у неактивному режимі;
- перехід ESP32 у режим глибокого сну між циклами (до 99 % економії енергії).

Одним із ключових елементів роботи електростатичної системи фільтрації є створення коронного розряду, який забезпечує іонізацію частинок у повітрі. Щоб реалізувати такий режим, необхідно створити електричне поле з напруженістю, достатньою для виникнення розряду між коронуючим електродом і заземленими осаджувальними пластинами. Типові значення напруги, за яких починається коронний розряд у повітрі при відстані 10–20 мм, становлять щонайменше 5–6 кВ.

У цьому проєкті використовується компактний високовольтний DC-DC перетворювач, який здатен підвищити вхідну напругу 3.7–5.0 В (від акумулятора) до 12–15 кВ. Такі модулі базуються на принципі роботи трансформатора з зворотним зв'язком, що дозволяє досягти високого коефіцієнта підсилення напруги при малих габаритах і відносно низькому струмі.

Для безпечної та стабільної роботи електророзрядної частини в ланцюг високої напруги необхідно включити баластний резистор. Його основна функція — обмеження струму, який протікає у разі короткого замикання або появи значного навантаження між електродами. Це особливо важливо в умовах,

коли навколишнє середовище змінюється (волога, пил, вібрації), і можливі паразитні провідні канали.

Для визначення номіналу резистора скористаємося законом Ома. Якщо бажаний струм у коронному каналі не повинен перевищувати 0.1 мА (тобто 100 мкА), а вихідна напруга HV-модуля становить 12 000 В, тоді опір розраховується як:

$$R=I/U=12000\text{В} / 0.1 \times 10^{-3} \text{ А} = 120000000 \text{ Ом} = 120 \text{ МОм}$$

Теоретично для забезпечення такого обмеження необхідно використовувати резистор номіналом 120 МОм. Проте в реальних умовах існує низка чинників, які впливають на розподіл напруги і струму: паразитна ємність, струм витоку, нестабільність модуля, змінний опір навантаження. Тому на практиці використовується баластний резистор номіналом від 470 кОм до 1 МОм. Такий опір забезпечує обмеження струму на рівні 10–30 мкА, чого достатньо для створення стійкого електростатичного поля та одночасно гарантує безпеку для користувача.

Важливо, щоб баластний резистор мав достатній клас напруги, був стійкий до перегріву та мав відповідний тепловий коефіцієнт. У промислових реалізаціях застосовують послідовне з'єднання кількох резисторів високої напруги або спеціальні провідникові резистори з керамічним корпусом.

Додатково слід зазначити, що розміщення елементів електророзрядної частини на друкованій платі вимагає дотримання мінімальної відстані між провідниками — не менше 4–6 мм для напруги понад 10 кВ, щоб уникнути пробоя або коронного розряду по поверхні плати. Також рекомендовано використовувати лакове покриття або силіконову ізоляцію у зоні високої напруги.

Таким чином, застосування баластного резистора в поєднанні з обмеженим високовольтним живленням та правильною компоновкою електродів дозволяє реалізувати ефективну і безпечну електростатичну фільтрацію у портативній системі очищення повітря. Такий підхід є критично

важливим для автономного використання в умовах укриттів, обмеженого простору або тимчасових евакуаційних пунктів.

Друкована плата є основним носієм електронної частини системи очищення повітря. Вона забезпечує з'єднання між компонентами, ізоляцію високовольтних та сигнальних ліній, а також оптимальну геометрію для компактної і безпечної збірки в корпусі, надрукованому на 3D-принтері.

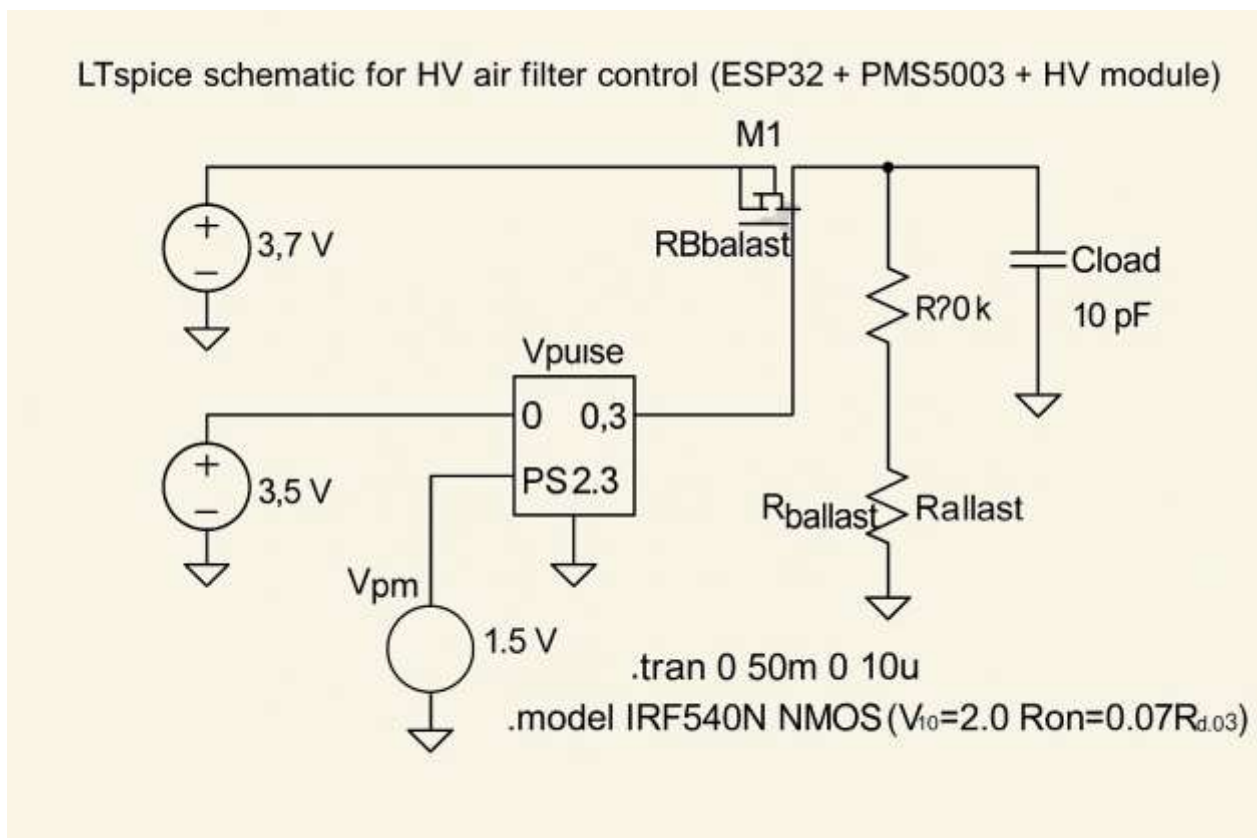


Рисунок 3.2 - Схема високовольтного фільтра

У цьому проєкті було прийнято рішення реалізувати односторонню плату, що дозволяє значно здешевити виготовлення і зробити її доступною для домашнього або лабораторного виробництва методом фоторезисту або термотрансферу. Компоненти розміщені переважно в SMD-виконанні, за винятком окремих роз'ємів і ESP32 DevKit, що монтується у вигляді модуля з штифтами.

Компонування плати базується на розділенні функціональних зон:

- низьковольтна частина (ESP32, сенсори, дисплей, роз'єми живлення);
- силова частина (HV-модуль, MOSFET, баластний резистор);

- електродна система (виведення HV\_out, роз'єм до фільтраційного модуля);

Особливу увагу приділено ізоляції високовольтної частини. Доріжка, що веде від HV-модуля до коронуючого електрода, має ширину не менше 0,6 мм, ізольована заливкою або лаком. Відстань між цією доріжкою та GND-провідниками становить 4–5 мм, що знижує ризик пробоя в умовах високої вологості чи забруднення поверхні.

Сигнальні доріжки розводяться під кутом 45°, щоб уникнути наведень і паразитної індуктивності. Всі згини виконані з радіусом не менше 0,5 мм. Заземлення (GND) і живлення (Vcc) винесені по краях плати, що спрощує підключення кабелів і програматорів.

ESP32 DevKit встановлюється у центральній частині, під нього підведені окремі доріжки UART, GPIO, та SPI/I2C для потенційного підключення OLED-дисплея або BLE-модуля. Сенсор PMS5003 підключається через окремий 4–5-контактний роз'єм JST або Dupont залежно від версії компонента.

На платі також зарезервовані місця для майбутнього розширення, зарядний модуль TP4056 (для прямого заряджання акумулятора), кнопка RESET або керування режимами та індикація LED стану живлення та роботи HV-модуля.

Таке компонування дозволяє не лише зібрати базову робочу модель, але й масштабувати розробку у напрямку багатофункціонального пристрою з моніторингом якості повітря, мобільним застосунком та збором статистики.

Для підтвердження працездатності запропонованої архітектури було виконано трасування в середовищі LTspice. Проведено симуляцію напруг та струмів у силовій частині, а також перевірено електричну ізоляцію між зонами. Створений GERBER-пакет готовий до виробництва або домашнього виготовлення за допомогою

## ВИСНОВКИ

У межах передатестаційної практики було розроблено технічну, практичну та теоретичну основу для створення автономної аварійної системи фільтрації повітря, яка має потенціал до широкого використання в умовах надзвичайних ситуацій. Робота охопила широкий спектр питань — від аналізу типів забруднень повітря і принципів фільтрації до побудови реального прототипу маски, придатної для 3D-друку.

Проведено аналіз основних класів забруднень (твердих, газоподібних, біологічних), які становлять загрозу здоров'ю людини в умовах обмеженого простору, поганої вентиляції або високої концентрації токсичних речовин. Досліджено ключові технології очищення — HEPA-фільтрацію, адсорбційні вугільні фільтри, фотокаталітичні модулі, електростатичні осаджувачі — та визначено доцільність їх поєднання в умовах кризи.

Особливу увагу приділено розробці індивідуального пристрою, який може бути виготовлений з використанням FDM 3D-друку з доступних матеріалів, з мінімальними витратами, без участі спеціалізованих підприємств. Було визначено оптимальні габарити, способи кріплення фільтра і вентилятора, особливості конструкції клапанів, ергономіки і герметизації. Запропонована концепція реалізована через інтеграцію HEPA-фільтра та електростатичної фільтрації, з використанням високовольтного модуля на базі коронного розряду. Для забезпечення функціональності та адаптивності системи розроблено електронну схему, у складі якої — мікроконтролер ESP32, MOSFET-керування, сенсори якості повітря PMS5003 або MQ-135, модуль індикації та живлення. Програмне забезпечення створене у середовищі Arduino IDE та реалізує алгоритм прийняття рішень на основі вхідних параметрів.

Було також здійснено трасування друкованої плати з урахуванням правил безпеки та електромагнітної сумісності.

На основі аналізу поточних рішень на ринку встановлено, що більшість комерційних очищувачів повітря не пристосовані до роботи в умовах відсутності електроенергії, потребують складного обслуговування, мають високу вартість і великі габарити. У той час як запропоноване рішення відповідає критеріям мобільності, автономності, доступності, можливості швидкого виготовлення та масштабування.

Результатом практики стала інтеграція теоретичних знань із реальними інженерними завданнями, спрямована на вирішення актуальної суспільної проблеми. Проєкт доводить, що навіть за умов обмеженого ресурсу можна створити ефективні системи захисту здоров'я, адаптовані до українських реалій, соціально-відповідальні та здатні функціонувати в умовах екстремального навантаження.

У подальшому ця робота може слугувати основою для стартапів у сфері екологічної безпеки, навчальних програм із технічної творчості, державних ініціатив із забезпечення населення засобами захисту, а також для практичної реалізації мобільних майстерень з виготовлення фільтрів під час надзвичайних подій.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3651.0-97. Позначення фізичних величин. — Київ: Держспоживстандарт України, 1997.
2. Фільтрація повітря в умовах надзвичайних ситуацій // Журнал «Безпека життєдіяльності». — 2022. — №4. — С. 14–18.
3. Ковальчук О.В. Arduino для початківців. — Київ: Видавництво Ліра-К, 2020. — 128 с.
4. Рибалко М.О. Датчики забруднення повітря: принцип дії та застосування // Електроніка і автоматика. — 2021. — №2. — С. 22–29.
5. Національна академія наук України. Моніторинг атмосферного повітря в умовах воєнного стану. — Київ: НАН України, 2023. — 68 с.
6. Постанова Кабінету Міністрів України № 827 від 14.08.2019 “Про затвердження Гігієнічних нормативів допустимих концентрацій забруднювачів у повітрі населених місць”.
7. Остапчук, І.І., Кучеренко С.М. Системи вентиляції та фільтрації в умовах надзвичайних ситуацій. — Харків: УПА, 2022. — 92 с.
8. ГОСТ EN 1822:2019. Високоєфективні повітряні фільтри (HEPA та ULPA). — [Офіційний переклад].