

**Олександр БОРИСОВ**, канд. техн. наук, проф.,

**Борис ЛУПИНА**, канд. техн. наук,

**Сергій ОСІНОВ**, канд. техн. наук,

**В'ячеслав ЩЕГЛАКОВ**, магістр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна,  
e-mail: b.lupina-me@iill.kpi.ua

## СЕНСОРНА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ ЧИСТИХ ЗОН І ШАФ БІОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

**Анотація.** В роботі запропоновано та реалізовано прототип сенсорної системи контролю поточного стану критичних вузлів забезпечення якості повітря локальних «чистих» зон за лінійною швидкістю повітря та диференціальним тиском на фільтруючих елементах. Довготривала безпечна робота обладнання, яке забезпечує належну якість повітря в чистій зоні, можлива за умови періодичного контролю або моніторингу поточного стану НЕРА фільтрів класу Н14 і реєстрації критичних відхилень швидкості повітряних потоків та пневматичних опорів фільтрів від номінальних значень шляхом реєстрації вихідних сигналів сенсорних вузлів, їх обробки та бездротової передачі даних користувачам за межі чистої зони для ведення динамічно поновлюваного технічного протоколу. В роботі запропоновано перспективну вимірювальну технологію на основі сукупності розподілених сенсорних вузлів, об'єднаних в мережу з бездротовим вихідним інтерфейсом і призначених для реєстрації і обробки даних про параметри повітряного середовища. Для контролю лінійної швидкості повітря в чистій зоні та диференціального тиску на фільтруючих елементах використано сенсори відповідно моделі EE576-V2A2K200 виробництва компанії E+E Elektronik з вимірювальним діапазоном 0...2,0 м/с та похибкою ( $\pm 0,08$  м/с + 4% від вимірюваного значення) та мікромеханічний сенсор диференціального тиску моделі D6F-PH MEMS виробництва компанії OMRON, які задовольняють сучасним вимогам до вимірювального діапазону та похибки. Функціональність та інформативність інтелектуального бездротового сенсорного вузла забезпечує тривалий моніторинг поточного стану вентиляторного фільтрувального блоку за лінійною швидкістю повітря в чистій зоні та за диференціальним тиском на фільтруючих елементах класу НЕРА Н14, що забезпечує визначення міри поточного забруднення фільтру за його пневматичним опором. Система контролю може бути використаною також для проведення регламентних робіт на функціонуючому обладнанні, уникнення аварійних ситуацій та прогнозування термінів чергової заміни НЕРА фільтрів.

**Ключові слова:** НЕРА фільтр очистки повітря чистих зон, сенсор лінійної швидкості повітря, сенсор диференціального тиску, бездротова сенсорна мережа, мікроконтролер з вбудованим бездротовим інтерфейсом, шафа біологічної безпеки, показники якості повітря.

### Актуальність дослідження

Розвиток медичних закладів, лабораторій, фармацевтичного виробництва, мікробіологічних досліджень, високотехнологічних галузей електронної промисловості в світі загалом та в Україні зокрема потребує створення виробничих приміщень та локальних лабораторних зон із забезпеченням низької контрольованої концентрації механічних часток в робочому об'ємі. Значні матеріальні ресурси держави спрямовані на забезпечення безпечних умов праці персоналу при проведенні досліджень з біологічно небезпечним матеріалом, покращення достовірності лабораторних досліджень і ефективності виробничих процесів. Сучасні мікроелектронні сенсорні вузли і бездротові мережеві рішення є ефективним інструментом моніторингу, тому активно застосовуються в критично важливих ланках пневматичних систем забезпечення якості повітря локальних чистих зон при реалізації належних лабораторних чи виробничих умов. У лабораторних приміщеннях дослідницьких центрів, лікарень та фармацевтичних підприємств для роботи персоналу з потенційно небезпечними агентами традиційно використовують шафи біологічної безпеки (ШББ) 2-го класу, які мають в своєму складі локальні системи фільтрування повітря і забезпечують потрійний захист: оператора та навколишнього середовища від біологічно небезпечного матеріалу, а також матеріалу від перехресної контамінації, що є ключовим заходом комплексної безпеки і достовірності досліджень.

**Мета роботи** – визначення переліку технічних параметрів, що підлягають вимірюванню, обґрунтований вибір компонентної бази системи збору даних на основі сучасних мікроелектронних

сенсорних вузлів з використанням бездротових сенсорних мереж, розробка прототипу пристрою моніторингу параметрів системи фільтрування повітря чистих зон та забезпечення передачі даних моніторингу за хмарною технологією.

### Основні матеріали досліджень

Аналіз літературних джерел дозволяє визначити перелік факторів забруднення, конструкції критично важливих вузлів та інженерних принципів очищення повітря чистих зон. Основним інструментом очистки повітря від механічних часток в діапазоні їх розмірів від 0,3 мкм і вище є HEPA фільтр, через який примусово прокачується повітря перед подачею в чисту зону з типовою лінійною швидкістю очищеного повітря на виході порядку 0,5 м/с. Мірою поточного забруднення фільтруючих елементів є перепад тиску повітря на фільтрі на заданому рівні об'ємних витрат (пневматичний опір фільтра,  $[(\text{Па}\cdot\text{сек})/\text{м}^3]$ ), кількість механічних часток в одиниці об'єму чистої зони, температура, барометричний тиск і вологість повітря чистої зони. Існують межі продуктивності для шаф, коли швидкості вхідного і вихідного потоків регулюють до рівня, що забезпечує ефективний потрібний захист. У випадку коли швидкість повітря відхиляється від номінального значення більше 10%, захист порушується, а динамічні завади (включаючи виробничі рухи персоналу си допоміжного обладнання в чистій зоні) спроможні додатково в середньому на 60% збільшити мікробіологічний викид з ШББ [3]. Важливим під час випробувань є акцент на нижній діапазон значення швидкості повітряного потоку та просторове розподілення швидкості в площині робочого столу і об'ємі чистої зони ШББ, яку умовно розподіляють на контрольовані сегменти. Дана вимога суттєво збільшує кількість контрольних вимірів, що має бути враховано під час автоматизації процесу валідації.

У відповідності до настанов стандарту і детальній класифікації ШББ [1, 2], в ШББ 2 класу організовано частково закриту вентиляційну схему (близько 70% від загального об'єму повітря ШББ циркулює всередині його корпусу) з поточним 30% повітрообміном з приміщенням лабораторії. Неправильне розміщення ШББ в приміщенні по відношенню до зовнішніх чинників (отворів приточно-витяжної вентиляції, дверей, маршрутів переміщення персоналу) та активність працюючого оператора з відхиленням від рекомендацій виробника обладнання може негативно впливати на захисні функції ШББ. Підвищена турбулентність повітря в робочій зоні або в приміщенні лабораторії може порушити основні спрямовані потоки повітря в робочій зоні шафи та на її вході, де створюється захисний бар'єр між потенційно небезпечним біологічним матеріалом в робочій зоні ШББ і працюючим оператором. За тенденції загального прагнення до підвищення енергоефективності, зменшення шуму та вібрацій, виробники обладнання застосовують зменшення швидкості повітряного потоку, наближаючись до дозволених стандартом [2] безпечних меж експлуатації. Це породжує проблемну ситуацію, вирішення якої потребує комплексного підходу з використанням додаткових сенсорних каналів моніторингу повітряних потоків на нижній межі вимірювального діапазону сучасних первинних перетворювачів з наступним визначенням поточних характеристик фільтрувальних елементів шаф (HEPA фільтрів), утворення бази даних фільтрувальних вузлів для своєчасного технічного обслуговування та прогнозування термінів заміни фільтрів у обладнанні та наступної валідації на відповідність європейському стандарту EN 12469:2000 чи його чинного аналогу на території США [2, 3].

Класифікація ШББ виконується за класами (рис. 1), що відповідають рівню необхідного біологічного захисту оператора, навколишнього середовища і матеріалу. ШББ 2-го класу, переважно орієнтовані на захист оператора, що є основним їх призначенням.



Рис. 1. Шафи біологічної безпеки [1]

Небажаними складовими повітря виробничих приміщень електронної чи фармацевтичної галузей, лабораторної діагностики, медицини можуть бути як неприпустимі електронною технологією механічні частки, так і інші об'єкти в тому ж діапазоні характерних розмірів, що несуть біологічну та хімічну небезпеку (бактерії, віруси в завищених концентраціях, дрібнодисперсні лікарські засоби чи виробничі складові речовин біотехнологій). Для уникнення шкідливого впливу таких домішкових складових повітря виробничих зон на організм операторів, досліджуваний матеріал та продукцію, а також для запобігання перехресної контамінації продуктів, що підлягають використанню в лабораторній практиці, реалізують локальні чисті зони чи робочі місця.

Характерним прикладом локальної чистої зони є шафа біологічної безпеки 2-го класу (ШББ), що одночасно забезпечує ефективний «потрійний» захист:

- захист людини-оператора, яка за технологічним процесом змушена проводити маніпуляції власними руками з біологічно небезпечним продуктом, від цього продукту; яскравим прикладом є робота лаборанта-мікробіолога в медичних протитуберкульозних закладах, коли оператору щоденно потрібно мати справу з гарантовано небезпечними мокротами пацієнтів клініки;
- захист матеріалу від перехресної контамінації іншим небажаним продуктом;
- захист навколишнього середовища (в першу чергу – приміщення лабораторії чи цеху) від летких сполук небезпечного продукту.

Занепокоєння, пов'язане з впливом твердих частинок на здоров'я, разом із зростаючими вимогами людства щодо більш активного, своєчасного та розсосередженого моніторингу якості повітря, призвели до підвищення наукового та промислового інтересу до розробки недорогих сенсорів твердих частинок (low-cost particulate matter sensors – LCPMS). Зараз ми знаходимо в наукових розробках та бачимо на ринку в комерційному доступі значну кількість моделей LCPMS.

Основним активним компонентом системи кондиціонування повітря є фільтрувальний блок вентиляторів (Filter Fan Unit, FFU) з фільтрами належного рівня (класу) очищення. Використовується спрямоване примусове прокачування повітря через фільтр перед подачею в «чисту» робочу зону (в окремих випадках – рециркуляцію, як в ШББ класу 2). Високоєфективний фільтр механічної очистки повітря чистих зон (High Efficiency Particulate Air – HEPA – Filter) класу H14 – тип гофрованого механічного повітряного фільтра, який повинен затримати на вхідній поверхні і в об'ємі принаймні 99,995% об'єктів (механічних часток, бактерій) розміром від 0,3 мікрона (мкм) і вище, які переносяться повітрям на його вхідна поверхню. Характерний діаметр об'єкта в 0,3 мікрона специфікація відносить до випадку найвищої проникної здатності (maximum penetrating particle size, MPPS). Більші за розміром об'єкти затримуються HEPA фільтром з вищою ефективністю.

Системи очищення повітря потребують моніторингу поточного стану або періодичного контролю (зазвичай щорічного), за результатами якого приймається інженерне рішення стосовно необхідності заміни фільтрів для збереження належних параметрів чистої зони. Мінімальні звітні значення ефективності затримки часток повідомляють про здатність фільтра вловлювати більші частинки розміром від 0,3 до 10 мікрон (мкм).

Для синтезу інтелектуального вузла сенсорної мережі моніторингу швидкісних потоків повітря авторами запропоновано технічне рішення, у якому сенсорну частину реалізовано на основі сенсора лінійної швидкості повітря моделі EE576-V2A2K200 з вимірювальним діапазоном 0...2,0 м/с та похибкою ( $\pm 0,08$  м/с + 4% від виміряного значення) та мікромеханічного сенсора диференціального тиску моделі D6F-PH MEMS. Задачу цифрової обробки і мережевого виконання реалізовано на основі мікроконтролера ESP32. Вихідні інтерфейси сенсорних каналів вимірювання лінійної швидкості на основі EE576 - аналогова напруга, тому використано 12 – розрядний аналого-цифровий перетворювач ESP32. Система багатоканальна, для одночасного вводу та виводу також цифрового сигналу. В складі мікроконтролера ESP32 реалізовано бездротовий інтерфейс за технологією WiFi, можливості котрого дозволяють передавати потрібну інформацію в реальному часі (мінімальна періодичність оновлення вихідного сигналу 2...3 секунди). Загальний вигляд сенсорного вузла, розміщеного в робочій зоні ШББ, наведено на рис. 2.

Експериментальну перевірку функціонування спроектованої системи для контролю параметрів повітря чистої зони виконано в робочому об'ємі шафи біологічної безпеки 2-го класу моделі TELSTAR BIO II Advance Plus 4. Сенсори лінійної швидкості розміщено горизонтально на кронштейні штативу лабораторного з можливістю просторової локалізації первинного перетворювача в робочій зоні відповідно до вимог стандарту EN 12469:2000. Результати отримано з вимірювальних каналів двох сенсорів повітряного потоку моделі EE576, розміщених в заданих просторових точках, і

сенсорів диференціального тиску. Часові параметри вимірювального процесу програмуються попередньо з можливістю усереднення результатів вимірювання, наступного обчислення відхилення кожного поточного значення від середнього для визначення відповідності критерію прийнятності, вказаному в стандарті EN 12469 2000, і внесення результатів в енергонезалежну пам'ять. В реалізованій частині роботи система живиться від джерела напруги постійного струму, підключеного до розетки в робочій зоні ШББ; в перспективі передбачається автономне живлення на основі акумуляторної батареї. Функціональність контролера ESP32 дозволяє збільшення кількості вимірювальних каналів; планується додатково включити в склад сенсорного вузла лічильник частот моделі PMS1003, сенсор температури, вологості та абсолютного тиску моделі BOSCH BME 280.

Обмін інформацією реалізовано через вихідний бездротовий інтерфейс Wi-Fi контролера ESP32. Екранна форма для виведення результатів вимірювання на веб-сторінку має вигляд наведений на рис. 3.



**Рис. 2.** Система контролю системи забезпечення якості повітря, розміщена в робочій зоні шафи біологічної безпеки 2-го класу моделі TELSTAR BIO II Advance Plus 4

EE576(x3)+BME280+PM2.5 PMS1003	
MEASUREMENT	VALUE
Linear velocity(N1)	0.00 mm/s
Linear velocity(N2)	0.00 mm/s
Linear velocity(N3)	0.00 mm/s
Temp. Celsius	24.12 °C
Pressure	101731.38 Pa
Humidity	44.70 %
PM 1.0	25 ug/m3
PM 2.5	37 ug/m3
PM 10	39 ug/m3

Performed as a part of  
Viacheslav SHCHEHLAKOV  
magister's thesis

Medical sensors laboratory  
Electronics Department of Igor  
Sikorsky Kyiv Polytechnical  
Institute Kyiv 2022

**Рис. 3.** Веб-сторінка з виведеними вимірними показниками

Проведені тестування розробленого прототипу сенсорної системи в ШББ виконано використанням метрологічно атестованого вимірювального обладнання: за лінійною швидкістю повітряних потоків – це термоанемометри КІМО моделі VT-100, VT-200; вимірювач швидкості газових потоків моделі ІС-2 виробництва компанії ПРОБА, Україна; за диференціальним тиском – диференціальним манометром моделі Testo 510i з бездротовим інтерфейсом; за електричними режимами та температурою – багатофункціональний прилад KEITHLEY 2701 ETHERNET MULTIMETER/DATA ACQUISITION SYSTEM, оснащений прецизійним платиновим терморезисторним перетворювачем Pt-100. Оцінка концентрації часток попередньо виконані за межами чистої зони в звичайних умовно «брудних» лабораторних умовах, Зазначимо, що стандартом [2] передбачено реалізацію штучно завищених концентрацій часток з використанням відповідних аерозолів і генераторів, так щоб в чисельному значенні результату отримано зручну для аналізу і порівняння лічильну концентрацію часток у всьому діапазоні розмірів від 0,3 мкм до 10 мкм.

Експериментальні дослідження спроектованого і реалізованого прототипу підтверджують можливість реєстрації вимірювальних даних за критично важливими параметрами з допустимою стандартом EN 12469 :2000 похибкою вимірювань. Функціональність сенсорного вузла бездротової мережі може бути розширеною використаною для діагностики обладнання за комплексом показників регламентованих вказаним стандартом.

### Висновки

В роботі визначено основні функції інтелектуального вузла бездротової сенсорної мережі системи забезпечення якості повітря чистих зон, запропонована схема розміщення первинних перетворювачів в чистій зоні ШББ для коректного визначення швидкості повітряного потоку. Функціональність та інформативність реалізованого вузла бездротової сенсорної мережі забезпечує уникнення небезпечних ситуацій, пов'язаних з відхиленням швидкості потоку від номінального значення та ростом пневматичного опору НЕРА фільтра. Вимірювальна система дозволяє

встановлювати кількісні показники швидкості повітряних потоків, діагностувати та підтримувати систему фільтрації повітря в зоні безпеки. Апробація системи виконана з використанням каналів бездротового зв'язку у частотному діапазоні WiFi 2,5 ГГц, для поширення даних за хмарною технологією. Розроблена в даній роботі сенсорна система моніторингу наочно демонструє можливість створення конструктивно та функціонально подібного пристрою для практичних потреб, а саме для періодичного сервісного обслуговування шаф біологічної безпеки другого класу з можливістю діагностики поточного стану їх HEPA фільтрів. Розроблена система дозволить проводити комплексні багатопараметричні вимірювання, коли необхідно одночасно реєструвати низку фізичних параметрів, враховувати їх поточні значення, динаміку змін і взаємний вплив. Можливість бездротової передачі даних в «хмару» та на комп'ютер оператора дозволить віддалено отримати результати і створити на їх основі динамічно поповнювану таблицю в реальному часі вимірювань. Таким чином, користувач обладнання чи інженер зможуть дистанційно протоколювати та аналізувати результати вимірювань, які проводились упродовж тривалого періоду часу без присутності людини в чистій зоні.

### Література

1. Шафи біологічної безпеки. Визначення, класи (I, II, III) і типи. – Biosafety Cabinets- Definition, Classes (I, II, III) and Types (<https://microbenotes.com/biosafety-cabinets>).
2. EN 12469:2000. Biotechnology-Performance criteria for microbiological safety cabinets. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/c4e385bc-cfc4-4a82-9fea-7f0428ce4556/en-12469-2000>.
3. Thomas Hinrichs, Sven Gragert, and Michael Klein. Biological Safety Cabinets: Simulation and Quantifying of Airflow Perturbation Caused by Personnel Activities. – Applied Biosafety 2016 21:1, 12-18. <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1177/1535676016635369>.
4. EE576 Мініатюрний сенсор для вимірювання низької швидкості повітря <https://www.epluse.com.ua/products/air-velocity/transmitters-for-air-velocity/item/ee576.html>.
5. [https://www.epluse.com.ua/pdf/Air-Velocity/EE576/datasheet\\_EE576.pdf](https://www.epluse.com.ua/pdf/Air-Velocity/EE576/datasheet_EE576.pdf).
6. OMRON D6F-PH. MEMS Differential pressure Sensor. Datasheet. Режим доступу URL: [https://omronfs.omron.com/en\\_US/ecb/products/pdf/en-D6F-PH\\_users\\_manual.pdf](https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-D6F-PH_users_manual.pdf) (дата звернення: [4.12.2023]).