

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського  
Навчально-науковий інститут муніципального управління  
та міського господарства  
Кафедра інженерних систем та технологій

На правах рукопису

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

## ТЕМА РОБОТИ

### «СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ОПАЛЕННЯМ, ОСВІТЛЕННЯМ ТА ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ВИРОБНИЧОГО ПРИМІЩЕННЯ»

Здобувача вищої освіти  
Горобця Андрія Михайловича  
Освітня програма  
«Автоматизоване управління  
технологічними процесами»  
(Спеціальність 174 «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології  
та робототехніка»)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Науковий керівник:  
к.т.н., доцент, Дроменко В.Б.

\_\_\_\_\_

(підпис)

Національна шкала \_\_\_\_\_  
Кількість балів \_\_\_\_\_  
Оцінка: ECTS \_\_\_\_\_

Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського  
Навчально-науковий інститут муніципального управління  
та міського господарства  
Кафедра інженерних систем та технологій  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Наталія ОМЕЦІНСЬКА  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 року

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Горобцю Андрію Михайловичу

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Система автоматичного керування опаленням, освітленням та вентиляцією виробничого приміщення.  
керівник роботи: к.т.н., доцент, Дроменко В.Б.  
затверджені Наказом ТНУ імені В.І Вернадського:  
від « 2 » жовтня 2025 р. № 116
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи: 5 грудня 2025р
3. Вихідні дані до роботи: Виробничий цех з виготовлення безпілотних літальних апаратів, у якому виконуються операції різання та шліфування карбонового волокна, пайки та складання електронних компонентів. Необхідно забезпечення нормативних параметрів мікроклімату, безпечних умов праці та стабільної якості технологічних процесів.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: Вступ. Технологічний розділ. Дослідницько-аналітичний розділ. Проектно-рекомендаційний розділ. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Загальні висновки по роботі. Список використаних джерел.
5. Перелік графічного матеріалу: графічний матеріал виконаний у вигляді мультимедійної презентації.

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		
Розділ 2	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		
Розділ 3	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		
Розділ 4	к.т.н., доцент, <u>Дроменко В.Б.</u>		

7. Дата видачі завдання 3 жовтня 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Заключний документ етапу	
1	Вибір теми магістерської роботи, призначення керівника	до 08.09.2025	Затвердження переліку тем магістерських робіт та наукових керівників	
2	Пошук і відбір літератури по темі роботи, складання плану магістерської роботи	до 15.09.2025	Список літературних (інформаційних) джерел, план роботи	
3	Визначення об'єкта, предмета, мети, завдань та методів дослідження, написання вступу до теми магістерського дослідження	до 22.09.2025	Текст вступу	
4	Написання тексту магістерської роботи відповідно до її структури:		Текст розділів	
	4.1	I розділ		23.09.2025 – 05.10.2025
	4.2	II розділ		06.10.2025 – 20.10.2025
	4.3	III розділ		21.10.2025 – 03.11.2025
	4.4	IV розділ	04.11.2025 – 10.11.2025	
5	Підготовка графічних матеріалів чи іншого унаочнення	11.11.2025 – 14.11.2025	Роздатковий матеріал, презентація	
6	Оформлення кінцевого списку використаних джерел та додатків	15.11.2025 – 21.11.2025	Список літературних джерел	
7	Оформлення та попередній захист магістерської роботи	24.11.2025 – 28.11.2025	Магістерська робота, рішення кафедри про допуск до захисту	
8	Внесення коректив та кінцеве редагування магістерської роботи	01.12.2025 – 05.12.2025	Магістерська робота	
9	Реєстрація магістерських робіт на кафедрі	до 05.12.2025	Магістерська робота внесена до журналу реєстрації випускових робіт	
10	Захист магістерської роботи	15.12.2025 – 26.12.2025	Рішення Екзаменаційної комісії про захист	

## АНОТАЦІЯ

**Горобець А. М. Система автоматичного керування опаленням, освітленням та вентиляцією виробничого приміщення– Рукопис.**

Кваліфікаційна магістерська робота за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». – Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського, Київ, 2025 рік.

Проект автоматизованої системи вентиляції та освітлення виробничого цеху з виготовлення дронів спрямований на створення високотехнологічного та безпечного середовища, що враховує специфіку роботи з карбоновими композитами, електронними компонентами та паяльним обладнанням. Основною метою проекту є забезпечення стабільного мікроклімату, ефективного видалення шкідливих аерозолів і пилу, а також формування оптимальних умов зорової роботи, що підвищують продуктивність персоналу та мінімізують професійні ризики.

Ключовим елементом проекту є впровадження інтегрованої системи керування, яка об'єднує багаторівневу вентиляцію, адаптивне освітлення та модулі автоматичного аналізу стану повітря. Система використовує комплекс датчиків, що регулюють інтенсивність повітрообміну залежно від типу технологічних процесів — різання карбонового волокна, пайки чи складання електроніки. Особлива увага приділяється впровадженню інтелектуального освітлення, здатного корегувати напрямок і яскравість світла відповідно до положення працівника, що покращує точність виконання операцій і знижує напруження зору.

Ключові слова: вентиляція, адаптивне освітлення, карбонове волокно, пайка, датчик, контролер, автоматизована система, мікроклімат, очищення повітря.

## **ABSTRACT**

### **Gorobets A. M. Automatic control system for heating, lighting, and ventilation of industrial premises – Manuscript.**

Qualifying master's thesis on specialty 174 " Automation, computer-integrated technologies and robotics". – V.I. Vernadskyi Taurida National University, Kyiv, 2025.

The project of an automated ventilation and lighting system for a drone manufacturing workshop aims to create a high-technology and safe working environment that accounts for the specific requirements of handling carbon composites, electronic components, and soldering equipment. The primary objective of the project is to ensure a stable microclimate, efficient removal of harmful aerosols and dust, and optimal visual working conditions that enhance employee productivity while minimizing occupational risks.

A key element of the project is the implementation of an integrated control system that combines multi-level ventilation, adaptive lighting, and automatic air-quality monitoring modules. The system uses a network of sensors that regulate the intensity of air exchange depending on the type of technological operation — carbon-fiber cutting, soldering, or electronics assembly. Special attention is given to the introduction of intelligent lighting capable of adjusting direction and brightness in accordance with the worker's position, improving operational precision and reducing visual strain.

Keywords: ventilation, adaptive lighting, carbon fiber, soldering, sensors, controller, automated system, microclimate, air purification.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	9
1.1 Характеристика виробничого цеху для виготовлення БПЛА.....	9
1.2 Обґрунтування необхідності автоматизації мікроклімату у виробничому цеху з виготовлення дронів. ....	21
1.3 Параметри мікроклімату виробничого приміщення. ....	25
1.4 Висновки до розділу 1.....	29
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	31
2.1 Система пошарової вентиляції. ....	31
2.2 Типи датчиків і модулів автоматизації для контролю мікроклімату та роботи пошарової вентиляції у виробничому цеху з виготовлення дронів .....	41
2.3 Алгоритм роботи автоматизованої системи мікроклімату та пошарової вентиляції у виробничому цеху з виготовлення дронів. ....	47
2.4 Вплив типів штучного освітлення на організм людини: фізіологічні, біологічні та психоемоційні аспекти.....	50
2.5 Висновки до розділу 2.....	53
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ .....	56
3.1 Автоматизація системи освітлення у виробничому цеху з виготовлення дронів: принципи, алгоритми та технологічні рішення. ....	56
3.2 Інтегрована система автоматизованого керування мікрокліматом і освітленням на базі промислових контролерів.....	64
3.3 Індивідуалізована система адаптивного освітлення. ....	73
3.4 Висновки до розділу 3.....	95
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....	97
4.1 Техніка безпеки та охорона праці при паянні.....	97
4.2 Техніка безпеки при роботі з електронними компонентами та нагрівальними платформами. ....	101
4.3 Техніка безпеки при роботі з карбоновим волокном. ....	104
4.4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.....	108
4.5 Висновки до розділу 4.....	111
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ .....	114
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	116

## ВСТУП

Автоматизація виробничих процесів у високотехнологічних галузях стає одним із ключових напрямів розвитку сучасної промисловості. У контексті зростання обсягів виробництва безпілотних літальних апаратів, підвищення вимог до якості електронних компонентів та посилення стандартів безпеки особливої актуальності набуває створення інтелектуальних систем керування вентиляцією та освітленням у виробничих приміщеннях. Цехи, у яких здійснюється різання та шліфування карбонового волокна, пайка та складання електронних модулів, потребують суворої регуляції мікроклімату, якісного очищення повітря та стабільних умов зорової роботи. У таких умовах питання автоматизації стає не лише інженерним завданням, а й важливим фактором забезпечення технологічної надійності та захисту здоров'я персоналу.

Особливість виробництва дронів полягає у одночасному поєднанні кількох небезпечних факторів: утворення дрібнодисперсного карбонового пилу, виділення аерозолів флюсів та припоїв, високоточних операцій з мікроелектронікою та використання джерел локального нагріву. Усі ці процеси потребують стабільної роботи вентиляційних систем та якісного освітлення, яке забезпечує точність виконання дрібних технологічних операцій. Адаптивні системи керування дозволяють не лише автоматично регулювати повітряні потоки відповідно до технологічного навантаження, а й створювати оптимальні зорові умови через модульоване освітлення робочих зон. Це, у свою чергу, сприяє зниженню втоми, підвищенню продуктивності та зменшенню ризику технічних помилок під час складання високоточних компонентів.

Ключовим елементом проекту є впровадження централізованої системи керування, яка координує роботу вентиляції, адаптивного освітлення та датчиків контролю мікроклімату. Система аналізує концентрацію пилу й газів, температуру, вологість та активність працівників на робочому місці, забезпечуючи синхронну роботу всіх підсистем у реальному часі. Такий підхід дозволяє створити стабільне, безпечне та ергономічно оптимізоване виробниче середовище, здатне адаптуватися до змін умов роботи та навантаження на

технологічні лінії. Особливу увагу в проєкті приділено мінімізації впливу шкідливих домішок та підтриманню високої якості повітря, що має вирішальне значення для здоров'я працівників і тривалої експлуатації електронного обладнання.

Наукова цінність роботи полягає у створенні комплексного підходу до організації виробничого середовища, який поєднує автоматизовані системи вентиляції, адаптивного освітлення та інтелектуальні технології моніторингу стану повітря. Така інтеграція забезпечує ефективне управління потоками повітря, точне регулювання світлових параметрів та зменшення впливу небезпечних факторів на організм людини. Використання сучасних сенсорів, контролерів та енергоефективних технологій підвищує стабільність мікроклімату та сприяє створенню оптимальних умов праці у високотехнологічному виробництві.

Реалізація цього проєкту потребує ретельного технічного планування, високого рівня інженерної компетентності та комплексного аналізу технологічних процесів. Проте очікуваний результат полягає у створенні виробничого простору, що відповідає сучасним стандартам безпеки та ергономіки, забезпечує якість виготовлення дронів та сприяє підвищенню продуктивності працівників.

**Об'єкт дослідження:** технологічні рішення для створення безпечного мікроклімату та оптимального освітлення у виробничому цеху.

**Предмет дослідження:** інтегрована автоматизована система керування вентиляцією та освітленням у процесах виготовлення дронів.

**Методи дослідження:** аналіз технічної документації, моделювання роботи вентиляційних та освітлювальних підсистем, оцінка параметрів мікроклімату, експериментальна перевірка ефективності автоматизації.

**Практична цінність:** впровадження системи дозволяє значно підвищити безпеку праці, зменшити вплив шкідливих факторів виробництва, покращити умови роботи персоналу та підвищити якість фінального продукту.

**Елемент наукової новизни:** запропоновано комплексний підхід до створення адаптивного виробничого середовища, який поєднує автоматизоване керування вентиляцією, інтелектуальне освітлення та системи моніторингу, що забезпечує високоточну регуляцію техногенних умов у цехах з виготовлення дронів.

## РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 1.1 Характеристика виробничого цеху для виготовлення БПЛА.

Виробничий цех, у якому здійснюється повний технологічний цикл виготовлення безпілотних літальних апаратів, належить до категорії спеціалізованих приміщень із підвищеними вимогами до мікроклімату, чистоти повітря, рівня освітленості та стабільності технологічних умов. Його робота передбачає постійну присутність персоналу, виконання операцій із використанням високоточних електронних компонентів, обробку композитних матеріалів, а також проведення робіт, що супроводжуються виділенням пилу, диму, летких органічних речовин і теплових надлишків. Тому приміщення характеризується складною структурою навантажень, різнорідними джерелами забруднень та потребою в узгодженій системі вентиляції, аспірації та інтелектуального керування робочими параметрами.

Загальна площа виробничого цеху визначається необхідністю розміщення кількох функціональних зон, які мають різну специфіку впливу на мікроклімат. До основних зон належать ділянки розкрою та шліфування карбонового волокна, монтажньо-паяльні робочі місця, зони складання вузлів безпілотників, ділянки калібрування та кінцевого тестування, а також допоміжні технологічні зони для контролю якості, зберігання матеріалів та тимчасового накопичення відходів. Площа, висота приміщення та конфігурація зонування формують необхідність у диференційованому підході до організації повітрообміну, оскільки кожна технологічна операція створює власний спектр забруднень та тепловиділень [15].

Найбільш забруднювальною є зона обробки карбонових матеріалів. Розкроювання, шліфування та полірування вуглепластика супроводжується утворенням високодисперсного пилу, що становить небезпеку як для персоналу, так і для чутливої електроніки. Частинки карбону мають малу вагу, високу абразивність та здатність довго зависати у повітрі. Тому ця зона відноситься до ділянок підвищеної пилогенерації з необхідністю організації

локальної аспірації, підвищеного рівня кратності вентиляції та використання фільтраційних систем тонкого очищення. Особливістю є те, що подібні частинки можуть накопичуватися на поверхнях контактних груп, паяльного обладнання та плат, створюючи ризики прихованих дефектів та коротких замикань, а також погіршення адгезії при подальшому нанесенні смол чи лаків.

Іншу групу факторів створює зона паяння, перепаявання та ремонту друкованих плат. Під час нагрівання припою та флюсів виділяються леткі органічні сполуки, пари каніфолі, дрібнодисперсний дим та продукти термічного розкладу. Ці забруднення мають різко виражений запах, здатність подразнювати слизові оболонки та поступово накопичуватися у повітрі приміщення, якщо вентиляція не забезпечує достатнього локального відсмоктування. Зона паяння характеризується точковими, але інтенсивними джерелами тепла, тому освітлювальні та вентиляційні системи мають враховувати нерівномірність теплового поля та необхідність автоматичного коригування режимів.

Монтажно-складальна зона створює менш агресивні забруднення, проте потребує стабільного температурного режиму та особливої чистоти повітря, оскільки в цій частині цеху проводиться встановлення сенсорів, камер, гіроскопів, GPS-модулів та інших елементів, вразливих до пилу та статичної електрики. Повітря має бути очищеним, із зниженою кількістю зважених частинок і стабільною температурою, яка не викликає зміни характеристик матеріалів під час складання. Освітлення у цій зоні повинне забезпечувати високу рівномірність та відсутність мерехтіння, оскільки робота з дрібними компонентами вимагає високої точності та мінімального зорового навантаження [4].

Зона тестування готових виробів, навпаки, потребує гнучкого мікроклімату. Тут проводяться перевірка роботи двигунів, контролерів, стабілізуючих систем та аеродинамічних елементів, що створює нерівномірні теплові потоки, короточасні аеродинамічні збурення та потребу у швидкому відведенні тепла. Тестові стенди можуть бути джерелами локального шуму та

вібрацій, тому системи вентиляції повинні працювати без створення додаткових коливань і не впливати на точність вимірювань.

Матеріально-технологічний простір цеху включає також місця зберігання смол, епоксидних компонентів, розчинників та хімічних матеріалів, що застосовуються при виготовленні композитних елементів. Ці речовини можуть виділяти пари, чутливі до температурних коливань, тому приміщення потребує окремих вентиляційних зон або шаф із контрольованим відсмоктуванням.

Загальна характеристика цеху показує, що він є складною інженерною системою, де наявні одночасно пилові, хімічні, теплові, вологісні та світлотехнічні навантаження, які взаємодіють між собою. Будь-які коливання мікроклімату впливають не лише на комфорт персоналу, а й безпосередньо на якість продукції, адже безпілотники потребують точності збірки й високих параметрів надійності. Відповідно, система вентиляції та освітлення має працювати не як сукупність окремих елементів, а як інтегрована автоматизована структура, що здатна адаптуватися до змін технологічного навантаження, типу виконуваних робіт і кількості персоналу.

Виробництво безпілотних літальних апаратів, засноване на широкому застосуванні карбонових композитів, неминуче супроводжується утворенням пилу карбонового волокна. При розкрої, шліфуванні, свердлінні, підгонці та поліруванні елементів корпусу дронів відбувається механічне руйнування структури композиту, внаслідок чого у повітря робочої зони потрапляють волокнисті й фрагментовані частинки різного розміру. Зовні карбоновий пил може здаватися менш небезпечним, ніж традиційний промисловий пил мінерального чи металевих походження, однак його вплив на організм людини є багатофакторним і вимагає особливої уваги з боку системи вентиляції, фільтрації повітря та засобів індивідуального захисту.

Особливістю пилу карбонового волокна є його високодисперсний характер і волокниста структура. Багато частинок мають малі розміри, здатні тривалий час утримуватися у зваженому стані в повітрі виробничого приміщення. Це означає, що навіть після закінчення операцій обробки

комполітів концентрація пилу певний час залишається підвищеною, а працівники, які виконують інші технологічні операції, продовжують піддаватись його впливу. Чим дрібніші частинки, тим глибше вони можуть проникати у дихальні шляхи і тим складніше організму від них позбавитись природними механізмами очищення.

Насамперед пил карбонового волокна виступає як механічний подразник слизових оболонок верхніх дихальних шляхів. При вдиханні частинки осідають у носовій порожнині, глотці, гортані, викликаючи відчуття сухості, першіння, печіння, іноді — болісний кашель. Постійне подразнення слизових призводить до розвитку хронічних запальних процесів, зниження місцевого імунітету, підвищення сприйнятливості до респіраторних інфекцій. Працівник починає відчувати, що в приміщенні “важко дихати”, з’являється схильність до частих застудних захворювань, загальна втома, головний біль наприкінці зміни. Ці ознаки часто недооцінюють, сприймаючи як звичайну втому, однак саме вони свідчать про перевантаження захисних систем організму.

Більш небезпечним є проникнення дрібнодисперсних частинок у нижні відділи дихальної системи — бронхи та альвеоли. Карбонові волокна та фрагменти композиту, які мають велику поверхневу міцність і високу абразивність, можуть механічно травмувати епітелій дихальних шляхів, сприяючи утворенню мікропошкоджень. У цих ділянках сповільнюється рух війок епітелію, погіршується відтік секрету, що створює умови для хронічного запалення. При тривалому впливі пилу формується бронхіт пилової етіології, що характеризується стійким кашлем, задишкою при фізичному навантаженні, відчуттям “нестачі повітря” та зниженням толерантності до роботи.

Окремої уваги потребує можливість фіброзних змін у легеневій тканині. Хоча карбонове волокно відрізняється від класичних мінеральних пилів, які однозначно пов’язані з пневмокніозами, проте при тривалому, неконтрольованому впливі карбонового пилу дрібної фракції організм може реагувати утворенням ділянок потовщення та ущільнення легеневої тканини. Такі зміни призводять до зниження еластичності легенів, погіршення

газообміну і хронічної дихальної недостатності. Працівник може роками не пов'язувати прогресуючу задишку з умовами праці, однак саме тривалий вплив недостатньо контрольованого пилового навантаження часто є прихованою причиною погіршення стану здоров'я [23].

Крім суто пневмологічних ризиків, пил карбонового волокна створює додаткову небезпеку як потенційний носій інших забрудників. На його поверхні можуть адсорбуватися компоненти смол, зв'язуючих матеріалів, розчинників, технологічних добавок, що використовуються при виготовленні композитів. Таким чином, у повітрі з'являється не лише механічний пил, а й комплекс частинок, вкритих або просочених хімічними речовинами. Це підсилює подразнюючу дію на слизові оболонки і може викликати алергічні реакції, головний біль, нудоту, підвищену втомлюваність, порушення концентрації уваги. Для цеху виготовлення дронів, де паралельно працюють паяльні ділянки, такий комбінований вплив особливо небезпечний, оскільки продукти розкладу флюсів, смол і карбоновий пил взаємно посилюють токсичне і подразнююче навантаження.

Пил карбонового волокна, Рисунок 1.1, становить небезпеку не тільки при інгаляційному надходженні, а й при контакті зі шкірою та очима. Волокнисті частинки, потрапляючи на відкриті ділянки шкіри, можуть спричиняти відчуття поколювання, свербіж, локальні подразнення, почервоніння. Через мікротріщини і мікропошкодження вони частково проникають у поверхневі шари шкіри, затримуються там і тривалий час підтримують стан хронічного подразнення. Працівники часто відзначають, що після роботи “шкіра свербить” або “ніби набита дрібними голками”. Це не лише погіршує комфорт, а й створює ризик розчісування шкіри з подальшим приєднанням інфекції.



Рис 1.1 Пил карбонового волокна.

Особливо чутливими до карбонового пилу є очі. Навіть короточасний контакт дрібних волокон зі слизовою оболонкою очей призводить до слъзотечі, відчуття “піску” в очах, почервоніння, світлобоязні. Якщо пил потрапляє під контактні лінзи, подразнення посилюється, з’являється ризик мікротравм рогівки. При тривалій роботі в умовах недостатнього очищення повітря і відсутності захисних окулярів можливе формування хронічного кон’юнктивіту, зниження гостроти зору, підвищена втомлюваність очей. Це вкрай небажано для персоналу, який виконує тонкі монтажні та калібрувальні операції.

Ще одним важливим фактором є вплив карбонового пилу на серцево-судинну систему. Постійна робота в умовах підвищеної запиленості та недостатнього вмісту кисню в повітрі, що вдихається, змушує організм працювати з більшим навантаженням. Серце має перекачувати більший об’єм крові для компенсації зниженого газообміну, що поступово може призвести до вегетативних розладів, підвищення артеріального тиску та погіршення загального самопочуття. У поєднанні з іншими стресовими факторами виробничого середовища (шум, вібрація, напружена зорово-нервова робота на

монтажних ділянках) пилове навантаження виступає важливим ланцюгом у формуванні хронічної перевтоми і професійно зумовлених функціональних розладів [34].

Не можна ігнорувати й алергізуючий потенціал пилу карбонового волокна. У частини працівників організм реагує на тривалий контакт із волокнистим пилом розвитком гіперчутливості: з'являється схильність до алергічних ринітів, нападами чхання, затрудненого дихання, періодичними висипаннями на шкірі. У тяжчих випадках можлива поява бронхіальної астми професійної етіології, коли інгаляційний контакт із пилом викликає приступи кашлю та бронхоспазм. У таких умовах подальша робота без зміни технологічних підходів до очищення повітря стає небезпечною для життя і потребує або переведення працівника на іншу ділянку, або кардинальної модернізації вентиляційної системи.

Важливо підкреслити, що небезпека пилу карбонового волокна не обмежується тільки безпосередньою дією на організм людини. У контексті виробництва дронів карбоновий пил є також фактором ризику непрямих травм і аварій. Осідаючи на підлозі, він може робити поверхню більш слизькою, збільшуючи ризик падінь та побутових травм. Накопичуючись на інструментах, стендах, корпусах обладнання, пил ускладнює обслуговування, сприяє перегріву окремих вузлів, може порушувати роботу вентиляторів і фільтрувальних елементів. У електричних шафах та на друкованих платах надлишок забруднень підвищує ймовірність поверхневих струмів витоку, локальних нагрівів, а як наслідок — відмов електроніки у найбільш відповідальний момент.

З урахуванням вищенаведеного, можна стверджувати, що пил карбонового волокна є комплексним небезпечним виробничим фактором у цеху з виготовлення безпілотних літальних апаратів. Він одночасно впливає на дихальну систему, шкіру, органи зору, серцево-судинну систему, імунний статус працівника, а також на безпечність та надійність роботи технологічного обладнання. Особливо небезпечним є прихований, кумулятивний характер дії:

негативні наслідки не завжди проявляються миттєво, а поступово розвиваються протягом місяців і років, часто вже після того, як звичка до умов роботи притупляє суб'єктивне відчуття небезпеки.

Тому для таких виробничих приміщень одних лише індивідуальних засобів захисту недостатньо. Навіть найкращі респіратори та захисні окуляри не здатні повністю компенсувати високий рівень пилового навантаження, якщо системи загальнообмінної та місцевої вентиляції не забезпечують ефективного видалення забрудненого повітря безпосередньо з зон його утворення. В умовах виготовлення дронів, де від стабільності мікроклімату та чистоти повітря залежить не тільки здоров'я персоналу, а й надійність високотехнологічної продукції, питання організації грамотної, керованої, автоматизованої вентиляції набуває ключового значення [45].

Саме комплексний, небезпечний і довготривалий вплив пилу карбонового волокна на організм людини й на технологічне середовище є одним з основних аргументів на користь впровадження сучасних автоматизованих систем керування вентиляцією. Такі системи повинні в режимі реального часу реагувати на зміну концентрації пилу, інтенсивності технологічних операцій, кількості персоналу, забезпечуючи стабільне підтримання параметрів повітряного середовища в межах, безпечних для здоров'я і оптимальних для технологічного процесу.

Паяння електронних компонентів у виробничому цеху з виготовлення дронів супроводжується постійним виділенням хімічних речовин, які виникають внаслідок нагрівання припою, флюсів, активаторів, технічних жирів та залишків технологічних паст, Рисунок 1.2. Усі ці матеріали містять комплекс органічних та неорганічних компонентів, що при нагріванні переходять у стан аерозолів, парів або диму. Саме тому ділянка паяння є одним із ключових джерел шкідливих викидів у повітря виробничого приміщення, а вплив цих забруднень на організм людини має багатоплановий і часто кумулятивний характер.

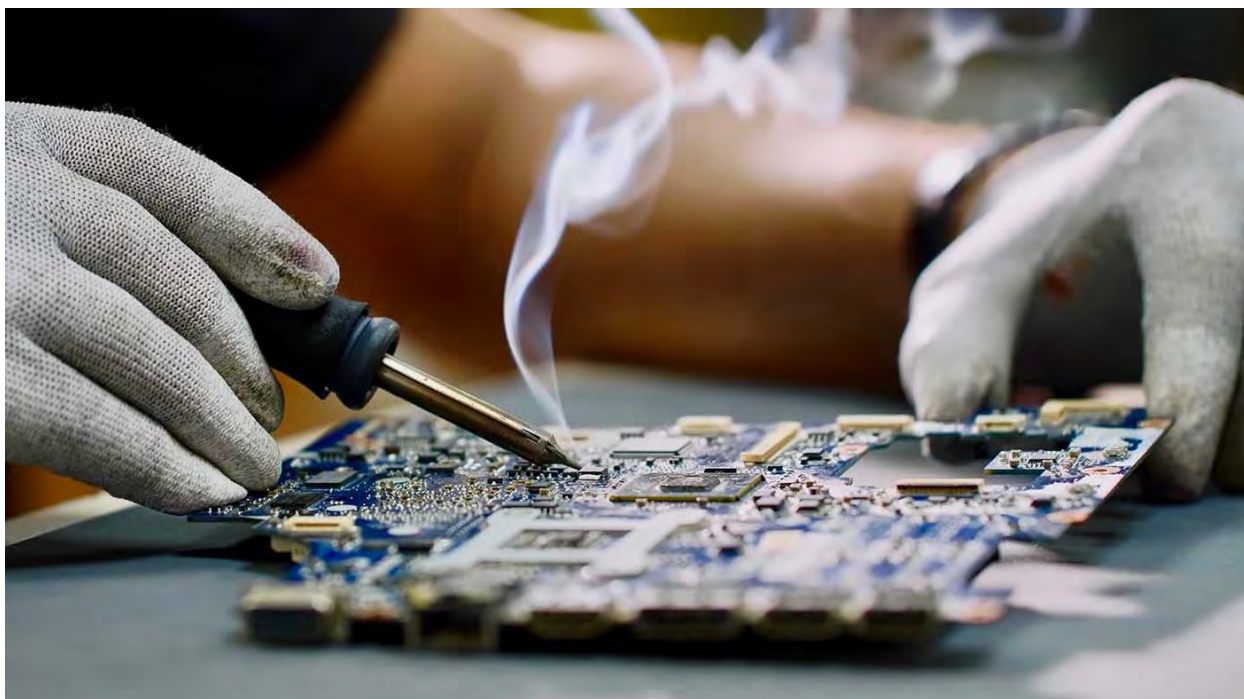


Рис1.2 Паяння електронних компонентів

Основу шкідливого впливу становлять пари припою, що утворюються при нагріванні традиційних олов'яно-свинцевих або безсвинцевих сплавів. У класичних припоях, таких як марки ПОС-60, ПОС-40, ПОС-61, основними компонентами є олово та свинець. При температурах, достатніх для паяння (180–260 °С), свинець не випаровується у чистому вигляді, однак навіть мінімальна кількість мікрочастинок оксидів свинцю, що утворюються під час роботи, становить небезпеку для здоров'я. Свинець є нейротоксином, який накопичується у кістковій тканині, крові та нервовій системі. Потрапляння свинцевих сполук у організм працівника призводить до зниження працездатності, головного болю, погіршення концентрації уваги, порушень вегетативної нервової системи та анемічних станів.

При переході на безсвинцеві припої — такі як SAC305 (Sn96.5Ag3Cu0.5), SAC405, SnCu0.7, SnAg2.0Cu0.5 — загроза впливу свинцю зникає, однак з'являються інші ризики. Температура плавлення безсвинцевих припоїв вища, ніж у свинцевих аналогів, що призводить до інтенсивнішого випаровування флюсів і появи більшого об'єму термічних продуктів розкладу. При температурах 250–300 °С активно виділяються органічні кислоти,

формальдегід, гліколеві пари, альдегіди та інші легкі речовини, здатні подразнювати дихальні шляхи та шкіру.

Особливу небезпеку становлять випари флюсів, які застосовуються для забезпечення змочування та очищення поверхні металу. Найпоширеніші флюси для ручного та автоматизованого паяння — це каніфольні та активні флюси на основі похідних каніфолі (колофонію), спиртових розчинників, органічних кислот та амінів. У виробництві дронів найчастіше використовуються марки флюсів F-SW32, F-SW34, RMA (Rosin Mildly Activated), RA (Rosin Activated), а також спеціалізовані склади від провідних виробників, таких як Amtech, Kester, Alpha, з маркуванням NC-559, Kester 951, Alpha OM-338, RMA-223.

При нагріванні таких флюсів відбувається інтенсивне розкладання каніфолі з утворенням речовин, що мають гострий подразнювальний запах і відчутно впливають на органи дихання. Основними продуктами розкладу є абієтинова кислота, оксиди вуглецю, формальдегід, акролеїн та інші альдегіди. Потрапляючи у верхні дихальні шляхи, ці речовини викликають подразнення слизових оболонок, відчуття печіння, кашель, першіння у горлі та сльозотечу. При тривалому впливі виникає хронічне запалення слизових, що призводить до риніту, фарингіту, бронхіту та зниження бар'єрних функцій дихальної системи [50].

Надзвичайно небезпечним фактором є розвиток каніфольної астми — професійної гіперчутливості, пов'язаної з тривалим вдиханням продуктів розкладу каніфолі. У працівників з підвищеною чутливістю навіть короткочасний контакт із випарами активованих флюсів може викликати приступи кашлю, задишку, бронхоспазм та відчуття стискання грудної клітки. Це явище добре описане в міжнародній практиці електронного виробництва, де ділянки паяння вважаються зонами підвищеного ризику розвитку алергізованих станів.

Окремої уваги потребують флюси на основі спиртів, зокрема флюси з високим вмістом ізопропілового спирту (ІРА), що використовуються у вигляді рідких складів. При нагріванні та нанесенні на друковану плату вони

утворюють суміш спиртових та кислотних парів, які швидко поширюються у повітрі робочої зони. Ізопропіловий спирт, будучи легкою речовиною, уже при кімнатній температурі створює значні концентрації у повітрі, а при нагріванні стає ще активнішим. У високих концентраціях він викликає головний біль, запаморочення, сухість у роті, відчуття сп'яніння та тимчасове порушення координації рухів. При тривалому впливі можливі токсичні ураження печінки та нервової системи.

Ще один важливий чинник — це технічні жири та паяльні пасти, які використовуються для фіксації компонентів, покращення теплообміну або захисту контактних площадок від окиснення. У виробництві дронів найчастіше застосовуються паяльні пасти типу SnAgCu з флюсом No-Clean, жирні технічні пасти типу MLF, Flux-Paste RMA, а також спеціалізовані жири на основі силікону, графіту або синтетичних мастил, які витримують високі температури. При нагріванні такі пасти виділяють естери, феноли, продукти термоокиснення та мікрочастинки синтетичних полімерів. Потрапляючи у легені, ці речовини викликають сухий кашель, подразнення бронхів, зниження вентиляційної здатності легенів і, при хронічному впливі, можуть призводити до розвитку токсичного бронхіту.

Вплив парів припоїв і флюсів не обмежується тільки дихальними шляхами. Частилки диму і краплі аерозолів легко осідають на шкірі, викликаючи контактні дерматити. Особливо реактивними є активні флюси типу RA, що містять солі амінів та органічні кислоти. Вони здатні спричиняти хімічні опіки верхнього шару епідермісу, локальні запалення, почервоніння та свербіж. Якщо працівник має мікропошкодження шкіри, компоненти флюсу можуть проникати глибше, викликаючи стійке подразнення або навіть розвиток алергічної реакції.

Не менш небезпечний вплив парів припоїв і флюсів на очі, оскільки слизова оболонка ока надзвичайно чутлива до дії кислот, альдегідів та інших продуктів розкладу органічних речовин. Найпоширенішими симптомами є сльозотеча, почервоніння, відчуття піску в очах, тимчасове погіршення зору,

світлобоязнь. При тривалому впливі можливий розвиток хронічного кон'юнктивіту. У складальні ділянки, де працівники змушені довго дивитися на дрібні елементи, такий ефект значно погіршує якість роботи та збільшує ризик травм через зниження уваги.

Важливо зазначити, що значна частина небезпечних компонентів не має яскраво вираженого запаху або може бути нечутною через адаптацію рецепторів. Це створює ложну ілюзію безпеки. Працівник може тривалий час виконувати паяння, не відчуваючи запаху диму, проте концентрація альдегідів і кислот у повітрі вже давно перевищує допустимі значення. Саме це є однією з головних причин професійних отруєнь, хронічної інтоксикації та зниження загальної працездатності [43].

Слід враховувати і комбінований ефект, який виникає, коли паяння проводиться поряд із ділянками обробки карбону або іншими технологічними процесами. Пил карбонового волокна адсорбує на своїй поверхні продукти розкладу флюсів, перетворюючи їх на дрібнодисперсні носії токсичних речовин. Такі частинки довго зависають у повітрі, легко проникають у легені та мають значно вищу токсикологічну активність, ніж окремо взяті пил чи випари флюсу. У результаті формується складний, багатокомпонентний аерозоль, який є одним із найнебезпечніших факторів у виробництві електронних компонентів.

Тривалий вплив парів припою та флюсів може негативно впливати на центральну нервову систему. Альдегіди, спирти та органічні кислоти, потрапляючи в організм через дихальні шляхи, здатні викликати симптоми хронічної інтоксикації: головний біль, запаморочення, порушення сну, зниження уваги, роздратованість, швидко втому. Для працівників, що займаються тонким монтажем електроніки, такий стан є критично небажаним, оскільки призводить до помилок, браку, погіршення точності та зниження якості виробів.

Окремим аспектом є можливість впливу хімічних речовин на печінку, нирки та ендокринну систему, оскільки саме ці органи відповідають за детоксикацію та виведення шкідливих речовин. Постійний контакт із парами

спиртів, органічних кислот, амінів та альдегідів спричиняє підвищене навантаження на систему детоксикації, що може провокувати порушення обміну речовин, гормональні збої та зниження імунітету.

Важливо підкреслити, що більшість працівників не відразу усвідомлюють небезпеку впливу парів припоїв і флюсів. Симптоми з'являються поступово, а робота з паяльником через свою звичність сприймається як “нешкідлива”. Така недооцінка ризиків у поєднанні з недостатньою вентиляцією створює умови для розвитку хронічних професійних захворювань.

Тому організація ефективної вентиляції та аспірації в таких виробничих зонах є не рекомендацією, а критичною необхідністю. Без автоматичного контролю якості повітря, фільтрації та локальних відсмоктувачів неможливо забезпечити безпечний рівень концентрацій парів флюсів і припоїв. Це виправдовує впровадження сучасних систем автоматизації, здатних у реальному часі оцінювати склад повітря, змінювати швидкість відведення забруднень, підтримувати оптимальний баланс притоку та витяжки та забезпечувати стабільні умови роботи.

## **1.2 Обґрунтування необхідності автоматизації мікроклімату у виробничому цеху з виготовлення дронів.**

Стабільність мікроклімату у виробничих приміщеннях, де створюються безпілотні літальні апарати, є критично важливим фактором, що визначає не лише комфортність умов праці, а насамперед безпеку технологічного процесу, довговічність обладнання та якість кінцевої продукції. На відміну від традиційних виробництв, де вплив мікроклімату має переважно фізіологічне значення, у виробництві дронів мікрокліматичні параметри безпосередньо впливають на точність монтажу електроніки, якість композитних деталей, працездатність чутливої апаратури та надійність компонентів, що мають працювати в складних польових умовах. Тому автоматизація систем мікроклімату в таких приміщеннях не може розглядатися як додаткова опція — вона є невід’ємною частиною технологічної інфраструктури.

Першочерговою причиною необхідності автоматизації є постійно змінне пилове, теплове та хімічне навантаження у цеху. Ділянки розкрою й шліфування карбону генерують великі обсяги високодисперсного пилю, який становить небезпеку для органів дихання працівників та водночас негативно впливає на електроніку. Ділянки паяння, навпаки, створюють легкі токсичні речовини, пари спиртів, органічних кислот, продукти розкладу флюсів і термодеструкції припоїв. Таке поєднання різнорідних забруднень формує складний мікроклімат, який неможливо ефективно контролювати вручну. Концентрації пилю та газоподібних домішок можуть змінюватися протягом хвилин залежно від інтенсивності технологічного процесу, кількості працюючих робочих місць і характеру операцій. Лише автоматизована система з датчиками якості повітря здатна в реальному часі реагувати на такі зміни [37].

Другим фактором, що визначає необхідність автоматизації, є різкий просторовий градієнт параметрів мікроклімату в межах одного приміщення. На ділянках обробки карбону температура повітря часто знижується через інтенсивну роботу аспіраційних систем, що відводять великі об'єми повітря. Зона паяння, навпаки, характеризується локальними перегрівками внаслідок постійної роботи паяльних станцій, інфрачервоних або конвекційних нагрівачів, а також нагрівальних столів для реболінгу та ремонту плат. На складальних ділянках температура має залишатися стабільною, оскільки коливання можуть впливати на механічні властивості полімерних корпусів та розміри деталей. Тому мікроклімат у таких приміщеннях є неоднорідним, а подекуди — контрастним, і лише багатозонна автоматизована система вентиляції та кондиціонування здатна забезпечити оптимальний розподіл повітряних потоків.

Важливим аргументом на користь автоматизації є необхідність підтримання стабільного рівня вологості. Для електронних компонентів, сенсорів, акумуляторів та друкованих плат вологість є критичним параметром. Підвищена вологість може сприяти корозії контактів, утворенню поверхневих струмів витоку та порушенню роботи електроніки. Надто низька вологість,

навпаки, створює небезпеку накопичення статичної електрики, що може пошкодити чутливі мікросхеми під час монтажу або тестування. В умовах змінних теплових та хімічних навантажень природні механізми регулювання вологості не працюють ефективно, тому автоматизована система мікроклімату повинна включати датчики вологості високої точності та можливість як осушення, так і зволоження повітря.

Необхідність автоматизації також зумовлена режимами роботи виробництва. Більшість цехів з виготовлення дронів функціонують у змінному або змішаному режимі: протягом дня кількість працівників, увімкнених станцій, активних технологічних процесів може суттєво коливатися. У години пікових навантажень температура та концентрація забруднень у повітрі зростають у декілька разів, тоді як у періоди перерв чи зміни персоналу ці параметри знижуються. Класичні системи вентиляції, що працюють на постійному режимі, не здатні з високою точністю адаптуватися до таких коливань, що призводить або до перевитрати електроенергії, або до недостатнього очищення повітря. Натомість автоматизована система з можливістю регулювання частоти обертів вентиляторів, зміни конфігурації заслінок, інтеграції з датчиками присутності та навантаження може забезпечувати економічно обґрунтовану та технологічно точну роботу.

Одним із найважливіших аспектів є забезпечення прогнозованості та відтворюваності технологічного процесу. Навіть незначні коливання мікроклімату можуть викликати приховані дефекти: мікротріщини у композитних елементах, нерівномірне затікання епоксидних смол, зміщення геометрії деталей, погіршення адгезії, порушення роботи сенсорних елементів, появу холодних пайок та зниження електричних характеристик. У високотехнологічному виробництві дронів, де кожен грам ваги і кожен міліметр конструкції мають значення, стабільність мікроклімату безпосередньо впливає на експлуатаційні властивості апаратів. Автоматизована система дозволяє забезпечити середовище, яке не залежить від людського фактору, погодних умов або зовнішніх впливів.

Особливо значущою причиною впровадження автоматизації є потреба в інтеграції систем вентиляції та освітлення. Інтенсивне тепловиділення від світлодіодних або люмінесцентних світильників, використання прожекторів на ділянках детального огляду, а також багатогодинна робота персоналу вимагають точного узгодження світлотехнічних параметрів із мікрокліматом. Надмірне освітлення сприяє перегріванню робочих зон, а дефіцит освітлення змушує працівників напружувати зір, що збільшує помилки при монтажі дрібних елементів. Автоматизована система може коригувати інтенсивність освітлення відповідно до присутності працівників, часу доби та рівня природного освітлення, одночасно адаптуючи вентиляцію до теплового навантаження.

Необхідність автоматизації також визначається питаннями охорони праці та гігієни виробництва. Пил карбону та продукти розкладу флюсів належать до небезпечних факторів, які мають здатність накопичуватися у повітрі, проникати глибоко в легені та викликати хронічні професійні захворювання. Людина не здатна визначити перевищення гранично допустимих концентрацій на око або за запахом. Тому автоматичні датчики пилу PM1/PM2.5/PM10, датчики летких органічних сполук (VOC), температури, вологості та CO<sub>2</sub> є інструментами, що забезпечують об'єктивний контроль безпекових параметрів. Система, що реагує в реальному часі, здатна автоматично збільшувати повітрообмін або відключати технологічні зони при критичних перевантаженнях, запобігаючи ризикам для персоналу та обладнання [31].

Ще одним важливим аспектом є енергоефективність. Виробничі приміщення з великими площами, високими стелями та інтенсивним повітрообміном потребують значних витрат електроенергії на вентиляцію, кондиціонування та освітлення. У класичних системах вентиляції вентилятори часто працюють на максимальних обертах незалежно від реальних потреб. Автоматизація з можливістю застосування інверторних приводів, розумних алгоритмів та адаптивних сценаріїв дозволяє знизити енергоспоживання на 20–

40 %, що особливо важливо у сучасних умовах високої вартості енергоресурсів та необхідності раціонального використання потужностей.

У контексті воєнного часу для України особливо важливою є стійкість систем до ризиків, таких як перебої з електропостачанням, необхідність автономної роботи, можливість швидкого відновлення після аварійних остановок. Автоматизована система вентиляції дозволяє інтегрувати джерела безперебійного живлення, аварійні режими, алгоритми “м’якого старту”, що зменшують пускові навантаження. Крім того, система може автоматично переходити у режим економії при зниженні навантаження або в режим інтенсивного очищення перед початком робочої зміни, забезпечуючи безпечне середовище без необхідності людського втручання.

Мікроклімат у цеху з виготовлення дронів визначає якість всього циклу виробництва — від обробки матеріалів і монтажу електроніки до калібрування й тестування. Неконтрольовані коливання параметрів можуть перевозити до браку, невиявлених дефектів, виходу з ладу дорогої апаратури та навіть створення небезпечних ситуацій, коли надлишкове накопичення пилу стає вибухонебезпечним або токсичним. Автоматизація, навпаки, забезпечує передбачуваність, стабільність і можливість безперервного моніторингу, що є основою сучасного високотехнологічного виробництва.

Таким чином, впровадження автоматизованої системи мікроклімату у виробничому цеху з виготовлення дронів є необхідною умовою для забезпечення безпечної, ефективної та високоякісної роботи підприємства. Це дозволяє зменшити вплив небезпечних речовин на організм людини, підвищити надійність технологічних операцій, знизити енергоспоживання та створити адаптивне середовище, яке відповідає сучасним стандартам промислової автоматизації.

### **1.3 Параметри мікроклімату виробничого приміщення.**

Мікроклімат виробничого приміщення, у якому відбувається виготовлення, монтаж, паяння та калібрування безпілотних літальних апаратів,

визначає стабільність роботи всіх технологічних процесів. У таких цехах поєднані операції з різним тепловим, хімічним, пиловим та вологісним навантаженням, тому вимоги до мікроклімату є значно жорсткішими, ніж у традиційних промислових приміщеннях. Головною метою систем вентиляції і кондиціювання є забезпечення стабільності параметрів, незалежно від інтенсивності технологічних процесів, кількості персоналу, зовнішніх погодних умов і сезонних коливань. Саме мікрокліматичні параметри визначають якість збирання електроніки, поведінку композитних матеріалів, точність калібрування сенсорів, безпеку працівників та довговічність обладнання.

Основними параметрами повітряного середовища, які мають підтримуватися в цеху виготовлення дронів, є температура, відносна вологість, швидкість та напрямок руху повітря, чистота повітряного середовища, концентрація шкідливих речовин та рівень вмісту вуглекислого газу. Кожен із цих параметрів прямо впливає на перебіг технологічних процесів, а їх порушення може призвести до суттєвих відхилень у роботі електроніки, дефектів у композитах, появи корозії, погіршення адгезійних властивостей матеріалів, а також до підвищення професійних ризиків для персоналу.

Температурний режим у приміщенні повинен забезпечувати стабільні умови, що не допускають перегріву або переохолодження робочих зон. Для більшості операцій із монтажу та паяння електроніки оптимальна температура становить 20–24 °С, оскільки саме в цих межах електронні компоненти та полімерні матеріали поведуться найбільш передбачувано. При нижчій температурі збільшується в'язкість флюсів і паяльних паст, що ускладнює їх рівномірне нанесення та змочування поверхонь; при вищій температурі — підвищується випаровування розчинників, пришвидшується висихання паст, утворюються газові включення та мікропорожнини, що знижують якість паяння. На ділянках обробки карбону температура не повинна надмірно знижуватися, оскільки холодне повітря збільшує електростатичний ефект, що сприяє прилипанню пилу до поверхонь. Зона тестування та калібрування потребує температурної стабільності, оскільки багато сенсорів дронів є

температурозалежними, і навіть невеликі коливання можуть вплинути на їхні характеристики [28].

Не менш важливим параметром є відносна вологість повітря. У виробництві електроніки критичною є необхідність уникати надмірної сухості, що сприяє накопиченню статичної електрики, та уникати надмірної вологості, яка створює ризики корозії, погіршення адгезії матеріалів і появи поверхневих струмів витоку на друкованих платах. Оптимальною вважається вологість у межах 40–55 %. При вологості нижчій ніж 35 % підвищується електризованість матеріалів, що може спричинити неконтрольоване розрядження на мікросхеми, порушуючи їхню роботу або повністю виводячи їх з ладу. При вологості вищій за 60 % зростає ризик утворення конденсату на холодних поверхнях, особливо на металевих частинах, сенсорних модулях і кабельних з'єднаннях. Конденсат у поєднанні з пилом або залишками флюсу створює сприятливе середовище для корозійних процесів, яке може спричинити відмови в роботі дронів уже після їхнього складання.

Швидкість руху повітря у виробничому приміщенні має підтримуватися в межах значень, які не створюють дискомфорту для працівників і не впливають на роботу технологічних процесів. У монтажних та паяльних зонах висока швидкість повітря може призводити до нерівномірного охолодження паяльних з'єднань, зміни профілю нагріву та утворення дефектів. У зонах обробки карбону слабкий повітряний обмін може викликати зависання пилу в повітрі, тоді як надто сильні повітряні потоки можуть піднімати пил із поверхонь і переносити його у суміжні зони, де розміщена електроніка. Тому повітророзподіл має бути організований таким чином, щоб у ділянках пилогенерації створювати локальний відсмоктувальний потік, а в чистих зонах — м'який ламінарний потік із мінімальною турбулентністю.

Чистота повітряного середовища є ключовою вимогою, оскільки пил карбону, металеві частинки, аерозолі флюсів і паяльних паст можуть значно погіршувати якість технологічних операцій. У зонах монтажу електроніки повітря має бути очищене від частинок розміром від 0,3 до 10 мкм, оскільки

саме ці частинки найчастіше викликають дефекти під час паяння, погіршують якість оптичних елементів камер, потрапляють на сенсорні модулі та призводять до відмов після складання. Ділянки шліфування карбону повинні мати підвищену кратність повітрообміну, що дозволяє швидко виводити пил із приміщення, не допускаючи його потрапляння до суміжних зон.

Кратність повітрообміну залежить від інтенсивності технологічних процесів. Для ділянок паяння необхідна висока кратність, яка дозволяє оперативно виводити пари флюсів, органічні кислоти та спиртові компоненти. Ділянки шліфування потребують ще більш інтенсивної вентиляції, оскільки кількість пилу, що утворюється, може в десятки разів перевищувати допустимі концентрації вже через кілька хвилин роботи. У той же час монтажні й калібрувальні зони мають потребу в значно менших швидкостях обміну, але більш жорстких вимогах до чистоти повітря. Тому оптимальним є зональний підхід до вентиляції, коли кожна ділянка має окремі канали, регульовані клапани та власну систему відведення забрудненого повітря.

Особливої уваги потребує контроль вмісту вуглекислого газу. У приміщеннях із великою кількістю працюючих людей рівень  $\text{CO}_2$  швидко підвищується, що впливає на концентрацію уваги, працездатність і загальне самопочуття персоналу. У виробництві дронів, де точність операцій критично важлива, навіть незначне підвищення  $\text{CO}_2$  може спричинити збільшення кількості помилок. Тому система вентиляції має включати датчики  $\text{CO}_2$  та алгоритми автоматичного збільшення притоку свіжого повітря при перевищенні встановлених меж [21].

Повітряне середовище також має контролюватися за вмістом летких органічних речовин, що утворюються при нагріванні флюсів та припоїв. VOC-компоненти викликають подразнення дихальних шляхів, головний біль та швидку втому. В умовах відсутності адекватної вентиляції вони накопичуються у верхніх шарах повітря й поступово опускаються до робочої зони. Тому система вентиляції повинна забезпечувати їх оперативне видалення, не допускаючи перевищення допустимих концентрацій.

Вентиляція приміщення має забезпечувати підтримання слабкого перепаду тисків між зонами для правильного направлення потоків повітря. Зони з високим забрудненням повинні мати незначний негативний тиск, що перешкоджає потраплянню пилу та парів у чисті зони. Монтажні зони, навпаки, мають мати нейтральний або слабкий позитивний тиск, що формує стабільний ламінарний рух повітря від чистих зон до зон забруднення.

Усі вищезазначені вимоги можуть бути виконані лише в умовах, коли система вентиляції являє собою складний комплекс взаємопов'язаних елементів, здатний реагувати на зміну параметрів у режимі реального часу. Ручне керування вентиляцією не дозволяє забезпечити стабільність мікроклімату, оскільки концентрації пилу та парів змінюються дуже швидко, а вплив людського фактору призводить до значних похибок. У сучасних умовах виробництва дронів автоматична система регулювання мікроклімату є єдиним ефективним методом підтримання оптимальних умов.

#### **1.4 Висновки до розділу 1.**

У результаті аналізу умов функціонування цеху з виробництва безпілотних літальних апаратів встановлено, що даний виробничий простір характеризується поєднанням високоточних технологічних процесів, підвищеного пилового та газового навантаження, а також значних вимог до стабільності параметрів повітряного середовища. У цеху одночасно виконуються операції з механічної обробки карбонового волокна, пайки електронних компонентів, монтажу та налагодження чутливої мікроелектроніки, що формує складну та динамічну структуру техногенних впливів. Такі умови зумовлюють необхідність забезпечення не лише ефективного видалення шкідливих домішок, але й підтримання стабільних температурно-вологісних та аеродинамічних параметрів у робочій зоні персоналу.

Проведене обґрунтування показало, що традиційні системи вентиляції та кондиціонування, які працюють у фіксованих або квазістатичних режимах, не

здатні забезпечити належний рівень безпеки та комфорту в умовах змінного технологічного навантаження. Зміна характеру робіт у різні проміжки часу призводить до локальних перегрівів, нерівномірного розподілу забруднюючих речовин та порушення зорового комфорту. У таких умовах автоматизація мікроклімату є об'єктивною необхідністю, оскільки лише адаптивні системи керування здатні в реальному часі реагувати на зміну температури, вологості, концентрації пилу та газоподібних домішок у різних просторових шарах виробничого приміщення. Автоматизоване керування вентиляцією дозволяє локалізувати джерела забруднення, зменшити поширення шкідливих речовин та запобігти їх накопиченню у зоні дихання працівників.

Узагальнення параметрів мікроклімату цеху показало, що стабільність температури, вологості та швидкості руху повітря є критично важливою як для здоров'я персоналу, так і для якості технологічних процесів. Відхилення температурних показників призводить до зниження працездатності, підвищеної втоми та зростання ймовірності помилок при складанні електронних компонентів, тоді як надмірна або недостатня вологість негативно впливає на утворення електростатичних зарядів і надійність паяних з'єднань. Концентрація карбонового пилу та парів флюсів безпосередньо визначає рівень професійного ризику та потребує постійного контролю з використанням чутливих датчиків і багаторівневої вентиляції. Таким чином, оптимальні параметри мікроклімату повинні підтримуватися не усереднено для всього цеху, а диференційовано за зонами та шарами повітряного простору.

Отримані висновки підтверджують доцільність впровадження автоматизованої системи керування мікрокліматом у цеху з виробництва БПЛА, яка забезпечує адаптивну зміну режимів вентиляції та повітрообміну відповідно до реальних умов роботи. Такий підхід дозволяє створити безпечне, стабільне та ергономічно оптимізоване виробниче середовище, підвищити ефективність праці персоналу та забезпечити високу якість виготовлення безпілотних літальних апаратів.

## РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДНИЦЬКО-АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1 Система пошарової вентиляції.

Виробничі приміщення, у яких здійснюється виготовлення безпілотних літальних апаратів, характеризуються надзвичайно складною структурою повітряного середовища. Це зумовлено одночасною присутністю різнорідних джерел забруднень, що генерують пил, гази, аерозолі та пари з різними фізико-хімічними властивостями. В таких умовах класичні підходи до вентиляції, засновані на рівномірному перемішуванні повітря або на моношаровому відведенні відпрацьованого повітря у верхній частині приміщення, виявляються недостатньо ефективними. Виникає необхідність застосування пошарових, або стратифікованих, систем вентиляції, які дозволяють видаляти шкідливі домішки безпосередньо з тих зон, де вони формуються та накопичуються [14].

Особливістю виробництва дронів є те, що повітряне середовище у приміщенні ніколи не є однорідним. Ділянки паяння створюють теплі потоки, насичені леткими органічними речовинами, продуктами розкладу флюсів та паяльних паст. Такі домішки піднімаються разом із нагрітим повітрям догори, утворюючи зони підвищених концентрацій під стелею або в середніх шарах приміщення. Ділянки обробки карбону, навпаки, генерують тонкодисперсний волокнистий пил, який може як зависати у повітрі, так і осідати на поверхнях. Частинки карбону не є однорідними за масою, формою та електростатичними властивостями, тому одні з них тривалий час перебувають у середній частині приміщення, а інші поступово опускаються донизу. Флюси, що містять спиртові та кислотні компоненти, утворюють важчі за повітря пари, які з часом накопичуються у нижній частині приміщення. Одночасне існування цих різних груп забруднень створює багатшарову структуру повітряної маси, яка закономірно руйнує ефективність будь-якої однорівневої вентиляційної системи.

Ключовим фактором, що визначає необхідність пошарової вентиляції, є різна густина та температура забруднюючих домішок. Теплі гази та легкі

спиртові пари піднімаються вгору, до верхнього прошарку повітря. Продукти розкладу каніфолі утворюють видимий дим, що концентрується в середній зоні на висоті 1–2 метрів, тобто саме в зоні дихання працівника. Важкі пари органічних кислот, залишки розчинників, аерозольні частинки флюсів та паст з нижчим коефіцієнтом леткості поступово опускаються вниз, накопичуючись у приповерхневій зоні. Пил карбону поводить ще складніше: за наявності електростатичного заряду він може як підніматися у повітря по всій висоті приміщення, так і миттєво осідати після зникнення турбулентних потоків, створюючи нерівномірні «пилові плями».

З огляду на такі фізичні процеси, будь-яка система, що базується лише на верхній витяжці, не може ефективно видаляти важкі аерозолі та пари, які накопичуються внизу. Аналогічно, нижня витяжка не здатна уловлювати легкі речовини, що концентруються вгорі. Середній шар повітря, у якому утворюється найбільше забруднень з ділянок паяння, взагалі практично не охоплюється класичними вентиляційними схемами. Внаслідок цього в приміщенні формуються зони застою, в яких концентрація небезпечних речовин може досягати значень, що перевищують допустимі норми у декілька разів, навіть при роботі системи загальнообмінної вентиляції.

Пошарова вентиляція усуває цю проблему шляхом створення окремих ярусів відсмоктування повітря, кожен з яких працює на своєму рівні приміщення. Верхній рівень відповідає за видалення легких газів, теплих потоків від паяльного обладнання, спиртових випарів і легких фракцій флюсів. Середній рівень забезпечує видалення дрібнодисперсних аерозолів, диму та найнебезпечніших продуктів розкладу каніфолі, що тривалий час зависають у повітрі на рівні обличчя працівників. Нижній рівень відсмоктує важкі пари органічних речовин, конденсовані аерозолі, краплі флюсів, а також частину осілого пилу, який накопичується біля робочих поверхонь та підлоги.

Застосування трирівневої вентиляції дозволяє природним чином поділити повітряні потоки у приміщенні та зменшити турбулентність. Це особливо важливо у виробництві дронів, оскільки турбулентні потоки піднімають пил з

поверхонь і переносять його на електронні компоненти, друковані плати, оптичні елементи камер і точні сенсорні модулі. Стратифікована вентиляція, на відміну від традиційної, не намагається перемішати повітря у всьому приміщенні — вона працює шляхом локального видалення забруднень у тій зоні, де вони виникають [11].

Особливістю такого підходу є можливість зменшити загальний об'єм повітрообміну без зниження якості очищення повітря. Традиційні системи часто працюють з надмірними витратами повітря для того, щоб «розмити» концентрації забруднень. У пошаровій системі цього не потрібно: кожен ярус забирає саме той вид забруднень, що в ньому концентрується. Це суттєво знижує енергоспоживання, зменшує зношування вентиляційного обладнання та дозволяє більш точно підтримувати мікроклімат. Саме тому стратифіковані системи застосовуються у фармацевтичних лабораторіях, виробництвах композитних матеріалів, clean-room середовищах, електроніці високої точності та інших галузях, де повітряні параметри мають вирішальне значення.

Важливо й те, що пошарова вентиляція дозволяє забезпечити розділення зон чистоти у межах одного приміщення. Монтажні ділянки, де працюють із мікросхемами, датчиками, гіроскопами, GPS-модулями та оптичними блоками, потребують вищого класу чистоти, ніж ділянки механічної обробки. Завдяки пошаровій вентиляції повітря з нижніх і середніх зон «забруднених» ділянок не потрапляє у зони тонкого монтажу, оскільки там створюється стабільний ламінарний потік, спрямований у сторону локальних відсмоктувачів. Це мінімізує перехресне перенесення пилу і забезпечує більш чисте середовище, що позитивно впливає на якість технологічних операцій.

З точки зору охорони праці пошарова вентиляція також має вирішальне значення. Вона дозволяє видаляти небезпечні домішки ще до того, як вони потраплять у зону дихання працівника. Дим від флюсів та паяльних паст, що у традиційних системах спочатку розповсюджується у середній зоні, а лише потім змішується і виводиться через верхню витяжку, при стратифікованому підході забирається негайно — з того самого шару, в якому він формується. Те

саме стосується важких парів та частинок смол, які накопичуються внизу і можуть залишатися непомітними для систем загальної вентиляції.

Застосування стратифікованої вентиляції дозволяє також організувати контрольовані перепади тиску між різними рівнями приміщення. Наприклад, незначний негативний тиск у нижній зоні перешкоджає переміщенню важких парів у середню зону, тоді як слабкий позитивний тиск у зоні монтажу не дозволяє пилу з інших ділянок проникати в чистіші робочі області. Це створює стійку аеродинамічну структуру, яка природно направляє потоки забрудненого повітря до зон відсмоктування.

З урахуванням усіх цих факторів пошарова вентиляція є оптимальним та фактично єдиною правильним рішенням для виробничого цеху з виготовлення дронів. Вона забезпечує високий рівень очищення повітря, мінімізує вплив шкідливих речовин на персонал, стабілізує мікроклімат у технологічно критичних зонах, зменшує енергоспоживання та підвищує якість продукції. Крім того, така система створює основу для подальшої автоматизації, оскільки кожен ярус вентиляції може бути оснащений власними датчиками якості повітря, температури, вологості та концентрації забруднень, що дозволяє оптимізувати роботу обладнання у режимі реального часу.

Повітряне середовище виробничого цеху, у якому виконуються технологічні операції з обробки композитних матеріалів, паяння електронних компонентів, нанесення флюсів, очищення плат та складання високочутливих сенсорних елементів, являє собою складну та неоднорідну багатокomпонентну систему. На відміну від звичайних промислових приміщень, де основним фактором забруднення є пил однакового типу або однотипні гази, у виробництві дронів одночасно існує декілька груп домішок із різними фізико-хімічними характеристиками: волокнистий пил карбону, аерозолі смол, продукти термічного розкладу флюсів, спиртові та кислотні пари, нагріті газоподібні викиди від паяльних станцій та локальні теплові конвекції. Їх поведінка у повітряному об'ємі має складний стратифікаційний характер, що робить

неможливим ефективно очищення повітря за допомогою класичної вентиляції змішувального типу.

Однорівневі системи вентиляції, що передбачають відведення повітря виключно у верхній або нижній частині приміщення, не враховують основні закономірності руху газів і частинок у середовищі, яке постійно змінюється під дією теплових потоків, локальних джерел забруднення та різних щільностей домішок. Повітря, насичене органічними парами та леткими компонентами флюсів, має меншу густину і піднімається разом із потоками нагрітого повітря, що формується в зоні паяльних станцій. Димові шлейфи, що містять краплини розкладу каніфолі, створюють зони середньої концентрації на висоті від одного до двох метрів, де температура та швидкість повітряних потоків сприяють їх зависанню. Натомість важчі органічні пари та аерозолі смол мають тенденцію осідати вниз, збираючись у приповерхневому прошарку [7].

Така стратифікація повітря виникає внаслідок взаємодії кількох фізичних механізмів: різниці густини газоподібних сумішей, турбулентних ефектів, локальної теплової конвекції, електростатичних зарядів та гравітаційного осідання частинок. Дрібнодисперсний пил карбону, що утворюється при шліфуванні та різанні композиту, здатний утримуватись у повітрі тривалий час через низьку масу та значну площу поверхні, а також завдяки електростатичному заряду, що виникає при терті. Такі частинки можуть переміщуватися у широкому діапазоні висот, піднімаючись у верхні зони приміщення або концентруючись у середній зоні, де відсутні сильні вертикальні потоки повітря. У той же час більші волокнисті частинки карбону поступово опускаються вниз, формуючи локальні зони забруднення в нижньому шарі.

Поведінка газових домішок має інший характер. Пари ізопропілового спирту, що широко використовується у паяльних процесах, мають густину меншу за густину повітря, тому схильні підійматися догори. Натомість пари органічних кислот, які утворюються при нагріванні активованих флюсів, мають більшу молекулярну масу і накопичуються в нижніх шарах. У середній зоні

концентруються дрібні аерозольні частинки, що утворюються внаслідок термічного розпаду каніфолі: їхня густина близька до густини повітря, а температура під час виходу з-під паяльника сприяє утриманню їх саме у зоні дихання працівника.

Таким чином, у приміщенні природним чином формуються три основні аеродинамічні зони: верхня зона легких нагрітих газів і спиртових парів, середня зона завислих аерозолів і дрібного пилу та нижня зона важчих органічних парів і осілого пилу. Ці зони не існують у статичному вигляді — їх границі постійно зміщуються під впливом технологічних процесів, роботи обладнання, руху персоналу та локальних потоків. Проте загальна тенденція стратифікації зберігається завжди, і саме вона визначає аеродинамічну структуру повітряного об'єму.

У таких умовах система вентиляції змішувального типу, яка працює за принципом подачі повітря в одну частину приміщення та відведення його в іншу, створює надлишкову турбулентність. Це призводить до переміщення забруднень між шарами, а не до їх видалення. Турбулентний потік піднімає пил з поверхонь, змішує важкі пари з легкими, збільшує загальну концентрацію домішок у повітрі та переносить частинки карбону в зони, що повинні залишатися чистими, зокрема в місця збирання та калібрування електроніки. Внаслідок цього якість повітря знижується, навіть якщо система забезпечує достатню кратність повітрообміну.

Стратифікована вентиляція усуває цей недолік шляхом організації цілеспрямованих, локально орієнтованих потоків повітря, які працюють у межах кожного аеродинамічного шару. У верхній частині приміщення встановлюються витяжні канали, що видаляють легкі пари, спирти та теплі гази ще до того, як вони змішаються із загальним повітряним потоком. У середній частині встановлюються витяжні елементи, розташовані в зоні дихання, що дозволяє видаляти найбільш небезпечні аерозольні домішки — продукти горіння каніфолі, флюсів та дрібнодисперсний пил. У нижній частині

створюються витяжні лінії, що видаляють важкі пари та осілий пил, не дозволяючи їм повторно потрапити у зону дихання.

Аеродинамічна ефективність пошарової вентиляції полягає в тому, що вона працює не проти природних процесів, а разом із ними. Вона посилює природну стратифікацію забруднень, а не руйнує її. Кожен шар повітря очищується окремо, відповідно до типів домішок, які в ньому накопичуються. У результаті концентрація небезпечних речовин у повітрі знижується значно швидше, ніж при використанні традиційних систем.

Важливо й те, що стратифікована система створює контрольовану аеродинамічну структуру, яка мінімізує горизонтальне перенесення забруднень. Завдяки цьому пил із зони шліфування не потрапляє у зону паяння, а пари флюсів не переносяться у зону збирання електроніки. Це дозволяє підтримувати різні рівні чистоти у межах одного приміщення без використання окремих ізольованих камер.

З аеродинамічної точки зору пошарова вентиляція є оптимальним рішенням для виробництв з багатокомпонентним забрудненням, оскільки враховує природні властивості повітряних потоків і забезпечує максимальну ефективність очищення при мінімальній турбулентності. Вона створює умови, у яких небезпечні домішки видаляються на ранніх етапах їх формування, не встигаючи змішатися з повітряною масою та поширитися у приміщенні. У виробництві дронів, де чистота повітря і стабільність мікроклімату впливають на точність технологічних операцій, така система є не лише бажаною, а й обов'язковою [18].

Пошарова система вентиляції у виробничому цеху з виготовлення дронів являє собою комплекс інженерних рішень, спрямованих на ефективне видалення шкідливих домішок із різних вертикальних зон приміщення. На відміну від традиційних систем загальнообмінного типу, які передбачають створення одного потоку подачі та одного потоку видалення повітря, тришарова вентиляція використовує декілька незалежних рівнів відсмоктування й контролю, що дозволяє реалізувати принцип стратифікації.

Така конструкція обумовлена неоднорідністю повітряного середовища в цеху та різними характеристиками забруднюючих речовин, які накопичуються на різних висотах приміщення та вимагають індивідуального підходу до видалення.

Основу конструкції становить розподіл приміщення на три функціональні аеродинамічні рівні. Кожен із них має власну систему повітроводів, витяжних модулів, датчиків якості повітря та засобів регулювання потоку. Верхній рівень розташовується у зоні найбільшої концентрації легких та нагрітих газів, середній — у зоні дихання, де накопичуються аерозолі й продукти розпаду флюсів, а нижній — у приповерхневій зоні, де концентруються важкі пари та осілий пил.

Верхній рівень вентиляції виконує функцію перехоплення легких, теплих та висхідних потоків, які утворюються внаслідок роботи паяльних станцій, терморегуляторів, нагрівальних столів і сушильного обладнання. Температура повітря в цій зоні є підвищеною, а тиск — дещо нижчим, ніж у середній частині приміщення, що створює природні умови для руху газів угору. Верхній рівень обладнаний системою витяжних каналів великої пропускної здатності, які розташовані безпосередньо під стелею або в її верхній частині. Основним завданням цього рівня є видалення легких парів, таких як ізопропіловий спирт, а також органічних летких сполук, що мають температуру вищу за температуру навколишнього середовища.

Цей рівень також відіграє важливу роль у стабілізації теплового балансу приміщення. Конвекційні потоки тепла, що піднімаються від паяльних станцій, несуть із собою значну кількість шкідливих домішок. При відсутності ефективної верхньої витяжки вони накопичуються під стелею й поступово опускаються вниз, створюючи нерівномірні температурні та хімічні зони. Завдяки використанню автоматично регульованих клапанів, витяжні модулі можуть змінювати свою пропускну здатність залежно від температури повітря та концентрації летких органічних сполук у верхній частині приміщення. Це дозволяє підтримувати стабільну та контрольовану аеродинамічну структуру.

Середній рівень вентиляції має найбільше значення для забезпечення безпеки працівників, оскільки саме на висоті 1,0–1,8 метра відбувається накопичення найнебезпечніших домішок: диму паяльних флюсів, продуктів розкладу каніфолі, дрібнодисперсних частинок смол і мікроаерозолів, що утворюються у процесі паяння. Ці речовини мають густину близьку до густини повітря, тому не піднімаються до верхнього рівня та не осідають у нижньому, а залишаються в зоні дихання працівника. Саме це робить їх найнебезпечнішими з точки зору впливу на здоров'я та концентрацію у робочій зоні.

Середній рівень оснащується витяжними модулями, розміщеними на висоті робочої зони, а також локальними відсмоктувачами, які розташовуються безпосередньо біля паяльних станцій. У конструкції середнього рівня важливим є правильне позиціонування повітроприймальних отворів, оскільки надмірне наближення може створювати небажаний перепад тиску, що негативно впливає на процес паяння, тоді як надто далеке розташування зменшує ефективність уловлювання аерозолів. Система середнього рівня працює зі змінною продуктивністю, що регулюється автоматикою залежно від концентрації диму та аерозолів, яку визначають відповідні датчики. Таким чином вентилятори цього рівня активізуються лише в моменти підвищення забруднення, що оптимізує енергоспоживання та забезпечує точну відповідність умовам роботи.

Нижній рівень вентиляції відповідає за видалення важких парів, що накопичуються в приповерхневих шарах, а також за збір осілого пилу карбону та смолистих частинок. Цей рівень є критичним для ділянок, де використовуються агресивні активні флюси, розчинники або смоли, що при нагріванні утворюють важкі газоподібні домішки. Природна тенденція таких речовин до осідання робить їх практично недоступними для систем верхньої або середньої вентиляції. Тому нижній рівень оснащується повітроводами, розміщеними уздовж підлоги або інтегрованими в технологічні столи. Важливим конструктивним елементом є фільтраційні касети грубого та середнього очищення, які уловлюють частинки пилу перед подачею повітря у центральний витяжний канал [25].

Усі три рівні вентиляції взаємодіють через автоматизовану систему керування, яка координує їхню роботу, забезпечує оптимальний розподіл повітряних потоків та підтримує необхідний мікроклімат. Система використовує інформацію від набору датчиків, що контролюють температуру, вологість, концентрацію пилу, рівень летких органічних речовин (VOC), а також вміст вуглекислого газу. На основі цих даних процесор приймає рішення про збільшення чи зменшення продуктивності того чи іншого вентиляційного рівня, відкриття або закриття заслінок, переключення потоків і стабілізацію параметрів повітря.

Важливою функцією автоматичної системи є запобігання небажаним зворотним потокам повітря між рівнями. Якщо у приміщенні формується надмірний тиск у нижній зоні, важкі пари можуть підніматися догори, порушуючи стратифікацію. Автоматика запобігає цьому, регулюючи витяжний режим у нижній частині приміщення. Аналогічно, якщо у верхній зоні накопичується надлишкове тепло, автоматична система підсилює роботу верхнього рівня, запобігаючи тепловій інверсії і поверненню нагрітих газів у середню зону.

Для монтажних ліній та ділянок калібрування електроніки пошарова система може бути розширена за рахунок створення зони ламінарного подавання повітря. Це дозволяє забезпечити підвищений клас чистоти та мінімізувати ризик попадання пилу або продуктів паяння на чутливі компоненти. Ламінарний потік формується через спеціальні панелі з фільтрами тонкого очищення, які подають повітря зверху вниз із постійною швидкістю, створюючи чисту вертикальну колонну потоку, що перешкоджає проникненню забруднень із суміжних ділянок.

У цілому конструкція тришарової вентиляції утворює комплексну аеродинамічну систему, що забезпечує рівномірне та ефективне видалення шкідливих домішок з усіх функціональних шарів приміщення. Вона усуває основні недоліки традиційних вентиляційних схем, мінімізує ризики впливу небезпечних речовин на персонал, запобігає перехресному забрудненню між

технологічними ділянками та створює умови для стабільної роботи високоточного обладнання. Завдяки можливості тонкого регулювання кожного рівня і координації їх роботи автоматикою, така система забезпечує оптимальне енергоспоживання, тривалу надійність та відтворюваність параметрів мікроклімату, що є критично важливими у сучасному виробництві дронів.

## **2.2 Типи датчиків і модулів автоматизації для контролю мікроклімату та роботи пошарової вентиляції у виробничому цеху з виготовлення дронів**

Автоматизована система мікроклімату та пошарової вентиляції в технологічному приміщенні, де виготовляються безпілотні літальні апарати, базується на комплексі точних електронних датчиків, контролерів та виконавчих механізмів. Ці елементи забезпечують неперервний моніторинг стану повітря, температуру, вологість, концентрацію пилу, рівень летких органічних речовин, наявність шкідливих газів, а також контроль за повітряними потоками кожного вентиляційного рівня. Висока точність роботи такої системи є критичною, оскільки характер технологічних процесів є надзвичайно чутливим до змін мікроклімату, а концентрації шкідливих домішок можуть істотно коливатися протягом робочого дня. Тому для реалізації надійного та адаптивного керування використовуються інструменти вимірювання промислового та лабораторного класу, які забезпечують стабільну роботу та довготривалу точність [29].

До ключових елементів автоматизованої системи належать датчики температури та вологості. Ці параметри впливають на всі процеси — від якості паяння до поведінки композитних матеріалів. Найпоширенішими є комбінаційні датчики типу Sensirion SHT3x, SHT41, Honeywell HIH-5030/5130, Siemens QFM3160, зображений на Рисунку 2.1, а також промислові модулі на основі технології цифрового вимірювального елемента CMOSens. Вони забезпечують високу точність, низьку похибку, стабільність показників та

можливість тривалої роботи у складних умовах. Їх легко знайти у відкритих джерелах та використовувати як ілюстрації в дипломі.



Рис.2.1 Датчик температури та вологості Siemens QFM3160

Для контролю повітряного середовища у цеху необхідні датчики твердих частинок, які дозволяють визначати концентрацію пилу у різних фракціях — PM1, PM2.5, PM10. Такі модулі широко застосовуються в системах очищення повітря та індустриальних вентиляційних комплексах. Найбільше поширення отримали лазерні датчики PMS7003, зображений на Рисунку 2.3, Nova Fitness SDS011, Honeywell HPMA115S0 та Sensirion SPS30. Вони забезпечують можливість реального вимірювання кількості частинок у повітрі та дозволяють автоматизованій системі збільшувати потужність середнього вентиляційного рівня тоді, коли концентрація пилу у зоні дихання перевищує контрольні значення.



Рис 2.2 Лазерний датчик забрудненості повітря PMS7003.

Для контролю летких органічних речовин у приміщенні використовуються датчики газів типу VOC (Volatile Organic Compounds) або TVOC (Total Volatile Organic Compounds). У виробничому цеху дронів ці датчики мають особливе значення, оскільки дозволяють аналізувати викиди флюсів, паяльних паст, спиртів, активних речовин та хімічних сполук, що утворюються при нагріванні. Найпоширеніші моделі, доступні в Інтернеті та придатні для ілюстрації, включають Sensirion SGP40, Bosch BME688, зображений на Рисунку 2.3, AMS iAQ-Core, Figaro TGS8100 та мультимодульні сенсори MQ-135 або MQ-138 для загального аналізу органічних домішок. Особливістю таких датчиків є їх здатність визначати сумарну концентрацію VOC у повітрі, що дозволяє автоматичній системі оцінювати ступінь забруднення у режимі реального часу та коригувати роботу середнього і верхнього вентиляційних рівнів.



Рис 2.3 Датчик контролю летких органічних речовин Bosch BME688

Окрему групу складають датчики CO<sub>2</sub>, які застосовуються для контролю якості повітря з точки зору вмісту вуглекислого газу. Підвищення його концентрації негативно впливає на працездатність персоналу та точність виконання технологічних операцій. Найбільш популярними є датчики на базі інфрачервоної NDIR-технології — Sensair S8, Winsen MH-Z19C, зображений на Рисунку 2.4, Vaisala GMP252 та CO<sub>2</sub>-модулі від Honeywell. Такі датчики забезпечують високу точність вимірювань і добре підходять для інтеграції у промислові вентиляційні системи.





Рис 2.6 Датчики присутності Panasonic EKMB

Базою всієї системи є промисловий контролер, який координує роботу датчиків та виконавчих механізмів. На практиці найчастіше використовуються контролери Siemens серії LOGO! або S7-1200, Schneider Electric Modicon M221, Omron CP1E, Allen-Bradley Micro820, зображений на Рисунку 2.7, Wago PFC200 або інші програмовані логічні контролери, які підтримують модулі розширення та промислові протоколи обміну даними. Вони забезпечують збір інформації з великої кількості сенсорів і реалізують алгоритми регулювання вентиляції та мікроклімату.



Рис 2.7 Промисловий контролер Allen-Bradley Micro820

Виконавчі механізми представлені електроприводами вентиляційних заслінок, змінними за частотою приводами вентиляторів (частотними перетворювачами), сервоприводами повітряних клапанів, модулями керування припливно-витяжними установками та клапанами зворотного тиску. Найбільше поширення мають електроприводи Belimo серій LMV, NMV і SMV, приводи

Siemens GDB, зображений на Рисунку 2.8, і GSD, а також Danfoss AME і AMV. Вони забезпечують високоточне регулювання потоків повітря у кожному вентиляційному шарі та прямий зв'язок із контролером.



Рис 2.8 Привод Siemens GDB

Система також включає датчики швидкості повітря у повітроводах та у приміщенні. Найчастіше використовуються анемометри на базі термоанемометричного принципу — модулі від Airflow Developments, Testo, Siemens QVM66, зображений на Рисунку 2.9, або Omron. Вони дозволяють контролеру регулювати швидкість потоку залежно від технологічних вимог і підтримувати стабільний ламінарний режим у чистих зонах.



Рис 2.9 Датчик швидкості повітря Siemens QVM66

Усі ці комплекси датчиків взаємодіють із системою автоматизації як єдина інтелектуальна мережа, яка формує детальну картину стану повітряного середовища. Контролер, отримуючи інформацію з усіх рівнів приміщення, приймає рішення про увімкнення або вимкнення вентиляторів, зміну режимів верхнього, середнього або нижнього відсмоктування, регулювання теплового навантаження, стабілізацію вологості та тиску. У підсумку система створює саморегульоване середовище, яке зберігає оптимальні технічні параметри без постійного втручання оператора.

### **2.3 Алгоритм роботи автоматизованої системи мікроклімату та пошарової вентиляції у виробничому цеху з виготовлення дронів.**

Автоматизована система мікроклімату та пошарової вентиляції у виробничому приміщенні, де виконуються операції з обробки карбонового волокна, паяння електронних компонентів та складання безпілотних літальних апаратів, функціонує як багаторівневий інтелектуальний комплекс, здатний у режимі реального часу аналізувати стан повітряного середовища і відповідно до цього змінювати параметри роботи вентиляційних рівнів, припливних та витяжних установок, системи зволоження й осушення, а також інтенсивність повітрообміну. Основна особливість такої системи полягає у тому, що вона не обмежується класичним підходом «увімкнути» або «вимкнути» вентиляцію, а створює динамічну, адаптивну та саморегульовану модель управління мікрокліматом, яка враховує типи забруднень, їхнє вертикальне розташування, швидкість накопичення, характер технологічних процесів, присутність персоналу та теплові навантаження [33].

Алгоритм роботи автоматизованої системи починається з неперервного збору даних від датчиків, які розміщені у всіх функціональних зонах цеху. Датчики температури та вологості забезпечують інформацію про загальний стан мікроклімату; датчики пилу PM1, PM2.5 і PM10 визначають концентрацію дрібнодисперсних частинок у зоні дихання та у верхніх шарах приміщення;

газові сенсори VOC, датчики парів спиртів і кислот надають точні дані про рівень хімічних домішок; інфрачервоні датчики CO<sub>2</sub> показують рівень насиченості повітря продуктами дихання персоналу, що особливо важливо у періоди високого навантаження. Датчики перепаду тиску контролюють стан аеродинамічної рівноваги між верхнім, середнім і нижнім рівнями вентиляції, запобігаючи небажаним конвекційним зрушенням. Датчики руху, присутності та температури поверхонь дають можливість системі оцінити кількість активних робочих місць, що впливає на швидкість утворення забруднень.

Контролер, який є центральним елементом автоматизованої системи, виконує безперервну обробку цих даних, порівнюючи їх з допустимими межами, технологічними вимогами та динамічними профілями ризику. Алгоритм роботи побудований таким чином, щоб система реагувала не тільки на поточні значення параметрів, а й на їхню тенденцію до зміни, швидкість зростання та характер забруднень. Якщо концентрація пилу у зоні дихання збільшується різко, система активує середній рівень вентиляції з підвищеним режимом відсмоктування, незалежно від того, чи є вже досягнутим порогове значення. Це дозволяє запобігти накопиченню пилу ще до того, як він досягне небезпечних концентрацій. Якщо збільшується кількість летких органічних сполук у верхньому шарі, система активує верхній рівень відсмоктування, посилюючи потік і стабілізуючи теплову конвекцію [39].

Особливу увагу в алгоритмі приділено взаємодії між вентиляційними рівнями. Кожен рівень працює в межах свого діапазону, але система координує їхню діяльність таким чином, щоб вони не створювали взаємних перешкод. Якщо верхній рівень працює надто інтенсивно, він може підвищити вертикальний потік і втягнути у верхню зону пил, що знаходиться у середній частині приміщення. Тому в таких випадках система аналізує перепад тиску та автоматично збільшує потужність середнього рівня, запобігаючи небажаному перемішуванню повітря. Якщо нижній рівень вентиляції виявляє надмірне накопичення важких парів, система активує приплив чистого повітря у нижню зону та посилює його витяжку, не допускаючи підняття забруднень догори.

Алгоритм також включає гнучку адаптацію до зміни теплового навантаження. Під час паяння кількість тепла істотно зростає, створюючи сильні локальні конвекційні потоки. Система реагує на це, активуючи верхній вентиляційний рівень для стабілізації температури і зменшення підйому легких парів. Якщо температура у середній зоні підвищується швидше, ніж у верхній, це може свідчити про накопичення диму флюсів, тому система посилює роботу середнього рівня. У випадку зниження температури нижча межа алгоритму регулює швидкість припливної вентиляції, попереджаючи надмірне охолодження приміщення та появу конденсату.

Важливим елементом алгоритму є контроль вологості. Якщо вологість падає нижче встановленого порогу, система активує зволожуючий модуль, щоб запобігти накопиченню статичного заряду, який може негативно вплинути на електронні компоненти під час монтажу. Якщо ж вологість перевищує верхнє допустиме значення, система збільшує швидкість відведення повітря у верхній та середній зонах, оскільки надлишкова вологість значно погіршує якість паяння та створює ризики корозії.

У періоди, коли концентрація CO<sub>2</sub> перевищує граничні значення, система автоматично підсилює приплив свіжого повітря, активує рекупераційні модулі та збільшує загальний повітрообмін, забезпечуючи стабільні умови для працівників. Після нормалізації концентрації система плавно повертається до стандартного режиму, не створюючи різких змін тиску або температури, що могли б негативно вплинути на технологічні процеси.

Алгоритм також враховує зміну кількості персоналу. Датчики присутності аналізують, які робочі місця активні, у яких зонах спостерігається рух, де працює паяльне обладнання та де відбувається обробка композитів. У години пікового навантаження система переходить у посилений режим вентиляції, забезпечуючи максимальний повітрообмін у середній зоні та підтримання ламінарного потоку у чистих зонах. У періоди перерв або мінімальної активності система плавно переходить у енергозберігаючий режим,

але продовжує моніторинг та підтримує базову циркуляцію повітря, запобігаючи накопиченню забруднень.

Автоматизація передбачає також аварійні сценарії. Якщо концентрація VOC або пилу раптово перевищує максимально допустиме значення, система блокує подачу свіжого повітря у забруднену зону, активує всі витяжні модулі відповідного рівня та повідомляє персонал через звукові і світлові сигнали. У випадку різкого підвищення температури поблизу обладнання система переводить вентиляцію у режим прискореного відсмоктування та охолодження, щоб запобігти перегріву та займанню органічних компонентів [46].

Усе це працює як єдина логічна структура, у якій кожен параметр впливає на стан усієї системи, а система підтримує стабільний мікроклімат незалежно від зовнішніх умов та інтенсивності роботи обладнання. Алгоритм передбачає безперервну адаптацію, контроль і реагування, що забезпечує максимально точну, безпечну та енергоефективну роботу вентиляції у виробничому цеху з високим рівнем технологічних навантажень.

#### **2.4 Вплив типів штучного освітлення на організм людини: фізіологічні, біологічні та психоемоційні аспекти.**

Освітлення є одним з ключових факторів, що визначають стан здоров'я, працездатність та загальне функціонування організму людини. З точки зору фізіології, зорової адаптації та біоритмів, штучне світло впливає не лише на якість зору, а й на роботу нервової системи, гормональну регуляцію, поведінку та рівень енергетичної активності. Сучасні технології освітлення істотно змінили спектральний склад світла, з яким людина стикається протягом доби, і ці зміни не завжди є позитивними. Особливо значним є вплив світлодіодних джерел світла, які витіснили лампи розжарювання та інші традиційні джерела, але при цьому мають зовсім інший спектральний профіль. Оскільки людський зір формувався мільйонами років під дією природного сонячного спектра та спектра вогню, сучасні штучні джерела нерідко створюють неадекватне навантаження на зорову систему, що поступово змінює її реакцію [41].

Біологічна природа зору формує ключові вимоги до спектру світла. Людське око має максимальну чутливість у діапазоні 540–580 нм — тобто у зеленожовтій частині спектра. Саме в межах цього діапазону сигнал від фоторецепторів передається з мінімальним енергетичним навантаженням. Світло такої довжини хвилі найбільш м'яко сприймається сітківкою, не викликає значного фотохімічного стресу, не перенавантажує колбочки і не відбивається негативно на паличках, відповідальних за нічний зір. Саме тому природне вечірнє світло, вогнище, лампи розжарювання та теплі спектри є найкомфортнішими для зорової системи.

На противагу цьому сучасні світлодіодні лампи працюють на основі синього випромінювання, яке частково перетворюється фосфором у біле світло. Це означає, що у спектрі LED присутній яскраво виражений пік синього світла — у діапазоні 450–470 нм — який у кілька разів перевищує природну норму. Такий спектральний профіль є неприродним для людського ока. Синє світло має найвищу енергію серед видимого діапазону, здатне проникати у глибокі шари сітківки та взаємодіяти з пігментним епітелієм. При тривалій експозиції синій спектр призводить до фотохімічного стресу, прискорює виснаження фоторецепторних клітин, порушує баланс родопсину та впливає на контрастну чутливість. Для людини, яка багато працює в темряві із застосуванням світлодіодного ліхтаря, ці ефекти проявляються у вигляді погіршення сприйняття яскравості, зниження контрастності та втоми очей, навіть якщо гострота зору залишається нормальною.

Ще однією важливою відмінністю LED-світла є відсутність інфрачервоного спектра. Лампи розжарювання, як і природні джерела на основі горіння, випромінюють значну частину енергії у ближньому інфрачервоному діапазоні. Це випромінювання, хоча й не бере участі у зоровому процесі, сприяє локальному тепловому балансу сітківки, розширенню капілярів, зменшенню напруги в очних м'язах і прискоренню відновлення після світлового навантаження. Відсутність інфрачервоного компонента у світлодіодному освітленні призводить до того, що око працює у холодному режимі, без

природної підтримки тканинного кровообігу. Це створює додатковий стрес при кожній зміні яскравості і погіршує адаптацію в темряві.

Зорове сприйняття залежить також від рівня спектральної рівномірності. Природне сонячне світло і лампа розжарювання мають безперервний спектр — плавний перехід інтенсивності від однієї довжини хвилі до іншої. Це означає, що колбочки отримують пропорційне навантаження, а мозок — рівномірний сигнал. LED-світло, навпаки, характеризується спектром із різкими піками і провалами. Така спектральна нерівномірність змушує зорову систему постійно перераховувати адаптаційні коефіцієнти, що підвищує нейронне навантаження та знижує стійкість до яскравих перепадів.

Особливо небезпечним є вплив холодних LED-джерел у темряві. Коли зіниця максимально розширена, сітківка отримує значно більшу дозу синього випромінювання. Це прискорює процеси фотоокислення, які руйнують клітини пігментного епітелію. Людині може здаватися, що ліхтарик світить дуже яскраво та чітко, але при щоденному використанні мозок поступово змінює свою реакцію на світлові сигнали, і людина помічає зниження контрастності, зменшення здатності розрізняти півтони та загальне «засвічення» нічного зору. Це не погіршує гостроту зору як таку, але змінює якість зорової інформації [30].

Фізіологічно людське око найкраще пристосоване до жовто-теплих спектрів освітлення. У цьому діапазоні фоторецептори працюють із мінімальним навантаженням, а мозок отримує найбільш природні сигнали. Саме тому світло лампи розжарювання, яке має максимум випромінювання у жовто-червоній частині спектра, залишається найбільш комфортним для роботи у вечірній та нічний час. Теплі LED-джерела можуть частково наблизитись до цього спектра, але їхній спектр залишається переривчастим і з певною синьою складовою. виправити це можливо лише за допомогою повноспектральних діодів, які значно дорожчі та не застосовуються у масовому виробництві дешевих ліхтарів та ламп.

Психоемоційний вплив освітлення також є важливим фактором. Холодне біле світло активує симпатичну нервову систему, підвищує рівень кортизолу та

знижує вироблення мелатоніну, що порушує добові ритми. Тепле світло, навпаки, сприяє розслабленню, стабілізує нервову систему та не впливає негативно на гормональний баланс. У виробничих приміщеннях правильне освітлення визначає концентрацію, точність рухів та ступінь втоми персоналу, що є особливо важливим під час роботи з високоточним обладнанням та дрібними електронними компонентами.

З точки зору офтальмології, найкращими спектрами для тривалої роботи є ті, що максимально наближені до природного теплого світла. Це означає не лише правильну температуру кольору (наприклад, 2700–3000 K), але й високу індексацію кольорів (CRI понад 90), мінімальну пульсацію світла та відсутність різких спектральних піків. Лише за таких умов зоровий апарат працює у природному режимі, зберігаючи контрастну чутливість, безперервність адаптації та стабільність нічного зору.

Таким чином, тип освітлення має вирішальний вплив на стан зорової системи. Синій пік LED-джерел, відсутність інфрачервоного випромінювання, спектральна нерівномірність та висока яскравість у темряві створюють сукупне навантаження, що проявляється у вигляді перенапруги фоторецепторів, зниження контрастності та порушення природної чутливості до яскравості. Теплі, спектрально плавні джерела світла, навпаки, зберігають природну роботу зорового апарата і є найбільш безпечними для тривалої роботи. Саме це обґрунтовує необхідність правильної системи освітлення у виробничих приміщеннях та автоматизованих системах управління освітленням.

## **2.5 Висновки до розділу 2.**

У результаті розгляду системи пошарової вентиляції у цеху з виробництва безпілотних літальних апаратів встановлено, що такий підхід є найбільш ефективним для умов, у яких одночасно присутні різномірні забруднюючі речовини, теплові потоки та зони активної діяльності персоналу. Пошарова організація повітрообміну дозволяє розділити повітряний простір цеху на функціональні зони, кожна з яких характеризується власними

параметрами температури, концентрації пилу, газоподібних домішок та швидкості руху повітря. Це забезпечує цілеспрямоване видалення карбонового пилу у верхніх шарах, ефективно відведення парів флюсів і припоїв у зоні дихання працівників, а також контроль важчих фракцій і залишкових аерозолів у нижній частині приміщення. Такий принцип вентиляції зменшує перемішування шарів, підвищує ефективність очищення повітря та знижує загальне навантаження на вентиляційне обладнання.

Аналіз типів давачів і модулів контролю мікроклімату показав, що для забезпечення стабільної роботи системи необхідно застосовувати комплекс вимірювальних засобів, орієнтованих на контроль ключових параметрів повітряного середовища. Давачі температури і вологості дозволяють підтримувати комфортні та технологічно допустимі умови у кожному повітряному шарі, тоді як сенсори концентрації пилу забезпечують оперативне реагування на процеси механічної обробки карбонового волокна. Газоаналізатори та датчики летких органічних сполук відіграють ключову роль у зоні пайки та очищення електронних компонентів, дозволяючи запобігати накопиченню шкідливих парів. Доповнення системи модулями контролю швидкості повітряних потоків та тиску забезпечує баланс вентиляційної мережі і стабільність роботи вентиляторів у змінних режимах навантаження. Сукупність таких давачів формує повну інформаційну картину стану мікроклімату, яка є основою для прийняття керуючих рішень.

Розроблений алгоритм роботи автоматизованої системи мікроклімату ґрунтується на принципі адаптивного керування, при якому продуктивність вентиляторів, положення заслінок і режими повітрообміну змінюються відповідно до поточних показників кожного шару. Система у реальному часі аналізує температуру та концентрацію відповідних речовин у повітрі, визначає відхилення від нормативних або оптимальних значень та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. Такий алгоритм дозволяє уникати різких переходів між режимами, забезпечує плавну зміну продуктивності вентиляційних установок та підтримує стабільність мікроклімату навіть при

різкій зміні характеру робіт у цеху. Важливою особливістю алгоритму є його здатність працювати незалежно для кожного повітряного шару, що підвищує точність регулювання і запобігає надлишковому повітрообміну.

Узагальнення результатів показує, що поєднання пошарової вентиляції, розгалуженої системи давачів і адаптивного алгоритму керування дозволяє створити ефективну автоматизовану систему мікроклімату, яка відповідає специфічним вимогам виробництва безпілотних літальних апаратів. Така система забезпечує високий рівень безпеки праці, зменшує вплив шкідливих факторів на персонал, підвищує стабільність технологічних процесів та створює умови для виготовлення високоякісної продукції. Реалізація запропонованих рішень є технічно обґрунтованою та доцільною з точки зору сучасних вимог до автоматизації промислових об'єктів.

## РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-РЕКОМЕНДАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ

### **3.1 Автоматизація системи освітлення у виробничому цеху з виготовлення дронів: принципи, алгоритми та технологічні рішення.**

Система освітлення у виробничих приміщеннях, де здійснюється складання дронів, робота з високоточними компонентами, обробка композитів, паяння та калібрування сенсорів, виконує не лише функцію забезпечення видимості, але й відіграє вирішальну роль у підтриманні фізіологічного стану працівників, стабільності їх концентрації та точності виконання технологічних операцій. Точність моторики, якість зорової адаптації, швидкість реакції та стійкість уваги безпосередньо залежать від спектральних характеристик світла, рівня освітленості, відсутності мерехтіння та відповідності освітлення природним біоритмам людини. Тому у сучасному виробництві все частіше застосовуються автоматизовані системи освітлення, які здатні адаптуватися до потреб персоналу, характеристик робочого середовища та технічних процесів [19].

Автоматизація освітлення ґрунтується на розумінні того, що зоровий апарат людини працює оптимально лише в умовах спектрально збалансованого світла, максимально наближеного до природного теплого спектра, у якому переважають жовто-зелені та м'які червоні компоненти. Це світло забезпечує мінімальне навантаження на фоторецептори, не викликає фотохімічного стресу, не знижує контрастну чутливість та не призводить до довгострокових змін у зоровому сприйнятті. Тому система автоматизації повинна забезпечувати такі спектральні параметри освітлення, які відповідають природній фізіології зору, а також адаптувати їх залежно від часу доби та характеру технологічних процесів.

Ключовим елементом автоматизованої системи освітлення є використання багатоканальних світильників, у яких світловий потік формується не одним типом світлодіода, а декількома незалежними каналами — теплим білим, нейтральним білим, янтарно-жовтим, червоним та інколи зеленим. Це

дозволяє змінювати спектральний розподіл світла у широкому діапазоні. Контролер, отримуючи дані від спектрального сенсора, визначає, який компонент має домінувати у поточний момент, щоб забезпечити комфортні умови для очей. Особливе значення має пригнічення синього піка, оскільки він створює найбільше навантаження на сітківку. Автоматизована система повинна підтримувати мінімальний рівень синьої складової, достатній для правильної передачі кольорів, але недостатній для фотохімічного перенапруження.

Система освітлення включає датчики освітленості, кольорової температури та спектрального розподілу світла. Такі датчики, як AMS AS7341, зображений на Рисунку 3.1, AMS TCS3472, Lite-On LTR-303, Vishay VEMML6040, або аналогічні, дозволяють контролеру отримувати точну інформацію про спектр світла у приміщенні. Датчики вимірюють кількість червоного, зеленого, синього та інфрачервоного світла, визначають колірну температуру та індекс передачі кольору, а також аналізують, наскільки штучне світло збалансоване відносно природних умов. На основі цих даних система коригує інтенсивність кожного світлодіодного каналу, забезпечуючи необхідну спектральну плавність.



Рис 3.1 Датчик освітленості, кольорової температури та спектрального розподілу світла Vishay VEMML6040.

Алгоритм автоматизації освітлення враховує також рівень зовнішнього природного світла, якщо у приміщенні є вікна або світлові лінії. Датчики DALI Daylight, Siemens QRB, Osram Light Sensor або інші фотометричні сенсори

аналізують, наскільки інтенсивним є природне світло, і система підлаштовує штучне освітлення так, щоб підтримувати постійний рівень освітленості. Це дозволяє уникати перевантаження очей у години яскравої сонячної активності та забезпечує комфорт у похмурі дні або у нічний час.

Автоматизація освітлення здійснюється за допомогою промислового контролера, який виконує функцію регулювання спектра, яскравості та стабільності світлового потоку. Контролер аналізує дані про рівень освітленості, спектр і присутність персоналу, а також інформацію про характер технологічних процесів у конкретній зоні. Наприклад, у зоні паяння необхідне більш тепле світло з мінімальною синьою складовою, оскільки холодне світло погіршує видимість тонких деталей і сприяє втомі очей. У зоні складання електроніки використовують світло з правильною передачею кольорів, що дозволяє точно визначати якість компонентів. У зонах тестування та калібрування камер або оптичних сенсорів потрібне світло з високою стабільністю спектра, оскільки будь-які коливання можуть вплинути на точність калібрування [9].

Особливу увагу автоматизована система приділяє часовим аспектам освітлення. Відомо, що холодне біле світло активує симпатичну нервову систему, підвищує рівень збудження та підходить для короткочасних активних операцій, але є шкідливим при тривалому використанні. Тепле світло, навпаки, стабілізує нервову діяльність, сприяє тривалому фокусуванню та підвищує точність роботи. Тому система може автоматично змінювати спектр протягом робочої зміни: у ранковий час застосовувати більш нейтральний спектр, у періоди максимальної зорової напруги переходити до теплого спектра, а за кілька годин до завершення зміни — ще більше знижувати синю складову, щоб уникнути перенавантаження зору.

Автоматизована система передбачає також регулювання інтенсивності світла залежно від ступеня зорового навантаження. Коли працівник виконує операції з дрібними деталями, система може локально збільшувати освітленість у робочій зоні. Після завершення операції світло автоматично зменшується до

базового рівня. Це дозволяє зберегти енергію, продовжити строк служби світильників і мінімізувати втому очей. Датчики присутності та позиційні сенсори забезпечують точність такого регулювання.

У зонах, де працівники часто переходять із світла в темряву або навпаки, автоматична система враховує час адаптації зору. Різкі перепади яскравості можуть спричиняти тимчасове осліплення, що негативно впливає на якість виконання операцій. Тому система плавно змінює світловий потік, забезпечуючи комфортний перехід між різними зонами. У темних приміщеннях, де використовуються ліхтарі, автоматизована система може пригнічувати синю складову, щоб зменшити фотохімічне навантаження на сітківку.

Автоматизація також зменшує негативний вплив світлової пульсації. Дешеві світлодіоди часто мерехтять із частотою 100–120 Гц, що хоч і непомітно для ока, але створює додаткове навантаження на нервову систему та може викликати головний біль або втому. Система автоматизації використовує драйвери з високою частотою модуляції, що забезпечує стабільний світловий потік без мерехтіння.

У підсумку автоматизована система освітлення створює умови, що максимально відповідають фізіологічним потребам людини і технологічним вимогам виробництва. Вона забезпечує правильний спектр, стабільну яскравість, плавні переходи, мінімальний рівень синього випромінювання та адаптацію до часу доби і характеру робіт. Це підвищує точність технологічних процесів, знижує ризик помилок, покращує самопочуття персоналу та підвищує загальну ефективність виробництва.

Автоматизована система освітлення виробничого цеху з виготовлення дронів базується на застосуванні точних спектральних датчиків, сенсорів освітленості, датчиків руху, комбінованих фотометричних елементів та спеціалізованих світлодіодних світильників із розширеним або регульованим спектром. Кожен із цих елементів виконує окрему функцію в загальній системі підтримання комфортних, фізіологічно правильних та стабільних умов

освітлення. Важливим фактором є те, що всі модулі повинні бути доступними на ринку, легко визначуваними за моделлю, з широким спектром технічної документації, що дозволяє забезпечити їхнє коректне застосування в автоматизованій системі. Саме такі пристрої ми розглянемо нижче.

Основним елементом, що визначає якість освітлення, є спектральний датчик. На відміну від простих фотодіодів, які вимірюють лише загальний рівень світла, спектральні сенсори аналізують розподіл інтенсивності на різних довжинах хвиль, що дозволяє контролеру оцінювати правильність спектра штучного освітлення. Найпоширенішим у промислових системах є датчик AMS AS7341 — багатоканальний спектрофотометр, який працює у восьми окремих діапазонах, включаючи червоний, зелений, синій, ближній інфрачервоний та додаткові широкосмугові канали. Цей датчик здатний вимірювати спектральний профіль у режимі реального часу та передавати дані контролеру, що дозволяє регулювати співвідношення теплих і холодних світлових каналів у світильниках. Другим поширеним варіантом є TCS3472 від AMS, який комбінує RGB-аналізатор і датчик освітленості. Для високоточного контролю кольору застосовується сенсор VEMML6040 від Vishay або мультиспектральний модуль AS7262, що працює у шести вузьких діапазонах.

Не менш важливим є датчик освітленості, який дозволяє автоматизувати зміну інтенсивності світильників залежно від часу доби, природного освітлення або конкретних вимог технологічної ділянки. Серед найбільш відомих моделей можна виділити BH1750FVI, зображений на Рисунку 3.1, широко застосовуваний у промислових і лабораторних системах. Він здатний визначати освітленість у широкому діапазоні від слабкого освітлення до прямого сонячного світла. Іншим варіантом є Texas Instruments OPT3001 — сенсор з високою точністю та температурною стабільністю. У професійних системах діапазоном до декількох сотень тисяч люкс користуються сенсорами Osram SFH 5711 або Vishay VEMML7700.

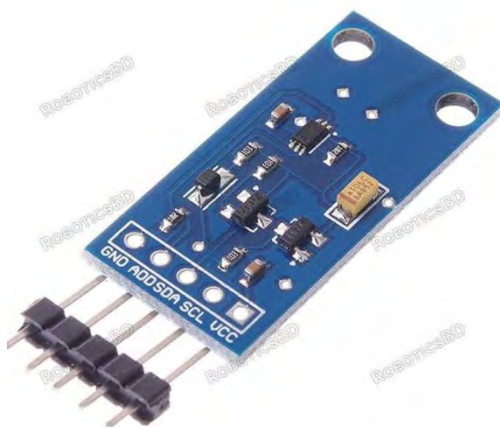


Рис 3.1 Датчик освітленості BH1750FVI.

Для оптимізації освітлення з урахуванням активності працівників використовуються датчики руху та присутності. Найпоширенішими у промислових системах є модулі на основі PIR-технології, наприклад Panasonic EKMB або EKMC серії. Для точнішого аналізу мікрорухів застосовуються сенсори Omron D6T, здатні фіксувати теплове випромінювання людей. У зонах високої точності використовуються ToF-сенсори або мікрохвильові датчики NB100, які дозволяють визначати не лише присутність, а й напрямок руху, що дає системі можливість плавно регулювати освітлення залежно від активності персоналу [1].

Окрему роль у системі автоматизації відіграють датчики ближнього інфрачервоного та ультрафіолетового спектра. Хоча вони не використовуються у кожному виробництві, у цехах з калібрування камер, оптичних сенсорів, лазерних далекомірів та модулів навігації ці датчики дозволяють контролювати небажані спектральні домішки, які можуть впливати на точність тестування оптики. До таких модулів належать UV-сенсори VEMML6075 та IR-детектори Everlight серії IRD.

Важливим елементом автоматизованої системи є світильники спеціального спектрального виконання. На відміну від стандартних світлодіодних світильників, які мають лише одну “білу” матрицю, ці світильники містять кілька самостійних світлодіодних каналів, кожен з яких

відповідає за окрему частину спектра. Найбільш поширені канали: теплий білий (2700–3000K), нейтральний білий (4000K), жовтий або янтарний діод (590 нм), червоний діод (620–630 нм) та інколи зелений діод (530 нм). Така конструкція дозволяє створювати гнучкий спектр світла, максимально наближений до лампи розжарювання, але без недоліків енергоспоживання. На ринку представлені моделі від Philips Hue White Ambiance, Osram Tunable White, світильники серії Yeelight SunMatch або професійні системи Helvar Active-Tunable. Вони підтримують можливість спектрального налаштування, мають високий індекс передачі кольору та мінімальну пульсацію.

Суттєве значення має застосування драйверів високої частоти, які забезпечують відсутність мерехтіння у світлодіодних світильниках. Більшість дешевих LED-ламп працюють з частотою мерехтіння 100–120 Гц, що хоч і непомітно на перший погляд, але створює додаткове навантаження на нервову систему. У промислових системах застосовуються драйвери Mean Well серій HBG або ELG, Philips Xitanium, Osram OTi, які забезпечують стабільне живлення без пульсацій світлового потоку.

Усі ці елементи об'єднуються у єдину мережу керування — зазвичай через DALI-інтерфейс, KNX-мережу або Modbus. Контролер у реальному часі отримує дані від спектральних сенсорів, датчиків руху та фотометричних модулів, після чого змінює співвідношення каналів світильників, інтенсивність випромінювання та характер світлового середовища. Таким чином система автоматизації здатна підтримувати стабільно комфортні умови для персоналу, мінімізуючи негативний вплив холодного білого світла та зберігаючи природну роботу зорового апарата.

Алгоритм роботи автоматизованої системи освітлення у виробничому приміщенні з виготовлення дронів ґрунтується на принципі динамічної відповідності світлового середовища фізіологічним потребам людини та вимогам технологічного процесу. Система аналізує спектр, рівень освітленості, активність персоналу, кількість природного світла, тип виконуваних робіт та

час доби, після чого приймає рішення про оптимальне поєднання світлових каналів, інтенсивності та спектрального розподілу освітлення [13].

На першому етапі система здійснює збір даних від усіх сенсорів. Спектральний датчик визначає співвідношення червоних, зелених, синіх та жовтих компонентів у світловому потоці, а також рівень інфрачервоного та ультрафіолетового світла. Фотометричний датчик вимірює загальну освітленість у люксах. Датчики руху та присутності аналізують, чи знаходяться люди в конкретній зоні, та визначають їхню активність, що дозволяє системі регулювати інтенсивність світла залежно від потреби. Якщо у приміщенні є вікна, датчик природного освітлення визначає, наскільки сильно світло ззовні впливає на внутрішній світловий баланс.

Далі контролер порівнює отримані дані з моделлю бажаного спектра. У ранкові години система підтримує більш нейтральне світло, яке забезпечує достатню передачу кольорів і хорошу видимість деталей. У період інтенсивної роботи вона зменшує синю складову, збільшує частку жовтого та червоного діапазонів, тим самим знижуючи фотохімічний стрес і підтримуючи контрастну чутливість. У вечірній час система поступово переходить до теплого світла, яке мінімізує навантаження на зоровий апарат та допомагає стабілізувати циркадні ритми працівників.

Якщо рівень природного освітлення збільшується, автоматична система зменшує інтенсивність штучного світла, зберігаючи загальний рівень комфортного освітлення в робочій зоні. Якщо природне світло зникає, контролер плавно підвищує інтенсивність штучних світильників, забезпечуючи безперервну адаптацію зору без різких контрастів.

У разі виконання робіт, що вимагають високої точності — таких як паяння або монтаж оптичних компонентів — система активує локальний режим. Відповідні світильники переходять на підвищену яскравість, але водночас спектр світла зберігається теплим, із пригніченою синьою складовою, що зменшує втому очей під час дрібної моторики. Коли працівник залишає цю

зону, датчик присутності сигналізує контролеру, і система повертається у стандартний режим.

Якщо спектральний сенсор фіксує надлишок синього світла — наприклад, через відбиття від металевих поверхонь або потрапляння зовнішнього світла — контролер зменшує синій канал світильників або збільшує інтенсивність янтарного та червоного каналів. Таке коригування дозволяє зберігати природність зображення та мінімізувати фотострес.

Особливе значення має реалізація плавних переходів освітлення. Зміна спектра або яскравості здійснюється повільно, в межах десятків секунд, що дозволяє зорові адаптаційній системі налаштовувати чутливість без перенапруження. Це особливо важливо в технологічних зонах, де робітники часто переміщуються між ділянками з різною освітленістю.

Алгоритм передбачає також аварійні сценарії — різке падіння освітленості через відмову світильника, виявлення мерехтіння, надлишок холодної компоненти чи раптове погіршення видимості. У цьому разі система активує резервні світильники, відсікає дефектний канал або підсилює теплу складову, забезпечуючи безперервність виробничого процесу.

У підсумку автоматизована система освітлення створює динамічне середовище, яке адаптується до фізіологічних властивостей людського зору та технологічних вимог. Вона забезпечує оптимальну спектральну структуру, стабільну інтенсивність світла, плавні переходи та правильний баланс кольорових компонентів, що є вирішальним для комфорту працівників і точності виконання операцій.

### **3.2 Інтегрована система автоматизованого керування мікрокліматом і освітленням на базі промислових контролерів.**

Об'єднання систем вентиляції, мікроклімату та освітлення у виробничому цеху з виготовлення дронів в єдину інтегровану систему автоматизації дозволяє перейти від локального, фрагментованого керування окремими підсистемами до комплексного управління станом виробничого середовища, зображена на

рисунках 3.3, 3.4. У такій концепції контролер розглядає цех не як набір розрізнених пристроїв, а як єдиний живий об'єкт з власною динамікою теплових, повітряних і світлових процесів. Це принципово підвищує рівень керованості, зменшує енерговитрати, підвищує безпеку працівників і стабільність технологічних операцій.



Рис 3.3 Система вентиляції, мікроклімату у виробничому цеху.

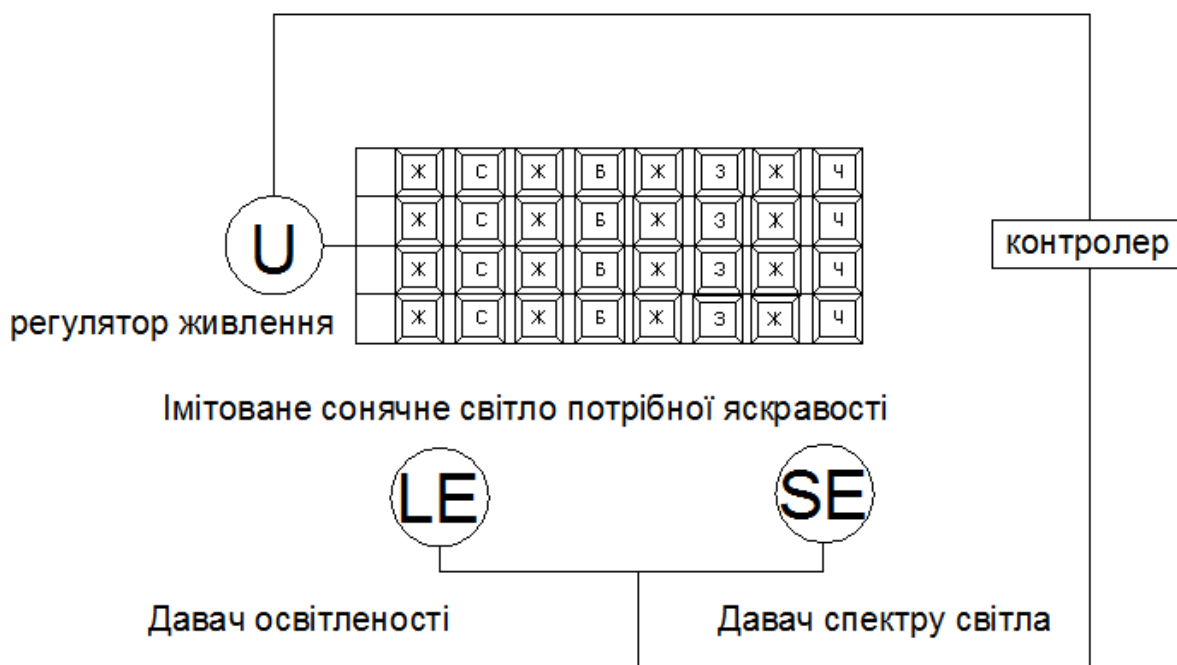


Рис 3.4 Система освітлення у виробничому цеху.

Ядром інтегрованої системи є промисловий програмований логічний контролер, який виконує роль центрального елемента, що збирає інформацію з усіх датчиків, обробляє її за заздалегідь закладеними алгоритмами та видає керуючі дії на виконавчі механізми як систем вентиляції, так і освітлення. У загальному випадку до складу такої системи входить один центральний контролер середнього або високого класу (наприклад, з родини Siemens S7-1200, Schneider Modicon, Omron, Wago або аналогічних), а також група розподілених периферійних модулів введення-виведення, розташованих поблизу зон вентиляційного обладнання та освітлювальних ліній. Обмін даними між ними здійснюється через промислові мережі типу PROFINET, Modbus TCP, EtherNet/IP або інші сучасні протоколи [24].

Фундаментальним принципом інтеграції є спільне використання інформації. Наприклад, датчики присутності, які використовуються для адаптивного керування освітленням, одночасно забезпечують систему вентиляції інформацією про фактичну зайнятість робочої зони. Якщо контролер бачить, що у певному сегменті цеху протягом тривалого часу немає людей, він

може не тільки зменшити освітленість, але й перевести вентиляцію цього сегмента у режим зниженої інтенсивності, зберігаючи лише фоновий повітрообмін, необхідний для підтримання загальних гігієнічних норм. Навпаки, при збільшенні активності персоналу система підвищує як рівень освітлення, так і продуктивність вентиляційних рівнів, забезпечуючи одночасно комфортну видимість, відведення тепла та видалення забруднень.

Інтеграція мікроклімату та освітлення також ґрунтується на врахуванні теплового впливу світильників. Навіть світлодіодні світильники, незважаючи на їхню високу енергоефективність, виділяють певну кількість тепла, яке впливає на загальний тепловий баланс приміщення. При традиційному роздільному проектуванні система освітлення та система вентиляції не “знають” одна про одну, тому вентиляція не враховує додаткового теплового навантаження від освітлення, а освітлення не враховує вплив вентиляційних потоків на комфорт працівників. У інтегрованій системі контролер має можливість оцінювати загальну теплову картину — він знає, які групи світильників увімкнені, з якою потужністю працюють, як це впливає на підвищення температури у верхній частині приміщення, і відповідно коригує роботу верхнього вентиляційного рівня.

Таким чином, при активному освітленні в певній зоні система може збільшити інтенсивність видалення тепла у верхньому шарі, запобігаючи перегріванню приміщення та збереженню стабільної температури у зоні дихання. Якщо ж освітлення переводиться у режим зниженої яскравості або частина світильників відключається, контролер автоматично зменшує продуктивність витяжних вентиляторів, не допускаючи надмірного охолодження. Це створює замкнене енергетичне коло, в якому освітлення і вентиляція працюють узгоджено, а не хаотично [35].

Інтегрована система автоматизації використовує єдину базу даних про стан виробничого середовища. У ній зведені значення температури, вологості, концентрації пилу, летких органічних сполук, рівня CO<sub>2</sub>, параметри спектра освітлення, рівень освітленості, стан присутності людей, активність

технологічного обладнання. Контролер, аналізуючи цей багатовимірний масив, приймає не локальні, а комплексні рішення. Наприклад, якщо концентрація пилу у середній зоні зростає при одночасному підвищенні температури та активній роботі світильників над зоною шліфування карбону, система одночасно реалізує кілька дій: збільшує продуктивність середнього та нижнього вентиляційних рівнів, переходить у більш теплий спектр освітлення з меншою інтенсивністю синьої компоненти, злегка зменшує загальну яскравість для зниження зорового навантаження та підвищує приток свіжого повітря.

З технічної точки зору інтеграція реалізується через програмні модулі в ПЛК, що відповідають за окремі функціональні підсистеми, але працюють у спільному інформаційному полі. Один програмний блок відповідає за керування пошаровою вентиляцією, інший — за освітлення, третій — за мікроклімат (температура, вологість), четвертий — за аварійну сигналізацію, п'ятий — за енергозбереження. Над ними працює координаційний модуль, який отримує ключові параметри від кожного блоку, розставляє пріоритети та приймає рішення в конфліктних ситуаціях. Наприклад, якщо необхідно зменшити енергоспоживання, система може тимчасово знизити інтенсивність освітлення та вентиляції в незавантажених зонах, але не допустить погіршення параметрів мікроклімату в зонах, де виконуються критичні технологічні операції.

Особливе місце в інтегрованій системі займає модуль аварійного реагування. У разі різкого збільшення концентрації шкідливих речовин, появи диму, запаху горіння або надмірного нагрівання певної ділянки, система діє комплексно: вона негайно підсилює витяжну вентиляцію відповідного шару, збільшує приток свіжого повітря, може тимчасово збільшити освітленість у небезпечній зоні для покращення видимості, одночасно подаючи звукові та світлові сигнали тривоги. Якщо ситуація стабілізується, система поступово повертається у нормальний режим, знову узгоджуючи роботу вентиляції та освітлення [42].

У інтегрованій системі передбачається також використання верхнього рівня керування у вигляді панелі оператора або SCADA-системи. Це дозволяє оператору бачити повну картину стану виробничого середовища: схему цеху з позначенням температурних зон, рівня освітленості, вентиляційних потоків, стану фільтрів, споживаної потужності. Оператор має можливість вручну коригувати деякі параметри, задавати спеціальні режими (наприклад, режим посиленого очищення повітря перед початком зміни, режим енергозбереження у нічний час, режим ремонтних робіт із підвищеною освітленістю локальних зон). Проте основна логіка підтримання мікроклімату та освітлення залишається на боці автоматизованої системи, яка працює безперервно.

Суттєвою перевагою інтегрованого підходу є можливість довгострокової оптимізації. Контролер або SCADA-система накопичує історичні дані про роботу вентиляції, освітлення, температуру, вологість, концентрації шкідливих речовин, присутність персоналу. На основі цих даних можлива подальша оптимізація алгоритмів: корекція часових профілів освітлення, перерозподіл повітряних потоків, зміна уставок температури та вологості, оптимізація графіка технічного обслуговування фільтрів і вентиляторів. У результаті підприємство отримує не статичну, а “живу” систему, яка поступово стає все точнішою та ефективнішою.

Таким чином, об'єднання систем вентиляції, мікроклімату та освітлення на базі промислових контролерів формує сучасний рівень організації виробничого середовища. Така інтегрована система забезпечує одночасно комфорт, безпеку, стабільність технологічних процесів та енергетичну ефективність. Вона дозволяє розглядати цех з виготовлення дронів як високотехнологічний комплекс, де кожен параметр — від спектра світла до швидкості повітряного потоку — керується не хаотично, а як частина єдиної інженерної стратегії, спрямованої на забезпечення максимальної надійності та якості продукції.

Проектування інтегрованої системи керування мікрокліматом і освітленням виробничого цеху з виготовлення дронів вимагає свідомого вибору

типу промислового контролера та складу модулів вводу/виводу. Від цього вибору залежить не лише функціональність і надійність автоматизованої системи, але й можливість подальшого розширення, інтеграції з додатковими підсистемами, адаптації до змін технологічного процесу та забезпечення єдиного інформаційного середовища для всіх засобів автоматизації. Тому вибір контролера не може бути випадковим або заснованим лише на вартості; він повинен спиратися на комплексний аналіз вимог до системи, кількості та типів сигналів, необхідних комунікаційних інтерфейсів, умов експлуатації та перспектив розвитку підприємства.

З огляду на те, що система об'єднує кілька підсистем — пошарову вентиляцію, загальнообмінну вентиляцію, систему кондиціонування, систему автоматизованого освітлення з регульованим спектром, підсистему контролю мікроклімату та локальні модулі безпеки — до контролера висувуються такі ключові вимоги. Він повинен мати достатній обсяг пам'яті для реалізації складних алгоритмів регулювання, підтримувати роботу з аналоговими та цифровими сигналами різних типів, забезпечувати можливість підключення датчиків із інтерфейсами 4–20 мА, 0–10 В, дискретних входів «сухий контакт», а також мати можливість інтеграції з “розумними” датчиками та шлюзами по промисловим мережам. Крім того, контролер повинен підтримувати сучасні протоколи обміну даними (Modbus TCP, PROFINET, Ethernet/IP або подібні), оскільки інтегрована система потребує єдиної мережевої структури для зв'язку з частотними перетворювачами вентиляторів, драйверами освітлення, панелями оператора та, за потреби, системами верхнього рівня (SCADA).

Враховуючи ці вимоги, доцільним є використання програмованого логічного контролера середнього рівня з модульною структурою. Як базовий варіант у цьому проєкті обґрунтовано обирається контролер типу Siemens сімейства S7-1200. Даний тип контролера поєднує в собі достатню обчислювальну потужність, наявність вбудованих цифрових та аналогових входів/виходів (у базових модулях), можливість розширення за рахунок додаткових модулів вводу/виводу, а також підтримку стандартних мережевих

протоколів на базі Ethernet. Контролери цієї серії розраховані на промислову експлуатацію, мають стійкість до електромагнітних завад, передбачені для роботи у складних умовах та підтримуються широкою лінійкою периферійного обладнання [48].

CPU 1214C або аналогічної, яка має достатню кількість вбудованих дискретних входів і виходів, а також кілька аналогових каналів, які можуть бути використані для підключення базових датчиків температури та тиску. Однак, з огляду на велику кількість вимірювальних приладів, що застосовуються в системі мікроклімату та освітлення, до складу контролера додаються модулі розширення: модулі аналогового вводу для роботи з датчиками температури, вологості, тиску, концентрації CO<sub>2</sub>, датчиками PM2.5/PM10 із виходом 0–10 В або 4–20 мА, а також модулі аналогового виводу для керування частотними перетворювачами, електроприводами заслінок або драйверами світильників у режимі аналогового регулювання. Окремо передбачається застосування модулів дискретного вводу/виводу для зчитування станів кінцевих вимикачів, сигналів аварій, сухих контактів від зовнішніх пристроїв захисту та формування команд на пуск/зупинку вентиляторів, відкривання/закривання заслінок та вмикання груп світильників.

У підсистемі вентиляції більшість датчиків тиску, температури, потоку та концентрації шкідливих домішок виконані з уніфікованим аналоговим виходом 4–20 мА, який є галузевим стандартом. Для їхнього підключення передбачається застосування модулів аналогового вводу з гальванічною розв'язкою, що забезпечують точне вимірювання сигналів і захист контролера від перешкод. Датчики перепаду тиску у повітроводах, наприклад, на основі промислових перетворювачів, підключаються до таких модулів і дозволяють контролеру керувати режимами роботи пошарової вентиляції. Датчики температури та вологості можуть бути як із аналоговим виходом, так і цифрові (Modbus RTU, BACnet), у такому разі застосовуються окремі комунікаційні модулі або gateway-пристрої, що перетворюють цифровий протокол у Modbus TCP або інший протокол, доступний для ПЛК.

У підсистемі освітлення, де використовуються спектральні датчики, фотодіодні сенсори освітленості й датчики присутності, теж необхідна гнучка структура вводу. Частина таких сенсорів (наприклад, прості датчики освітленості чи присутності) може мати вихід 0–10 В або дискретний вихід, який напряду підключається до відповідних модулів вводу. Багатоканальні спектральні сенсори, які працюють по I<sup>2</sup>C або UART, у промисловій системі доцільно підключати через проміжний локальний мікроконтролерний модуль або спеціалізований gateway, який перетворює їхні дані у формат Modbus RTU або Modbus TCP для сприйняття ПЛК. Це дозволяє розвантажити центральний контролер від низькорівневого оброблення даних і працювати із спектральною інформацією вже на рівні усереднених параметрів: кольорова температура, індекс передачі кольору, співвідношення основних компонент.

Ядром вихідної частини системи є модулі аналогового виводу та дискретні релейні або транзисторні виходи. Аналоговий вивід використовується для керування частотними перетворювачами вентиляторів (за сигналом 0–10 В або 4–20 мА), що дозволяє плавно змінювати продуктивність верхнього, середнього та нижнього вентиляційних рівнів. Так само аналоговими сигналами можуть керуватися драйвери світильників із функцією димування, які змінюють яскравість і, при багатоканальній схемі, співвідношення теплого і холодного каналів. Дискретні виходи контролера використовуються для формування команд “пуск/стоп” на магнітні пускачі вентиляторів, вмикання окремих груп освітлення в різних зонах цеху, активації аварійних сигналізацій, переведення системи в спеціальні режими (наприклад, режим передпускового очищення повітря або режим аварійного провітрювання).

З метою спрощення кабельного господарства доцільно застосувати розподілену структуру вводу/виводу. Частина модулів вводу/виводу розміщується у головному щиті керування, що розташований в апаратній або електрощитовій. Інша частина — у локальних щитах або коробках у безпосередній близькості до обладнання: на даху цеху біля вентиляторних

установок, у технічних зонах над стелею, поряд із групами світильників, у шафах керування освітленням. Між центральним контролером та периферійними модулями організується мережа PROFINET або Modbus TCP, що дозволяє передавати дані по одному кабелю Ethernet замість десятків або сотень індивідуальних аналогових та дискретних ліній [40].

Альтернативні рішення — такі як використання контролерів Schneider Modicon або Wago PFC — також можуть бути застосовані, однак у межах даного проєкту вибір на користь Siemens S7-1200 зумовлений поширеністю цього обладнання на ринку, наявністю розгалуженої мережі сервісної підтримки, широкою лінійкою модулів вводу/виводу, можливістю інтеграції з системами диспетчеризації та SCADA, а також досвідом використання таких контролерів у системах вентиляції та освітлення промислових і громадських будівель. Це дозволяє розробити систему, яка є не лише функціонально повною, але й легко масштабованою, ремонтпридатною та сумісною з усталеними промисловими стандартами.

У підсумку, вибір контролера та модулів вводу/виводу в даному проєкті базується на принципах модульності, масштабованості, сумісності з різними типами датчиків і виконавчих механізмів, а також на можливості створення єдиного інтегрованого інформаційного простору для всіх підсистем мікроклімату та освітлення. Такий підхід забезпечує довгострокову гнучкість системи, її адаптивність до розвитку виробництва та стабільну роботу в умовах складного, багатofакторного технологічного середовища цеху з виготовлення дронів.

### **3.3 Індивідуалізована система адаптивного освітлення.**

Створення сучасних виробничих середовищ, особливо таких, що пов'язані зі збиранням високоточної електроніки, композитних матеріалів та оптико-електронних модулів для безпілотних літальних апаратів, потребує принципово нового підходу до організації робочих місць і параметрів мікроклімату. Одним із ключових компонентів, що визначають якість роботи та

ефективність технологічних процесів у таких умовах, є система освітлення. Традиційні концепції освітлення базуються на глобальному підході — створенні рівномірного світлового поля у приміщенні незалежно від того, де саме і в якому положенні працює конкретний працівник. Однак у виробництві, де якість зорового аналізу та точність моторики безпосередньо впливають на кінцевий результат, такого підходу стає недостатньо.

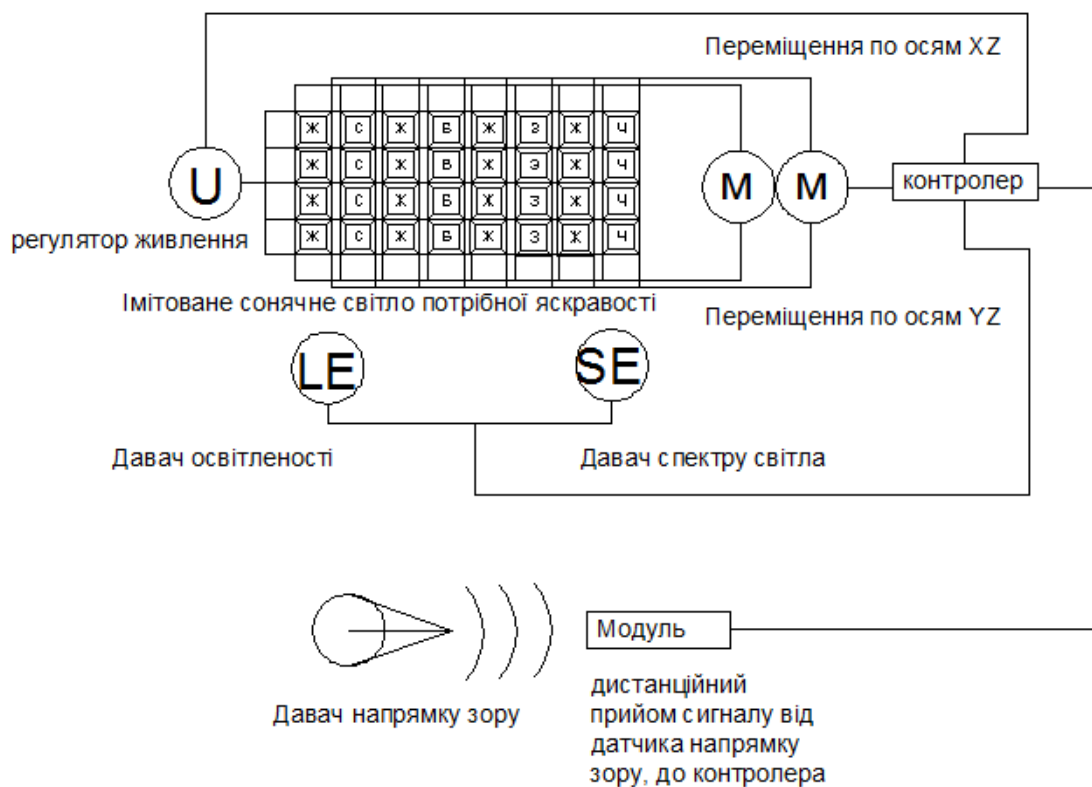
Доцільність упровадження індивідуалізованої системи адаптивного освітлення зумовлена сукупністю технічних, ергономічних, фізіологічних та безпекових факторів. Найперше, у цехах з виготовлення дронів працівники виконують широкий спектр операцій, що вимагають високого рівня зосередженості та точного зорового контролю. Це монтаж друкованих плат, робота з мікроскопічними компонентами, розведення й залуження провідників, калібрування сенсорних модулів, формування корпусних елементів із карбонового волокна. Кожна з цих операцій передбачає, що працівник постійно змінює позицію голови, кут огляду та орієнтацію робочих інструментів. У таких умовах статичне освітлення, яке спрямоване лише на окрему ділянку столу чи робочої поверхні, не забезпечує оптимального візуального комфорту [27].

Традиційне виробниче освітлення має кілька фундаментальних недоліків, які стають критичними в умовах точного складання дронів. По-перше, інтенсивність світла на робочому полі не є стабільною: при зміні положення тіла працівника, нахилі голови або роботі із складними просторовими конфігураціями він може опинитися у тіні, що змушує його компенсувати нестачу світла перенапруженням зору або використанням додаткових джерел освітлення — переважно кишенькових або налобних ліхтарів. По-друге, застосування локальних автономних ліхтарів створює додаткові ризики для здоров'я працівників, оскільки більшість таких ліхтарів працює на основі світлодіодів з різко вираженим синім піком у спектрі, що призводить до підвищеного фотохімічного навантаження на сітківку, зниження контрастної чутливості та накопичення зорової втоми. По-третє, автономні джерела світла,

як правило, створюють точкове освітлення з дуже вузьким кутом променя, що формує високий градієнт яскравості та підвищує ризик відблисків, засвітів та контрастних перепадів, які ускладнюють сприйняття деталізованих елементів.

У контексті сучасних вимог до ергономіки робочого місця, системи освітлення мають бути не лише енергоефективними та надійними, але й адаптивними — здатними враховувати унікальні індивідуальні параметри роботи кожного працівника. Виробництво БПЛА є сферою, де людина постійно маніпулює малими об'єктами, виконує тонкі точні рухи, працює з дрібними електронними модулями, що вимагають високого рівня освітленості на рівні столу — часто у діапазоні 750–1500 лк. Утім, забезпечити таку освітленість рівномірно та без перевантаження зору практично неможливо при використанні класичних світильників, оскільки інтенсивність світла змінюється залежно від позиції голови працівника та орієнтації його очей у просторі.

Саме тому впровадження системи адаптивного освітлення, яка автоматично визначає напрямок погляду або орієнтацію голови працівника та відповідно коригує параметри освітлення — є інженерно обґрунтованим, фізіологічно виправданим і технологічно доцільним рішенням, інтеграція такої системи у систему освітлення зображена на Рисунку 3.5. Така система дозволяє створити локальний світловий акцент у тій зоні, на яку робітник спрямовує увагу, незалежно від того, у якій позі він працює. Це забезпечує постійний оптимальний рівень освітлення робочого поля, зменшує навантаження на очі, підвищує точність рухів і, що важливо, мінімізує потребу в додаткових шкідливих джерелах світла.



Рисунку 3.5 Система адаптивного освітлення.

У безпосередньому зв'язку з фізіологічними аспектами доцільним є застосування індивідуалізованої системи освітлення, яка працює у тісній взаємодії з інерціальними сенсорами, розташованими на шоломі або захисній масці працівника. Сучасні інерціальні модулі (акселерометри, гіроскопи, магнітометри) забезпечують високу точність визначення просторового положення голови, а отже — дають змогу встановити напрямок поля зору працівника з точністю, достатньою для автоматичного регулювання світлових умов. Датчик, закріплений на головному уборі, не заважає роботі, не обмежує рухи та не створює дискомфорту. Він працює постійно у фоновому режимі, передає дані до контролера, який аналізує їх і формує відповідні команди на систему освітлення [17].

З точки зору ергономіки, індивідуалізоване освітлення має вирішальне значення для зменшення м'язової і зорової втоми. Людина за робочою зміною неусвідомлено робить тисячі мікродій: повертає голову, нахилиється, дивиться

збоку на деталь, піднімає або опускає корпус. Кожен із цих рухів змінює умови освітлення робочої поверхні. У статичній системі освітлення працівник змушений компенсувати це переміщенням рук, тулуба або взагалі використанням додаткових джерел світла. У адаптивній системі всі ці переміщення автоматично компенсуються зміною параметрів освітлення. Таким чином, працівник отримує стабільне світлове середовище, що знижує фізичне навантаження, підтримує високу точність операцій протягом тривалого часу та суттєво зменшує кількість помилок, пов'язаних із візуальною дезорієнтацією.

Окремої уваги заслуговує взаємозв'язок індивідуального адаптивного освітлення з системою загального мікроклімату. Оскільки світильники з регульованим спектром і напрямком випромінювання є частиною інтегрованої системи керування, зміни в освітленні враховуються й у роботі вентиляції та температурного контролю. Це дозволяє формувати більш збалансовані умови праці, зменшувати локальне перегрівання робочих зон і підтримувати оптимальний рівень теплового комфорту.

З точки зору виробничої безпеки доцільність впровадження такої системи полягає у зниженні ризику травмування та помилок під час роботи з високоточними компонентами. Достатній рівень освітлення робочої зони є критично важливим не лише для якості продукції, але й для запобігання порізам, опікам та іншим травмам, що можуть виникнути при недостатній видимості. Адаптивне освітлення автоматично забезпечує оптимальний світловий фон незалежно від індивідуальних рухів працівника, тим самим підвищуючи рівень безпеки [5].

Таким чином, впровадження системи адаптивного освітлення, яка реагує на напрямок погляду працівника, є доцільним, обґрунтованим і необхідним рішенням у контексті сучасного високотехнологічного виробництва дронів. Воно базується на фізіологічних закономірностях зорового сприйняття, відповідає ергономічним вимогам, підвищує продуктивність, безпеку та якість

виконання технологічних операцій, а також дозволяє створити інтелектуальне, адаптивне та енергоефективне виробниче середовище.

Організація освітлення на сучасних виробництвах, де виконується складання безпілотних літальних апаратів, потребує врахування складної взаємодії між фізіологічними можливостями зорової системи людини та технологічними характеристиками виконуваних операцій. Традиційні підходи до формування освітленості в цехах передбачають створення рівномірного світлового поля, однак така концепція базується на припущенні, що працівник здійснює операції в незмінній позі, а робочий об'єкт залишається постійно у визначеній площині. У реальних умовах виробництва це не виконується, оскільки більшість технологічних завдань потребує постійних змін положення тіла, нахилів голови, переміщення рук і зміни зорового фокусу. Така динаміка зумовлює необхідність пошуку нових підходів до створення освітлення, здатного адаптуватися до характеру рухів та напрямку зору працівника.

Фізіологічні характеристики зорового аналізатора людини покладено в основу вимог до адаптивної системи освітлення. Робота з дрібними деталями потребує стійкого фотопічного режиму зору, за якого сітківка отримує достатню кількість світлової енергії для активації колбочок, відповідальних за кольорове сприйняття та розрізнення дрібних структур. Кожна зміна положення голови або фокуса погляду спричиняє зміну розподілу світлової енергії на поверхні сітківки. Якщо освітлення залишається статичним, при нахилі голови утворюються локальні тіні, які погіршують контрастність та знижують деталізацію зображення. У таких умовах виникає потреба підвищувати загальну яскравість світильників, що збільшує навантаження на зорову систему, провокує засвіт фовеа та сприяє розвитку зорової втоми.

Робоче середовище, у якому здійснюється складання дронів, характеризується великою кількістю операцій, що потребують точного зорового контролю. Монтаж електронних компонентів, пайка мікрочипів, калібрування сенсорів, складання карбонових корпусів, формування силових елементів і тестування камер становлять широкий спектр дій, у яких робоча

зона постійно зміщується у просторі. Працівник змінює позу, працює під різними кутами, наближає або віддаляє об'єкти. У кожному випадку статичне освітлення створює різкий контраст між освітленою зоною та тіньовими ділянками, що змушує зорову систему до багаторазових циклів адаптації. Подібні цикли супроводжуються зміною діаметра зіниці, регулюванням акомодатії та постійною перебудовою нейронних механізмів обробки зорової інформації. При значній тривалості робочої зміни такі процеси призводять до помітної втоми, зниження точності рухів і підвищення ризику помилок.

Особливе значення у високоточних виробничих операціях має стабільність світлового поля відносно напрямку погляду. Сітківка людини містить невеличку область максимальної чутливості — фовеа, яка відповідає за найдетальніше зображення. Якщо при зміні положення голови фовеа потрапляє у зону недостатньої освітленості, деталізація різко погіршується. Це змушує працівника переміщувати тулуб або використовувати локальні джерела світла. Останні, як правило, виконані на основі світлодіодів холодного спектра і створюють додаткове фотохімічне навантаження на сітківку, що є небажаним у тривалій перспективі [26].

У виробничих процесах, пов'язаних з використанням композитних матеріалів, виникають додаткові труднощі. Текстура карбонового волокна є контрастною лише при певних кутах падіння світла. Якщо освітлення не адаптується до змін позиції голови працівника, сприйняття фактури поверхні ускладнюється, а ймовірність дефектів у механічній обробці збільшується. Аналогічна ситуація спостерігається під час монтажу мікросхем: блики на паяльних доріжках або мікроконтактах ускладнюють роботу, якщо світильники не підлаштовуються до зони реального фокусування.

Адаптація освітлення до напрямку погляду дозволяє усунути ці недоліки шляхом автоматичного формування локального світлового акценту у тій частині робочої зони, де здійснюється технологічна дія. Такий підхід перетворює освітлення з пасивної системи на активний інструмент, що супроводжує робітника та забезпечує постійну оптимальну інтенсивність світла

незалежно від його позиції. Система, що аналізує орієнтацію голови, здатна з високою точністю визначити, на яку ділянку робочого простору спрямовано погляд. Орієнтаційні сенсори, вбудовані у захисний шолом або кріплення на голові, забезпечують стабільне визначення просторового положення, і їхня точність достатня для формування світлового профілю, що відповідає зоні актуальної діяльності [16].

Технічні характеристики інерціальних модулів, здатних визначати кутові координати з високою частотою оновлення, роблять можливим плавне та непомітне для працівника регулювання напрямку світлового потоку. Це, у свою чергу, забезпечує постійну освітленість фовеальної ділянки сітківки, знижує навантаження на механізми акомодатії та зменшує кількість мікрокорекцій зору. При тривалому виконанні точних операцій такий підхід сприяє зменшенню загальної втоми, підвищенню блочності роботи та зниженню ризику технічних помилок.

З точки зору виробничої ефективності адаптивне освітлення дає змогу оптимізувати енергоспоживання. Оскільки система вмикає максимальну яскравість лише в тій зоні, де зосереджена увага працівника, усі інші зони освітлюються на мінімально необхідному рівні. Це не лише зменшує навантаження на мережу, але й продовжує строк служби світильників. Крім того, адаптивне керування світловим напрямком і спектром дозволяє інтегрувати освітлення у загальну систему мікроклімату, компенсуючи локальні перегриви або впливаючи на тепловий стан приміщення.

Технічні передумови впровадження індивідуалізованої системи освітлення визначаються також розвитком сенсорних технологій. Сучасні інерціальні вимірювальні модулі є мініатюрними, енергоефективними та стійкими до механічних впливів, що робить їх придатними для безперервного використання протягом робочої зміни. У поєднанні з бездротовими каналами зв'язку такі модулі дозволяють будувати розподілену систему керування освітленням, у якій дані передаються до центрального контролера з мінімальною затримкою. Це створює можливість формування складних

адаптивних алгоритмів, що узгоджують освітлення з рухами працівника, режимами вентиляції, параметрами температури та вологості [6].

Узагальнюючи технічні та фізіологічні передумови, можна стверджувати, що статичні системи освітлення не здатні забезпечити оптимальні умови для виконання високоточних операцій у виробництві безпілотних літальних апаратів. Адаптивне освітлення, засноване на визначенні напрямку погляду працівника, відповідає природним механізмам зорового сприйняття, підтримує стабільність освітлення у зоні фовеального бачення, зменшує навантаження на очі та підвищує якість виконання робіт. У технічному аспекті така система є логічним продовженням розвитку автоматизованих виробничих технологій і дає змогу створити високоефективне, ергономічне та безпечне робоче середовище.

Створення інтелектуальної системи адаптивного освітлення, що динамічно реагує на просторові орієнтації працівника, потребує застосування спеціалізованого сенсорного модуля, здатного з високою точністю визначати напрямок погляду або, у загальнішому формулюванні, орієнтацію голови у просторі. Вирішення цього завдання базується на використанні інерціальних вимірювальних модулів, які забезпечують безперервний контроль кутових переміщень, прискорень та положення об'єкта у тривимірній системі координат. Дані модулі є компактними, енергоефективними, мають високу частоту оновлення інформації та характеризуються стійкістю до зовнішніх впливів, що робить їх придатними для постійного носіння працівником у виробничому середовищі.

Архітектура датчика напрямку погляду ґрунтується на поєднанні трьох функціональних складових: інерціального блоку, модуля обробки інформації та каналу бездротової передачі даних. Інерціальний блок складається з акселерометра, гіроскопа та магнітометра, інтегрованих у одному корпусі. Акселерометр вимірює проєкції прискорення на трьох осях, дозволяючи визначити орієнтацію модуля відносно гравітаційного вектора та виявляти нахили голови. Гіроскоп фіксує кутові швидкості, що дає змогу відстежувати

швидкість і напрямок повороту голови у режимі реального часу. Магнітометр визначає орієнтацію відносно магнітного поля Землі, забезпечуючи стабільність азимутального компонента навіть у разі довготривалої зміни положення [20].

Поєднання цих трьох вимірювальних елементів у єдиному модулі створює основу для отримання повної інформації про просторову орієнтацію голови працівника. Високочастотне зчитування даних дозволяє формувати кватерніони або матриці повороту, які описують положення модуля без сингулярностей, властивих класичним параметрам Ейлера. Застосування фільтра комплементарного типу або алгоритмів Калмана дає можливість об'єднувати інформацію акселерометра, гіроскопа та магнітометра у стабільний, коректний орієнтаційний вектор, який характеризується низьким рівнем шумів та дрейфу.

Модуль обробки даних виконує накопичення, фільтрацію та локальне перетворення вимірювальних сигналів. Його завдання полягає у формуванні чистого і фізично однозначного орієнтаційного вектора, придатного для інтерпретації системою освітлення. Обробка даних на локальному рівні дозволяє зменшити навантаження на центральний контролер і забезпечує швидку реакцію на зміни положення голови. Використання мікроконтролера зі спеціалізованим математичним блоком для роботи з кватерніонами та тривимірними перетвореннями є доцільним для забезпечення високої точності та швидкодії.

Бездротовий канал передачі даних є наступним ключовим елементом архітектури датчика. Оскільки модуль розташований на голові працівника, пряме дротове підключення неможливе з точки зору ергономіки та безпеки. Система повинна використовувати стабільний канал зв'язку, що забезпечує малу затримку, низьке енергоспоживання та стійкість до перешкод, характерних для виробничих приміщень. Найбільш придатними є канали з використанням технологій низькопотужного радіозв'язку, що працюють у діапазоні 2,4 ГГц або на частотах субгігагерцового діапазону. Надсилання даних відбувається в компактному форматі з мінімальною кількістю байтів,

оскільки основним параметром є напрямок вектора орієнтації. Такий підхід дозволяє уникнути перевантаження мережі та забезпечити синхронний обмін інформацією з кількома датчиками, якщо в зоні одночасно працює більше одного працівника.

Принцип інтеграції датчика з системою освітлення полягає у використанні отриманих кватерніонів або матриць повороту для визначення просторового напрямку, на який спрямовано погляд. Система інтерпретує дані інерціального модуля як інформацію про вектор, який виходить від точки розташування голови працівника. Для цього у центральному контролері формується модель робочої зони у тривимірному просторі. У моделі враховуються координати робочого столу, положення світильників, межі зони доступу працівника та траєкторії рухів, характерні для конкретного типу операцій. Вектор напрямку погляду перетинає площину робочої поверхні, і точка перетину визначає ділянку, яку слід освітити з підвищеною точністю [36].

У системах, де світильники змінюють напрямок випромінювання механічно, центральний контролер визначає кут повороту для приводів панорамного і вертикального переміщення. Якщо світильник побудовано за принципом багатосегментної матриці, контролер активує відповідні сектори та коригує інтенсивність їхнього випромінювання. У обох випадках світлова пляма зміщується у напрямку, який відповідає актуальному положенню голови працівника. Оскільки рухи голови можуть бути швидкими або хаотичними, система використовує алгоритми згладжування, які усереднюють положення вектора за короткий проміжок часу. Це робить освітлення стабільним і плавним, запобігає різким перемиканням та створює природну динаміку світлового поля.

Архітектура датчика передбачає автономне живлення, яке забезпечує роботу модуля протягом повної робочої зміни. Вбудована акумуляторна батарея має малу масу та достатню ємність для безперервного вимірювання та передачі даних. Система зарядження зазвичай базується на зовнішньому індукційному або дротовому інтерфейсі, що дозволяє обслуговувати модуль без

додаткових інструментів. Корпус датчика виконується з легких матеріалів, стійких до забруднень, пилу, і не створює дискомфорту для працівника при тривалому носінні.

Особливу роль у роботі датчика відіграють механізми фільтрації шумів. У виробничому цеху присутні вібрації, швидкі рухи тулуба та сторонні прискорення, що можуть впливати на читання акселерометра. Гіроскопи піддаються дрейфу, який накопичується при довготривалій роботі. Магнітометри можуть спотворюватись через наявність металевих конструкцій. Для компенсації цих факторів у модулі обробки даних використовуються алгоритми, які порівнюють інформацію від різних сенсорів, враховують фізичні обмеження рухів голови та створюють стабільну картину просторової орієнтації. Результатом є вектор, який з високою точністю визначає напрямок погляду незалежно від зовнішніх впливів.

З технічної точки зору датчик напрямку погляду є елементом розподіленої системи, який взаємодіє з центральним контролером у режимі реального часу. Його робота забезпечує динамічне формування світлового середовища, яке супроводжує працівника і підлаштовується під особливості виконуваної операції. Такий підхід перетворює освітлення на активну складову виробничої системи, що реагує на поведінку людини та забезпечує стабільні умови для високоточної роботи. Саме завдяки використанню інерціальних сенсорів система стає здатною адаптуватися до будь-яких змін у положенні працівника, створюючи ефективне, безпечне та інтелектуальне середовище.

Функціонування інтелектуальної системи адаптивного освітлення у виробничому цеху потребує чітко визначеної математичної та алгоритмічної бази, що забезпечує перетворення сирих сенсорних даних на координати, необхідні для формування світлового поля. Датчик, Рисунок 3.6, розташований на голові працівника, передає інформацію про орієнтацію у вигляді показників акселерометра, гіроскопа і магнітометра. Такі вимірювання, хоча й мають високу деталізацію, самі по собі не можуть бути використані для керування світильниками без відповідної обробки. На центральному контролері

формується алгоритмічний комплекс, що виконує фільтрацію, нормалізацію, інтеграцію та перетворення даних у просторовий напрямок, а відтак — у команди для світлових модулів.



Рис 3.6 Датчики інтелектуальної системи адаптивного освітлення.

У початковій стадії оброблення дані акселерометра, гіроскопа та магнітометра проходять процедуру узгодження. Акселерометр фіксує гравітаційний вектор, який використовується для визначення нахилу. Проте він чутливий до динамічних прискорень, що виникають під час активних рухів. Гіроскоп, навпаки, забезпечує точне вимірювання кутових швидкостей, але піддається дрейфу при довготривалому інтегруванні сигналу. Магнітометр визначає азимутальну орієнтацію, однак його дані часто спотворюються локальними магнітними аномаліями, характерними для виробничих приміщень з великою кількістю металевих конструкцій та електричних кабелів. Тому обробка даних починається з їх узгодження у межах єдиного математичного простору, що дозволяє сформувати стійкий орієнтаційний вектор.

Найпоширенішим підходом до об'єднання трьох джерел інформації є застосування фільтра Калмана або комплементарного фільтра. Фільтр Калмана формує оптимальну оцінку орієнтації, аналізуючи статистичні характеристики шумів. Він прогнозує майбутнє положення на основі моделі руху та коригує його реальними вимірюваннями з урахуванням довірчої ваги кожного сенсора. Комплементарний фільтр забезпечує простішу реалізацію, поєднуючи довготривалу стабільність акселерометра та магнітометра з короткотривалою точністю гіроскопа. Обидва методи дозволяють отримувати тривимірний

орієнтаційний опис у вигляді кватерніона, що є математично стійкою структурою без особливостей, властивих ейлеровим кутам, таких як явище “заклинювання”.

На наступному етапі формується вектор напрямку погляду. У локальній системі координат датчика вектор, орієнтований уперед відносно осі голови, вважається еталонним. Кватерніон, що описує просторовий поворот датчика, застосовується до цього вектора, унаслідок чого формується орієнтація у глобальній системі координат цеху. У такий спосіб визначається напрямок, у якому працівник спрямовує голову. Для стабільності роботи цей напрямок підлягає додатковому згладженню. Різкі змінювання положення погляду можуть бути пов’язані не зі зміною робочої зони, а з короткочасними рухами або мікрокорекціями. Тому система застосовує часовий фільтр, який усереднює значення протягом невеликого інтервалу. Такий фільтр зберігає первинну динаміку, але усуває локальні імпульси, що могли б спричинити небажане мерехтіння або хаотичні рухи світильників.

Після формування згладженого вектора постає задача визначення точки перетину цього вектора з робочою поверхнею або необхідною просторовою зоною. Для цього використовується геометрична модель робочого місця. У цій моделі задано координати голови працівника (які можуть бути визначені або за фіксованою прив’язкою до робочого місця, або за допомогою окремих датчиків позиціонування), площину робочого столу та об’єми технологічних зон. Вектор, що характеризує напрямок погляду, подається у вигляді параметричного рівняння променя. Розв’язання рівняння перетину променя з площиною робочого столу надає координати точки, які визначають місце, що потребує посиленого або спрямованого освітлення [49].

У системах, де світильники мають механічні приводи повороту, координати точки перетину трансформуються у кутові положення приводів. При цьому враховуються геометричні параметри підвісу світильника, його відстань до робочої площини та максимальні кути нахилу. Система розраховує необхідний кут повороту по горизонтальній та вертикальній осях. Для

уникнення перевантаження приводів та створення різких світлових переходів застосовується контрольоване прискорення і сповільнення при переміщеннях. Це забезпечує плавну динаміку освітлення та комфортні умови для працівника.

У світильниках із сегментованою структурою відсутня потреба у механічних рухах. Координати точки перетину використовуються для вибору активних сегментів світлодіодної матриці. Сегменти, що знаходяться поблизу напрямку погляду, отримують більшу інтенсивність випромінювання, тоді як інші залишаються на мінімальному рівні. Така схема дозволяє швидко підлаштовувати світловий малюнок до змін орієнтації голови без використання механічних частин, що підвищує надійність системи.

Для формування остаточного світлового профілю використовуються також параметри спектра. Оскільки адаптивне освітлення працює у тісному зв'язку із загальною системою мікроклімату, алгоритм враховує поточний рівень яскравості приміщення, температуру, наявність відблисків та особливості технологічних операцій. Якщо система фіксує зниження контрастності зображення, вона може змінити співвідношення теплого та нейтрального спектра, забезпечивши більш сприятливі умови для зорової адаптації.

Останній етап алгоритмічної обробки — синхронізація з іншими підсистемами. Алгоритм адаптивного освітлення передає свої результати до системи вентиляції, яка враховує локальні зони підвищеної активності та температурних змін, а також до систем безпеки, що можуть реагувати на нетипові рухи або аварійні ситуації. Усі ці процеси забезпечують узгоджене функціонування комплексної системи автоматизації.

Узагальнюючи, алгоритми оброблення сенсорних даних для визначення напрямку погляду формують математично точний, фізично обґрунтований та функціонально стійкий механізм керування освітленням. Вони забезпечують перетворення мікрорухів та орієнтаційних змін голови у координати робочої площини, які стають основою для формування світлового контурного малюнка. Такий комплекс створює систему, здатну підтримувати постійний комфорт

працівника, стабільну якість візуального аналізу і високу ефективність технологічних процесів.

Розроблення адаптивної системи виробничого освітлення вимагає створення спеціалізованих світильників, здатних змінювати світловий потік відповідно до положення голови працівника. Такі світильники повинні володіти рядом властивостей, серед яких найважливішими є висока швидкість реакції на зміну орієнтації, стійкість до експлуатаційних навантажень, можливість точного керування просторовою діаграмою випромінювання та збереження стабільних оптичних характеристик упродовж тривалого періоду. Концепція адаптивного світильника ґрунтується на поєднанні оптичних, електронних і механічних рішень, які забезпечують його здатність формувати напрямлений світловий потік у реальному часі.

Основою конструкції служить світлодіодний модуль, який забезпечує високу світлову віддачу, низьке енергоспоживання та можливість гнучкого керування спектральними характеристиками. Світлодіоди мають керовану інтенсивність випромінювання, точну передачу кольорів і низький рівень тепловиділення у порівнянні з традиційними джерелами світла. На відміну від люмінесцентних або газорозрядних ламп, світлодіоди допускають миттєву зміну яскравості без інерційних затримок, що є критично важливим для системи, яка повинна адаптуватися до рухів голови працівника. Світлодіодний модуль може бути виконаний у вигляді лінійної, точкової або матричної структури залежно від типу світильника [44].

Світильники першого типу мають механічно регульований напрямок світлового потоку. Ця конструкція передбачає наявність приводу, який забезпечує поворот світлового блоку у горизонтальній та вертикальній площинах. Механічний вузол базується на сервоприводах або компактних електродвигунах із редукторами, які забезпечують точне позиціонування світильника. При проектуванні враховується необхідність плавності руху, щоб уникнути вібрацій та різких перемикань, здатних впливати на комфорт працівника. Поворотні механізми мають бути достатньо швидкодіючими, але

водночас забезпечувати контрольоване прискорення та гальмування, що виключає ефект «скачка» світлової плями. Корпус світильника виконується з легких алюмінієвих сплавів або композитів, які забезпечують теплообмін і захист від вібрацій.

Оптична частина світильника з механічним поворотом включає лінзовий блок або відбивач, що формує направлений промінь. Використовуються вторинні оптичні елементи, які дозволяють концентрувати світло у потрібній зоні без втрат рівномірності. Лінзи виготовляються з полікарбонату або кварцового скла та мають форму, оптимізовану для створення світлової плями з чіткими границями. У разі потреби світильник може бути обладнаний системою зміни кута розкриття променя, що дозволяє формувати як вузьке сфокусоване, так і широке розсіяне освітлення. Параметри оптичної системи підбираються з урахуванням вимог до освітлення дрібних деталей і необхідності збереження високого рівня контрастності поверхонь.

Другий тип світильників ґрунтується на сегментованій світлодіодній матриці, яка дозволяє змінювати напрямок світлового потоку без використання механічних елементів. У такій конструкції світловий модуль складається з декількох зон, кожна з яких має окреме керування інтенсивністю. При активації потрібного сегмента формується віртуальний напрямлений потік, що створює ефект переміщення світлової плями без зміни положення світильника. Сегментація дозволяє виконувати надзвичайно швидкі переходи між зонами освітлення, оскільки зміна яскравості окремих світлодіодів відбувається миттєво. Така конструкція має високу надійність, оскільки позбавлена рухомих частин, що можуть зношуватися або вимагати періодичного обслуговування.

Оптичні властивості сегментованих матричних світильників формуються за допомогою спеціальних дифузійних та колімуючих елементів. Кожен сегмент може мати власний оптичний профіль, що дозволяє створювати світлове поле складної конфігурації. Наприклад, центральні сегменти можуть створювати вузький направлений промінь для роботи з мікроскопічними елементами, тоді як периферичні забезпечують м'яке підсвічування

навколишніх зон. При цьому система керування світильником може формувати плавний перехід між сегментами, що забезпечує природну динаміку світла, синхронізовану з рухами голови працівника.

Третій тип освітлювальних пристроїв — комбінований або гібридний — поєднує механічний поворот та сегментовану структуру. Така конструкція використовується у випадках, коли виробничі процеси потребують не тільки точного спрямованого освітлення, але й можливості формувати різні світлові карти у межах однієї робочої зони. Механічний поворот дозволяє переміщати базову вісь світлового потоку, тоді як матриця забезпечує тонке налаштування інтенсивності у межах локальної ділянки. Це створює універсальний світильник, здатний адаптуватися до широкого спектра задач — від високоточної пайки до обробки великих карбонових поверхонь. Гібридна система дозволяє компенсувати недоліки механічних та матричних конструкцій: механіка забезпечує широкий діапазон переміщень, а сегментація — високу швидкодію.

Усі адаптивні світильники повинні мати інтегровану систему охолодження, яка запобігає перегріву світлодіодів і контролерів. Найбільш поширеним методом є пасивне охолодження на основі алюмінієвих радіаторів, що відводять тепло за рахунок конвекції. У світильниках із високою потужністю може застосовуватись активне охолодження з використанням малошумних вентиляторів або теплових трубок, проте для адаптивних систем з локальною дією зазвичай достатньо пасивних конструкцій.

Електронна частина світильника включає драйвери світлодіодів, модулі керування інтенсивністю та спектром, а також бездротові інтерфейси для приймання команд від центрального контролера. Драйвери повинні забезпечувати плавну й лінійну зміну яскравості без мерехтіння, що є критично важливим для зорового комфорту працівника. Система керування спектром дозволяє формувати світлові потоки з різною температурою кольору, що забезпечує оптимальні умови для різних типів робіт: теплий спектр підходить для тривалої ручної роботи, нейтральний забезпечує максимально природну

передачу кольорів, а холодний застосовується лише у випадках, коли потрібно підкреслити мікrokонтраст дрібних поверхневих структур.

Корпуси адаптивних світильників проектуються з урахуванням вимог промислової експлуатації. Вони повинні бути стійкими до пилу, який утворюється при обробці карбону, мати захист від електростатичних розрядів і бути легко піддатними очищенню. Матеріали корпусів мають низьку масу і високу міцність, що дозволяє мінімізувати навантаження на кріплення та забезпечити довговічність. При цьому форма корпусу оптимізується для зменшення аеродинамічного шуму, що може виникати при русі повітря під впливом вентиляції.

Особливу увагу приділяють системі розподілу світлового потоку. Оптичні елементи повинні мінімізувати бліки, рівномірно розподіляти світло в межах робочої зони та забезпечувати чіткі границі світлової плями. Це досягається шляхом використання багат шарових лінз і відбивачів з точним профілем, які не спотворюють спектральних характеристик. У розрахунках враховуються такі параметри, як коефіцієнт відбиття, пропускання, заломлення та поглинання. Метою є створення світлового середовища, яке максимально відповідає природним умовам для зорового аналізу людини.

Таким чином, адаптивні світильники для системи індивідуалізованого керування освітленням формують складний технічний комплекс, що об'єднує механіку, електроніку та оптику. Їх конструкції дозволяють забезпечити різні режими освітлення, підтримувати стабільний спектр і яскравість, адаптуватися до рухів працівника та створювати комфортне світлове середовище для виконання точних виробничих операцій. Усі ці характеристики роблять адаптивні світильники ключовим елементом автоматизованої системи мікrokлімату та освітлення у сучасному цеху з виготовлення дронів.

Створення повноцінної автоматизованої системи умов праці у виробничому цеху з виготовлення дронів передбачає не лише локальне вдосконалення окремих підсистем, таких як освітлення чи вентиляція, але й їх комплексну взаємодію. Адаптивне освітлення, яке реагує на напрямок погляду

працівника, за своєю природою є джерелом значного обсягу динамічної інформації про поведінку людини, його робочу зону та характер виконуваних операцій. Ця інформація має велике значення для системи керування мікрокліматом, оскільки дозволяє створювати адресні та інтелектуальні режими вентиляції, локального повітрообміну та фільтрації, а також виконує важливу роль у системах моніторингу безпеки.

Інтеграція адаптивного освітлення з вентиляцією базується на взаємному обміні даними між центральним контролером та вузлами керування потоками повітря. Напрямок погляду працівника несе інформацію про зону, у якій відбувається активна технологічна дія. Якщо система фіксує стабільне спрямування голови на певну ділянку, це означає, що саме в цьому секторі здійснюється робота з пайкою, обробкою карбону чи іншим процесом, що супроводжується виділенням пилу або летких речовин. На основі цього аналізу система вентиляції збільшує локальний відбір повітря або активує додаткові фільтрувальні касети, створюючи мікротягу саме там, де вона найбільше потрібна. Така модульність напрямленого повітрообміну значно підвищує ефективність видалення шкідливих речовин, оскільки вентиляція синхронізується не з загальним режимом цеху, а з реальними діями працівника.

Взаємодія між системами освітлення й вентиляції також проявляється в регуляції теплових потоків. Світильники, навіть енергоефективні, формують локальні теплові зони. Коли світловий промінь слідує за поглядом працівника, система може передбачити, в яких ділянках виникає потенційний локальний перегрів. Дані про напрямок випромінювання світильників передаються системі керування вентиляцією, яка коригує потужність подачі повітря, забезпечуючи комфортну температуру. Це особливо важливо у високоточних зонах пайки, де надмірний перегрів може впливати на властивості припою або деталізацію сприйняття.

Інтеграція з системою мікроклімату охоплює також контроль вологості, чистоти повітря та концентрації шкідливих речовин. Оскільки адаптивне освітлення формує патерн мобільних робочих зон, система вентиляції здатна

прогнозувати розподіл забруднень. Якщо виявляється, що працівник працює у зоні, де підвищена ймовірність утворення аерозолу або пилу, мікрокліматичний комплекс підвищує інтенсивність локального повітрообміну. При виконанні робіт з композитами вентиляційні насадки отримують інформацію про активну ділянку від освітлювальної системи і підлаштовуються відповідно до її координат. Така взаємодія значно зменшує концентрацію карбонового пилу у повітрі, запобігаючи його осіданню на поверхні обладнання та потраплянню в дихальні шляхи працівників.

Не менш важливим напрямком інтеграції є взаємодія адаптивного освітлення з системою безпеки. Дані про орієнтацію голови працівника дозволяють непрямо визначати його увагу та положення тіла відносно обладнання. Якщо система фіксує нехарактерні рухи або нестандартні зміни траєкторії погляду, які можуть свідчити про втому, втрату рівноваги або небезпечне наближення до обладнання, вона може подати сигнал до підсистеми попередження. Адаптивне освітлення може змінити яскравість або спектр для привертання уваги працівника, створюючи м'який візуальний сигнал. У критичних випадках система безпеки активує звуковий або світловий індикатор, або навіть тимчасово знижує потужність роботи обладнання, якщо працівник знаходиться у потенційно небезпечній зоні.

У комплексній системі автоматизації цеху адаптивне освітлення виконує функцію не лише локального освітлювального пристрою, але й сенсорного модуля непрямого моніторингу. Отримані дані дозволяють аналізувати патерни рухів працівника, визначати загальні маршрути його діяльності, прогнозувати, де саме утворюється найбільше технологічних забруднень і куди необхідно спрямувати вентиляційні потоки. Такий підхід дає змогу створювати інтелектуальні карти активності, на основі яких система мікроклімату коригує не лише локальну, але й загальну циркуляцію повітря у приміщенні. Наприклад, якщо упродовж зміни найбільша кількість операцій відбувається у конкретній частині столу чи цеху, система автоматично адаптує загальний баланс припливу та витяжки в цій зоні.

У разі роботи з матеріалами, що виділяють токсичні чи подразнювальні речовини, інформація адаптивного освітлення доповнюється показаннями газоаналізаторів та датчиків пилю. Усі ці дані об'єднуються у централізованому контролері, який визначає оптимальні режими очищення повітря. Наприклад, при роботі з флюсами, що містять компоненти з низькою молекулярною вагою, система здатна підсилювати витяжку саме у напрямку того сектора, де перебуває працівник, а у випадку різання карбону оптимізувати повітреобмін з урахуванням рухів голови та інструменту.

Важливим елементом інтеграції є можливість синхронізації освітлення з аварійними сценаріями. У разі виникнення задимлення, короткого замикання, розливу хімічних речовин чи іншої небезпечної ситуації адаптивне освітлення переходить у режим аварійного підсвічування, який забезпечує максимальний рівень видимості шляхів евакуації. Оскільки система знає поточний напрямок погляду та розташування працівника, вона може коригувати яскравість і напрям світлового потоку так, щоб позначити безпечні траєкторії руху. У розвинених конфігураціях освітлення навіть здатне виконувати роль інформаційного індикатора, спрямовуючи працівника до виходу за допомогою динамічних світлових сигналів [32].

Комплексна інтеграція адаптивного освітлення з системами вентиляції та мікроклімату дозволяє створити в цеху умови, що максимально наближені до індивідуалізованого середовища праці. Кожен працівник отримує не лише персональне світлове поле, але й персональний режим повітрообміну та терморегуляції, який забезпечується у режимі реального часу. Це сприяє зниженню навантаження на органи дихання, підвищенню ефективності роботи та зменшенню втрати зосередженості. У такому середовищі працівник відчуває мінімальні коливання мікроклімату, що особливо важливо при виконанні тривалих складних операцій.

У підсумку інтеграція адаптивного освітлення з вентиляційними, мікрокліматичними та безпековими системами формує новий стандарт керування виробничим середовищем, у якому всі підсистеми працюють не

ізолювано, а в єдиному інтелектуальному комплексі. Такий підхід забезпечує підвищений рівень безпеки, комфортні умови праці, оптимальне видалення забруднювачів та максимальну стабільність технологічних процесів, що є ключовими факторами для виробництва високотехнологічної продукції, зокрема безпілотних літальних апаратів.

### **3.4 Висновки до розділу 3.**

Проведений аналіз системи освітлення у цеху з виробництва безпілотних літальних апаратів показав, що якість світлового середовища є одним із визначальних факторів ефективності, безпеки та точності виконання технологічних операцій. Виробничі процеси, пов'язані з пайкою, складанням електронних модулів, обробкою карбонового волокна та контролем якості, потребують стабільного, рівномірного й спектрально коректного освітлення. Використання традиційних неавтоматизованих систем освітлення не забезпечує необхідної гнучкості та адаптації до змінних умов роботи, що призводить до зорового перенапруження, зростання кількості помилок і зниження продуктивності праці.

Обґрунтовано доцільність автоматизації освітлення як складової загальної системи керування мікрокліматом цеху. Автоматизоване освітлення дозволяє динамічно регулювати рівень яскравості, напрямок світлового потоку та спектральні характеристики залежно від типу виконуваних робіт, часу доби та індивідуальних особливостей робочих місць. Застосування контролерів освітлення є необхідною умовою реалізації такої адаптивності, оскільки саме вони забезпечують обробку сигналів від датчиків, синхронізацію роботи світильників та інтеграцію освітлювальної системи з вентиляцією і іншими інженерними підсистемами. Контролери дозволяють реалізувати плавне регулювання без різких змін яскравості, що є критично важливим для зорового комфорту персоналу.

Особливе значення у проєкті приділено вибору спектра освітлення. Доведено, що світло, максимально наближене до природного сонячного

спектра, є оптимальним для тривалої роботи з високою концентрацією уваги. Такий спектр забезпечує природне сприйняття кольорів, підвищує контрастність дрібних деталей і знижує втому зорового аналізатора. Використання світильників з регульованою колірною температурою дозволяє адаптувати освітлення до різних технологічних операцій, уникаючи негативного впливу надлишкового холодного або спектрально спотвореного білого світла. Це особливо важливо у виробничому середовищі, де персонал протягом тривалого часу працює у штучному освітленні без доступу до природного світла.

Запропонована індивідуалізована система освітлення є логічним розвитком автоматизації світлового середовища. Її застосування дозволяє формувати персоналізовану зону освітлення, орієнтовану на фактичне положення та напрямок погляду працівника. Такий підхід забезпечує оптимальне підсвічування робочої ділянки незалежно від зміни пози чи характеру операції, зменшує потребу у використанні додаткових локальних джерел світла та знижує навантаження на зір. Інтеграція індивідуалізованого освітлення з централізованими контролерами створює єдину систему, здатну адаптуватися до реальних умов виробництва у режимі реального часу.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що впровадження автоматизованої системи освітлення з використанням контролерів, сонячного спектра світла та індивідуалізованого підходу є технічно обґрунтованим і доцільним для цеху з виробництва БПЛА. Така система сприяє підвищенню якості виконання робіт, зменшенню зорової втоми, покращенню умов праці та загальної ефективності виробничого процесу, що відповідає сучасним вимогам до високотехнологічного промислового середовища.

## РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

### 4.1 Техніка безпеки та охорона праці при паянні.

Пайкові роботи у виробничому цеху з виготовлення безпілотних літальних апаратів належать до категорії процесів, які мають підвищену небезпеку для здоров'я працівників і потребують суворого дотримання регламентованих норм охорони праці. Технологічні операції пайки супроводжуються виділенням тепла, утворенням аерозолів флюсів, випаровуванням хімічних компонентів припою, а також можливістю прямого контакту шкіри з розпеченим металом та інструментом. Крім того, сучасні електронні компоненти мають високу чутливість до електростатичних розрядів, а використання нагрівальних інструментів створює комплекс ризиків, які впливають як на безпеку працівників, так і на якість зібраних виробів. Тому організація безпечних умов для пайки є невід'ємною частиною загальної системи охорони праці та технологічної дисципліни [38].

Найбільш значущим фактором ризику під час пайкових робіт є виділення хімічних парів та аерозольних продуктів розкладання флюсів. Під впливом нагрівання флюс переходить у газоподібний стан, утворюючи леткі речовини, які можуть містити оксиди, альдегіди, спирти та органічні кислоти. Частина цих сполук має подразнюючу дію на слизові оболонки дихальних шляхів, провокує кашель, печіння у носоглотці, появу сльозотечі та тимчасове погіршення зору. При тривалому контакті аерозолі флюсів можуть спричинити хронічні запальні процеси, особливо у працівників, які мають схильність до алергічних реакцій або підвищену чутливість дихальної системи.

Припої, що застосовуються у виробництві електронних компонентів, також становлять певну небезпеку. У випадку використання сплавів, які містять свинець, випаровування при нагріванні може спричинити потрапляння мікрокількостей важких металів у повітря робочої зони. Навіть безсвинцеві припої, що містять олово, срібло, мідь, індій та інші елементи, виділяють під

час пайки продукти, здатні подразнювати дихальні шляхи і викликати сухість та запалення слизових. Флюси на основі каніфолі утворюють дрібнодисперсні аерозолі, які осідають на поверхні обладнання та можуть бути повторно підняті у повітря при найменшому русі. Тому організація вентиляційного середовища є ключовою умовою безпечної роботи.

Під час пайки необхідно забезпечити безперервне відведення диму та аерозольних продуктів розкладання, що досягається за рахунок локальних витяжних пристроїв, розташованих безпосередньо над робочою зоною. Витяжні системи повинні мати достатню продуктивність, щоб ефективно усувати пари флюсів, але при цьому не створювати сильного повітряного потоку, який може охолоджувати робочу ділянку або відхиляти полум'я. Оптимальна робота вентиляції полягає у створенні стабільного напрямленого повітряного потоку, який відводить дим через фільтрувальні касети та не дозволяє шкідливим речовинам накопичуватись у приміщенні. Фільтри повинні затримувати не лише леткі органічні компоненти, але й дрібні частинки металів і флюсів, що можуть мати високу токсичність.

Особливо важливим аспектом охорони праці при пайці є захист працівника від термічних небезпек. Робота з розпеченим паяльником, гарячим повітрям, розрідженим припоєм та нагрівальними платформами супроводжується ризиком отримання опіків. Навіть короткочасний контакт розігрітої частини інструмента зі шкірою може призвести до серйозних травм. Під час перенесення інструмента або маніпулювання ним працівник може випадково торкнутися гарячої поверхні, що робить необхідним використання рукавиць, стійких до високих температур, та спеціальних підставок для тимчасового розміщення нагрітих інструментів. Ці підставки мають бути стійкими, термозахисними і не ковзати під час роботи [22].

Контроль температури є одним з основних факторів безпечної пайки. Надмірно високі температури призводять до активного виділення токсичних речовин та зниження якості монтажу. При низьких температурах припій недостатньо розтікається, що спричинює повторний нагрів і збільшує кількість

шкідливих викидів. Тому паяльні станції повинні бути оснащені стабілізаторами температури та датчиками контролю, що запобігають перегріванню. Працівник повинен слідкувати за тим, щоб температура була відповідною до типу припою і технологічних вимог, оскільки навіть невеликі відхилення можуть суттєво вплинути на характеристики з'єднань.

Захист органів дихання та очей є критично важливим при виконанні пайкових робіт. Використання респіраторів із фільтрами, здатними затримувати дрібні аерозолі, є обов'язковим у випадках інтенсивної пайки або роботи з флюсами підвищеної активності. Захисні окуляри з протизапотівальним покриттям захищають очі від дрібних бризок припою, елементів розігрітого флюсу та випадкових механічних частинок. При застосуванні гарячого повітря існує ризик несанкціонованого підняття дрібних частинок пилу, тому працівник має бути захищений від можливих опіків очей.

Електробезпека є невід'ємним компонентом охорони праці при пайці електроніки. Паяльні станції, як і будь-яке нагрівальне обладнання, потребують підключення до мережі з надійним заземленням. Несправність кабелю, відсутність заземлення або пошкодження ізоляції можуть стати причиною ураження електричним струмом. Під час роботи працівник не повинен торкатися оголених металевих елементів і має використовувати антистатичні браслети або килимки, які запобігають накопиченню електростатичних зарядів. Це не лише підвищує безпеку, але і захищає чутливі електронні компоненти від пошкоджень.

Особливу увагу приділяють умовам зберігання та поводження з флюсами і припоями. Флюси можуть містити агресивні хімічні компоненти, здатні викликати корозію металів і подразнення шкіри. Тому вони повинні зберігатися у герметичних контейнерах і використовуватися лише у кількості, необхідній для виконання конкретної операції. При нагріванні флюсу утворюється дим, який не можна вдихати і який повинен одразу видалятися вентиляційною системою. Контейнер із флюсом має бути надійно закритий після завершення

роботи, а залишки слід утилізувати відповідно до норм поводження з хімічними речовинами.

При виконанні пайки необхідно дотримуватися високого рівня організації робочого місця. Інструменти повинні бути розташовані так, щоб мінімізувати зайві рухи, а гарячі елементи не створювали небезпеки випадкового контакту. Робоча поверхня має бути чистою, стійкою до впливу хімічних речовин та високих температур. Не допускається накопичення залишків флюсу, припою або дрібних частинок металу, які можуть спричинити коротке замикання, забруднення електронних елементів або потрапляння у дихальні шляхи.

Додатковими ризиками при пайці є шум, вібрації та втома працівника. Хоча рівень шуму зазвичай не перевищує нормативних значень, тривала концентрація на дрібних деталях спричиняє напруження зору та м'язів шиї. Тому важливо забезпечувати періодичні перерви, змінювати положення тіла та підтримувати комфортний мікроклімат. Освітлення має бути достатньо інтенсивним та рівномірним, щоб запобігти перенапруженню очей. Використання адаптивного освітлення дозволяє розвантажити зорову систему, оскільки світловий потік підлаштовується під напрямок погляду і мінімізує тіні в робочій зоні.

У цілому техніка безпеки при пайкових роботах ґрунтується на принципах контролю небезпечних факторів, ефективної вентиляції, використання індивідуальних засобів захисту та суворого дотримання технологічних процедур. Сучасні системи автоматизації, включаючи адаптивне освітлення, покращують умови праці, підвищують видимість робочої зони та знижують ризик контакту працівника зі шкідливими речовинами. Комплексний підхід до охорони праці забезпечує високий рівень безпеки працівників та надійність виробничих процесів, що є необхідною умовою для якісного виготовлення електронних компонентів дронів.

## **4.2 Техніка безпеки при роботі з електронними компонентами та нагрівальними платформами.**

Робота з електронними компонентами у виробничому цеху з виготовлення безпілотних літальних апаратів характеризується підвищеним рівнем технологічної та професійної небезпеки. Сучасні електронні модулі дронів містять високоінтегровані мікросхеми, сенсорні елементи та контролери, які чутливі до електростатичних розрядів, механічних впливів та температурних коливань. Паралельно з цим працівники використовують нагрівальні платформи, інфрачервоні паяльні станції, гарячі повітряні інструменти та інші пристрої, які створюють ризики опіків, ураження електричним струмом та шкідливого впливу на органи дихання. Тому захист здоров'я і забезпечення безпечних умов під час роботи з електронікою є фундаментальним елементом системи охорони праці [5].

Одним із найнебезпечніших і водночас найменш помітних чинників є статична електрика. Мікроелектронні компоненти, що встановлюються на плати керування, акселерометри, гіроскопи, модулі обробки сигналів та комунікаційні чипи можуть бути зруйновані електростатичним розрядом, який є невідчутним для людини. Електричний потенціал, що накопичується на тілі працівника, на одязі або на поверхні інструментів, часто досягає кількох тисяч вольт. Розряд, спрямований через мікросхему, руйнує її напівпровідникову структуру або створює невидимі мікродефекти, які згодом спричиняють нестабільну роботу дрона або повний вихід вузла з ладу.

Для запобігання цим небезпечним явищам робочі зони мають бути оснащені антистатичними столами з провідною поверхнею, що з'єднується через заземлювальну шину з контуром заземлення цеху. Працівники зобов'язані використовувати антистатичні браслети, які забезпечують постійний контроль потенціалу тіла. Робочий одяг повинен мати антистатичні властивості, не генерувати заряд під час тертя й переміщення, а взуття має забезпечувати контрольовану провідність між тілом працівника та підлогою.

Підлога в зонах складання повинна бути виконана з матеріалів, які розсіюють електростатичний заряд, що зменшує ймовірність накопичення потенціалу під час ходьби або руху працівника [8].

Робота з нагрівальними платформами, паяльними станціями та гарячим повітрям супроводжується значним ризиком термічних ушкоджень. Поверхня нагрівальної платформи може досягати температури, що перевищують 300 °С, а насадка гарячого повітря — 500 °С і більше. Навіть короткочасний контакт зі шкірою призводить до опіків різного ступеня. Для усунення цього ризику необхідно використовувати теплостійкі рукавиці, а також підставки для тимчасового розміщення гарячих інструментів, які не допускають їхнього ковзання або випадкового падіння. Усі нагрівальні пристрої повинні бути у справному стані, а працівники мають суворо контролювати їх температуру, не допускаючи перегріву або перенавантаження. Нагрівальні платформи потребують вільного доступу повітря для охолодження, тому їх не можна накривати або розміщувати поблизу займистих матеріалів.

Електробезпека є важливою складовою всіх робіт з електронікою. Паяльні станції, мікроскопи, тестові стенди, генератори сигналів, програматори та діагностичні модулі підключаються до електричної мережі, тому несправності електричних кабелів, відсутність заземлення або використання пошкоджених розеток створюють ризик ураження електричним струмом. Робоче місце повинне мати розетки із захисним заземленням, диференційні автомати та пристрої захисного відключення, що реагують на коротке замикання або небезпечні витоки струму. Працівник не повинен торкатися відкритих металевих частин обладнання та працювати мокрими руками. Виробничі столи мають бути обладнані ізольованими поверхнями та електробезпечними монтажними блоками.

Особливу небезпеку становить контакт з хімічними засобами, що застосовуються при очищенні плат та елементів. У процесі монтажу використовуються спиртові розчини, ізопропіловий спирт, ацетон, флюс-очищувачі та інші хімічні реагенти, які є легкозаймистими та мають

подразнювальну дію на шкіру і дихальні шляхи. Робота з такими речовинами повинна проводитись у добре вентилярваних зонах з використанням захисних рукавиць і окулярів. Усі контейнери з хімікатами повинні бути щільно закритими, а очищення плат — проводитись лише на робочому майданчику з локальною витяжкою. Після завершення робіт робоча поверхня очищається від залишків рідин, а використані матеріали здаються на утилізацію в спеціальних контейнерах.

Механічні небезпеки при роботі з електронними модулями полягають у ризику порізів дрібними металевими елементами, провідниками та гострими частинами друкованих плат. При різанні проводів можуть відлітати дрібні фрагменти із високою швидкістю, тому працівник повинен використовувати захисні окуляри та інструменти з упорами. Для уникнення травм руки необхідно захищати легкими технічними рукавицями, які не знижують чутливості пальців, але запобігають порізам та подряпинам.

Температурна стабільність робочого середовища має важливе значення для якості електронних компонентів і безпеки праці. При високих температурах повітря збільшується ризик перегріву мікросхем під час монтажу. При низьких — збільшується крихкість матеріалів і час розігріву припою. Тому система мікроклімату має підтримувати стабільну температуру та вологість. Адаптивне освітлення, яке динамічно змінює напрямок світлового потоку, синхронізується з системою вентиляції, запобігаючи локальним перегрівам робочої поверхні та забезпечуючи рівномірне теплове навантаження.

Зорове навантаження є ще одним професійним ризиком. Монтаж електронних компонентів, особливо дрібних SMD-елементів, вимагає високої концентрації, роботи з мікроскопами, тривалої фіксації погляду та точності рухів. Недостатнє або нерівномірне освітлення швидко призводить до втоми зору, головного болю, зниження точності та появи технічних помилок. Адаптивна система освітлення, що реагує на напрямок погляду, формує стабільне світлове поле у зоні роботи, зменшуючи напруження зорового аналізатора та підвищуючи ефективність праці.

Організація робочого простору є вирішальним фактором безпеки. Усі інструменти повинні розташовуватися у доступній зоні, щоб уникнути зайвих рухів, які підвищують ризик опіків або електростатичних розрядів. Поверхня столу має бути чистою, без зайвих предметів, що можуть створювати небезпеку зачеплення або короткого замикання. Відходи припою, зрізані проводи та зламані компоненти повинні одразу видалятися у спеціальні контейнери.

Раціональна організація праці та періодичні перерви дозволяють знизити рівень втоми, стабілізувати моторну координацію та забезпечити якісне виконання операцій. Важливо, щоб працівник мав можливість змінювати позу, а умови мікроклімату залишалися стабільними протягом усієї робочої зміни.

Усі вищезгадані заходи формують систему охорони праці, яка охоплює електробезпеку, захист від статичної електрики, термічну безпеку, хімічну безпеку, механічну безпеку та візуальну ергономіку. Комплексний підхід гарантує захист здоров'я працівників і забезпечує високу якість електронних компонентів, що є критично важливим для надійності дронів і їхньої роботи в умовах інтенсивної експлуатації.

#### **4.3 Техніка безпеки при роботі з карбоновим волокном.**

Робота з карбоновим волокном у виробничих умовах належить до операцій підвищеної небезпеки, оскільки процеси різання, шліфування, свердління та формування композитних матеріалів супроводжуються утворенням дрібнодисперсного пилу, мікрофрагментів волокна та аерозолів, які становлять загрозу для здоров'я працівників. Дисперсні частинки карбону мають високу твердість, гостру структуру та здатність проникати в дихальні шляхи, викликати механічні мікротравми тканин, подразнення очей, шкіри та слизових оболонок, а також провокувати довготривалі хронічні захворювання. Тому організація безпечних умов праці при роботі з композитами вимагає комплексного підходу, що включає інженерні засоби захисту, персональні заходи, контроль довкілля та регламентовані процедури виконання технологічних операцій [2].

Пил карбонового волокна має особливі властивості, що відрізняють його від звичайних промислових забруднень. Через мікроскопічний розмір та низьку щільність він довго зависає у повітрі, рухається за найменшими повітряними потоками та може проникати у вентиляційні канали, зони електронного обладнання та важкодоступні ділянки робочого простору. Така низька інертність робить його практично невидимим для працівника, але водночас потенційно шкідливим навіть при невеликих концентраціях. Вдихання карбонового пилу може призвести до подразнення альвеол, розвитку хронічних запальних процесів та зниження функціональної здатності легенів. Механічні мікрочастинки здатні порушувати цілісність епітелію дихальних шляхів, утворюючи мікроподряпини, які збільшують ризик інфекцій та алергічних реакцій.

Особливу небезпеку становить вплив карбонового пилу на очі та шкіру. Гострі частинки можуть потрапляти у кон'юнктивальний мішок, викликаючи подразнення, запалення та мікротравми рогівки. У разі тривалого контакту без захисту можливе утворення поверхневих ерозій, що спричинюють порушення зору та дискомфорт. На шкірі частинки карбону здатні впроваджуватися у верхні шари епідермісу, утворюючи мікроранки та подразнення. Деякі працівники проявляють індивідуальну підвищену чутливість до такого впливу, що потребує постійного застосування захисного одягу й обмеження контакту з відкритими ділянками тіла [47].

У виробничих умовах обробка карбону супроводжується утворенням тепла, що підсилює рух повітря в робочій зоні. Це створює мікроконвекційні потоки, які піднімають пил у повітря і розносять його по всьому цеху. За відсутності належної вентиляції частинки здатні накопичуватися у повітрі до концентрацій, що становлять ризик для здоров'я та негативно впливають на роботу обладнання. Тому однією з ключових складових охорони праці є забезпечення ефективної локальної витяжної вентиляції, яка повинна працювати безперервно під час будь-яких операцій із композитами. Витяжні модулі встановлюються безпосередньо на місці утворення пилу, а їхня

ефективність підсилюється загальною припливно-витяжною системою, яка підтримує стабільний повітрообмін у приміщенні.

Робочі місця, на яких виконуються операції з карбоновим волокном, повинні бути оснащені ергономічними захисними бар'єрами та повітряними екранами, які знижують поширення пилу у навколишній простір. Для найбільш небезпечних процесів передбачено застосування локальних кожухів із прозорого ударостійкого матеріалу, що забезпечує одночасно захист і доступність огляду. Освітлення в таких зонах повинно бути спрямованим та достатньо інтенсивним, щоб виключити тіні, які можуть приховувати небезпечні зони утворення частинок. Використання адаптивного освітлення дозволяє підсилити цей ефект, оскільки світловий потік завжди слідує за поглядом працівника, забезпечуючи максимальну видимість місця контакту інструменту з матеріалом [10].

Засоби індивідуального захисту є обов'язковими для всіх осіб, що працюють з карбоновими композитами. Працівники повинні використовувати респіратори з фільтрами, призначеними для затримання дрібнодисперсних частинок; окуляри або захисні маски зі щільним приляганням; рукавиці, стійкі до механічних впливів; захисний одяг із тканин, що не пропускають волокна. Особлива увага приділяється коректному вибору респіратора: засоби з низьким коефіцієнтом фільтрації не забезпечують належного захисту, тоді як фільтри високого класу затримують не лише великі частинки, але й найдрібніші аерозолі. Захисний одяг має щільно закривати шию, зап'ястя і передпліччя, запобігаючи попаданню волокон на відкриті ділянки тіла.

Організація робочого процесу повинна включати регулярне очищення робочих поверхонь, інструментів і підлоги з використанням промислових пирососів, оснащених високоефективними фільтрами. Сухе підмітання є категорично неприпустимим, оскільки піднімає пил у повітря. Поверхні очищаються у вологому режимі або шляхом вакуумного всмоктування зі збиранням частинок у герметичні контейнери. Усі дії здійснюються у спеціально відведений час, за наявності повної вентиляційної підтримки.

Особливу роль у забезпеченні безпеки відіграє система контролю мікроклімату. При роботі з карбоном необхідно підтримувати стабільну вологість, щоб знизити здатність частинок до розповсюдження та електростатичного збудження. Занадто сухе повітря підсилює електростатичні заряди на поверхні матеріалу, що сприяє прилипанню пилу до обладнання, інструментів і спецодягу. Оптимальний рівень вологості допомагає стабілізувати повітряний потік, знижує запиленість і підвищує ефективність фільтрації.

Навчання персоналу є фундаментальним елементом охорони праці. Працівники повинні знати властивості карбонового волокна, потенційні ризики його впливу на організм та правила виконання операцій, що супроводжуються виділенням пилу. У процесі підготовки акцент робиться на правильному використанні респіраторів, дотриманні правил очищення робочих місць, перевірці стану вентиляційних систем та своєчасному повідомленні про несправності. Працівники мають розуміти, що навіть короточасна робота без засобів захисту може призвести до негативних наслідків.

Окрему увагу приділяють профілактичним медичним оглядам. Оскільки вплив карбонового пилу може накопичуватися поступово, необхідно проводити регулярні перевірки функції дихання, стану шкіри та зору. У разі виявлення ознак подразнення або респіраторних порушень працівника тимчасово відсторонюють від роботи з композитами, забезпечують лікування та підбирають індивідуальнішу систему захисту.

Техніка безпеки також враховує ризик займання карбонових частинок при певних умовах. Хоча сам карбон не є горючим матеріалом у звичайному розумінні, дрібний пил може створювати небезпечні для обладнання відкладення, що підвищують ризик локального перегріву. Тому всі інструменти повинні бути у справному стані, а вентиляція — працювати безперервно, не допускаючи накопичення пилу. Важливо забезпечити наявність системи пожежогасіння, яка виключає використання води на поверхнях, де можливе коротке замикання.

Завдяки комплексному підходу до охорони праці та техніки безпеки можна значно зменшити шкідливий вплив карбонового пилу на працівників, забезпечити стабільну якість продукції та підвищити загальний рівень безпеки виробничого середовища. У сучасному цеху з виготовлення дронів такі заходи є не просто рекомендаціями, а обов'язковими вимогами, що забезпечують захист здоров'я, надійність технологічних процесів та безперебійну роботу обладнання.

#### **4.4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях.**

Функціонування виробничого цеху з виготовлення дронів у період воєнного стану супроводжується значним посиленням вимог до охорони праці та техніки безпеки. Воєнна обстановка створює зовнішні ризики, що виходять за межі звичайного виробничого процесу, а також формує додаткові організаційні, психологічні та технологічні виклики. У таких умовах підприємство повинно забезпечити безперебійну роботу технологічних ліній, одночасно гарантувавши максимальний рівень захисту для працівників. Це вимагає комплексного підходу, що включає адаптацію приміщень до потенційних загроз, впровадження оперативних реагувальних процедур, посилення вимог до інженерних систем та підвищення рівня готовності персоналу.

Під час воєнного стану основною загрозою для виробничих об'єктів є можливість ракетних обстрілів, вибухових хвиль, віддалених детонацій та інших бойових факторів, які можуть впливати на цілісність будівельних конструкцій, електропостачання, вентиляційних систем і захисних споруд. Тому виробниче приміщення повинно мати структурну стійкість, здатну витримувати вібраційні та ударні навантаження. Обладнання, розташоване у цеху, має бути надійно закріплене, а громіздкі елементи — стабілізовані так, щоб їх переміщення або падіння було неможливим навіть при різкому поштовху. Особливу увагу приділяють системам освітлення та вентиляції, які повинні мати антивібраційні кріплення та резервні канали живлення, що

дозволяють продовжувати роботу або забезпечувати безпечне завершення технологічних процесів у разі аварійного відключення електроенергії [3].

Надзвичайно важливим компонентом системи безпеки в умовах воєнного стану є наявність укриття або захисного об'єкту, у який працівники можуть швидко переміститися у разі повітряної тривоги. Цей об'єкт має знаходитись у безпосередній доступності від робочих місць, бути достатньо містким і оснащеним автономними системами вентиляції, зв'язку та освітлення. Шляхи евакуації повинні бути завжди вільними, без сторонніх предметів, і позначені світловими або фотолюмінесцентними маркерами. Усі працівники проходять інструктаж щодо того, як діяти при сигналі тривоги, у тому числі порядок вимкнення обладнання, безпечного переміщення до укриття та підтримання безпеки під час перебування в ньому.

Система електропостачання підприємства у воєнний час потребує наявності резервних джерел живлення. Перебої в енергосистемі можуть створювати критичні ситуації під час роботи з високоточним обладнанням, паяльними станціями, нагрівальними платформами, верстатами та системами аспірації. Для забезпечення безпечної роботи підприємство повинно мати генератори або акумуляторні системи безперебійного живлення, які дозволяють завершити операції без ризику травмування працівників та збереження дорогоцінних електронних компонентів. Важливо, щоб усі аварійні джерела живлення регулярно перевірялися, а персонал був навчений правильно користуватися ними.

Підвищений психологічний стрес, характерний для роботи у воєнний період, суттєво впливає на концентрацію та якість виконання технологічних операцій, особливо під час монтажу та калібрування електронних модулів або роботи з карбоновим волокном. У таких умовах зростає ризик дрібних помилок, травм, неуважності та порушення технічної дисципліни. Тому підприємство повинно забезпечувати комфортний мікроклімат, стабільне освітлення, знижений рівень шуму та ергономічне робоче середовище, яке сприятиме концентрації та зменшенню впливу стресових факторів. Адаптивне

освітлення відіграє особливу роль у підтриманні зорової стабільності, а автоматизована вентиляція забезпечує чисте повітря і комфортні умови дихання у періоди довготривалої роботи.

У період воєнного стану зростає ризик технологічних аварій, пов'язаних із раптовим відключенням енергії, вібраційними пошкодженнями або перебоями у роботі систем. Тому всі підсистеми мають бути дубльовані або мати аварійні режими. Вентиляційні системи повинні мати можливість автоматичного переходу у безпечний режим, який не допускає накопичення шкідливих газів або пилу, навіть якщо живлення тимчасово відсутнє. Освітлення у критичних зонах має мати аварійні автономні блоки, що забезпечують мінімальний рівень видимості протягом часу, достатнього для евакуації.

Особливе значення в умовах воєнного стану має протипожежний захист. У разі вибухової хвилі або пошкодження будівлі існує ризик коротких замикань, займання проводки або падіння обладнання, яке може пошкодити електричні кабелі. Пожежні системи повинні бути у справному стані, мати автоматичні датчики задимлення та теплові індикатори, які працюють незалежно від основного електроживлення. Вогнегасники мають бути розміщені у доступних місцях, а персонал — навчений використовувати їх навіть у складних умовах. Особлива увага приділяється тому, щоб під час тривоги працівники знали, де знаходяться засоби пожежогасіння та як ними користуватись.

У період воєнного стану важливим елементом охорони праці є забезпечення інформаційного зв'язку. Підприємство повинно мати декілька каналів оповіщення працівників: сирену, мобільні повідомлення, дублювання через внутрішню гучномовну систему. Працівники повинні отримувати чіткі команди щодо припинення технологічних процесів, переміщення до укриття та подальших дій. Чіткість і швидкість передачі інформації особливо важливі під час роботи з гарячими інструментами, з електронікою або з хімікатами, коли

неправильні дії можуть стати причиною травм навіть без участі зовнішнього чинника.

Усі операційні процедури під час воєнного стану повинні враховувати можливість різкого переривання роботи. Працівники повинні бути навчені безпечно залишати робоче місце, вимикати обладнання, від'єднувати інструменти від мережі, перекривати вентилявані зони та швидко переміщатися до укриття. Особливо важливо забезпечити порядок у розташуванні інструментів та матеріалів, щоб під час евакуації не виникало додаткових небезпек.

На завершення слід зазначити, що техніка безпеки в умовах воєнного стану є багатокomпонентною системою, яка охоплює структурну безпеку будівель, організацію захисних споруд, стабільність інженерних мереж, психологічну підтримку працівників та адаптацію виробничих технологій до нестабільних умов. Усі ці заходи формують середовище, у якому підприємство може продовжувати виробничу діяльність, а працівники — виконувати свої обов'язки із максимально можливим рівнем безпеки.

#### **4.5 Висновки до розділу 4.**

Узагальнення питань охорони праці у цеху з виробництва безпілотних літальних апаратів показало, що безпечна організація виробничого процесу вимагає комплексного врахування різнорідних небезпечних і шкідливих факторів, які виникають під час паяння, роботи з електронними компонентами, використання нагрівальних платформ, обробки карбонового волокна та експлуатації обладнання в умовах воєнного стану. Сукупність цих факторів формує підвищене навантаження як на організм працівника, так і на інженерні системи цеху, що зумовлює необхідність застосування системних і автоматизованих заходів безпеки.

Пайкові роботи супроводжуються виділенням аерозолів флюсів і парів припоїв, локальними високими температурами та ризиком термічних опіків, що потребує ефективної локальної витяжної вентиляції, стабільного контролю

температури паяльного обладнання та застосування засобів індивідуального захисту. Робота з електронними компонентами додатково ускладнюється впливом електростатичних розрядів, які становлять небезпеку як для здоров'я персоналу, так і для надійності мікроелектроніки. Забезпечення антистатичного захисту робочих місць, стабільного мікроклімату та ергономічного освітлення є необхідною умовою зниження професійних ризиків і підвищення якості монтажних операцій. Використання нагрівальних платформ та термічного обладнання створює додаткову небезпеку опіків і перегріву, що вимагає суворого контролю температурних режимів, справності обладнання та організації безпечного простору навколо джерел тепла.

Робота з карбоновим волокном і продуктами його механічної обробки є одним із найбільш небезпечних напрямів виробничої діяльності через утворення дрібнодисперсного пилу, який легко поширюється у повітрі та негативно впливає на органи дихання, зір і шкіру. Аналіз показав, що ефективний захист персоналу можливий лише за умови поєднання пошарової вентиляції, локального відсмоктування пилу безпосередньо в зоні його утворення, підтримання оптимальної вологості повітря та застосування індивідуальних засобів захисту. Автоматизований контроль концентрації пилу дозволяє оперативно реагувати на зміну умов роботи та запобігати перевищенню допустимих рівнів забруднення.

Особливу актуальність питання охорони праці набувають в умовах воєнного стану, коли до виробничих ризиків додаються зовнішні загрози, пов'язані з можливими перебоями електропостачання, вібраційними навантаженнями, необхідністю оперативної евакуації персоналу та підвищеним психологічним стресом. У таких умовах важливого значення набуває наявність резервних джерел живлення, аварійного освітлення, чітко організованих шляхів евакуації та захисних укриттів. Автоматизовані системи вентиляції та освітлення повинні мати аварійні режими роботи, що забезпечують безпечно завершення технологічних процесів і мінімальний рівень комфорту для персоналу у разі надзвичайних ситуацій.

Загалом проведений аналіз підтверджує, що ефективна охорона праці у цеху з виробництва БПЛА може бути забезпечена лише за умови комплексного підходу, який поєднує інженерні рішення, автоматизацію мікроклімату, сучасні системи вентиляції та освітлення, а також організаційні заходи з урахуванням специфіки воєнного часу. Реалізація таких заходів дозволяє суттєво знизити рівень професійних ризиків, зберегти здоров'я працівників і забезпечити стабільність виробничого процесу навіть у складних та нестабільних умовах.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У ході виконання проєкту було розроблено комплексну систему автоматизації вентиляції та освітлення у виробничому цеху з виготовлення безпілотних літальних апаратів, що забезпечує високий рівень безпеки, ергономіки та стабільності технологічних процесів. Проведений аналіз показав, що сучасні умови виробництва дронів пов'язані з дією складних техногенних факторів, серед яких утворення карбонового пилу, виділення аерозолів під час пайки, чутливість електронних компонентів до статичних розрядів та підвищені вимоги до точності зорової роботи. Саме ці чинники визначили необхідність створення адаптивної, інтегрованої та інтелектуальної системи керування мікрокліматом і освітленням.

У роботі обґрунтовано негативний вплив карбонового пилу та парів флюсів на організм людини, доведено потребу у багаторівневій вентиляції та локальному відведенні шкідливих домішок, а також показано роль автоматизації у зменшенні професійних ризиків. Було сформовано концепцію багатозонної вентиляції, яка реагує на характер технологічних процесів і динамічно коригує інтенсивність повітрообміну. Особлива увага приділена створенню адаптивного освітлення з можливістю корекції напрямку світлового потоку відповідно до положення працівника, що підвищує точність виконання операцій та зменшує навантаження на зір.

Проведена інтеграція систем вентиляції, освітлення та моніторингу мікроклімату показала високу ефективність поєднання датчиків, контролерів та інтелектуальних алгоритмів управління. Така система дозволяє не лише стабілізувати показники мікроклімату, а й прогнозувати їх зміну відповідно до виробничого навантаження. Важливим результатом роботи стало визначення комплексу заходів щодо техніки безпеки та охорони праці, включаючи захист від термічних, хімічних, механічних та електростатичних ризиків. Окремо опрацьовано специфіку забезпечення безпеки в умовах воєнного стану, що є надзвичайно актуальним для сучасних українських підприємств.

Отримані результати підтвердили, що впровадження автоматизованої системи вентиляції та освітлення забезпечує значне підвищення безпеки праці, покращення якості повітря, підтримання стабільного мікроклімату та зменшення кількості технологічних відмов. Працівники отримують комфортніші умови роботи, знижується їхня втомлюваність, а якість монтажу та складання електронних компонентів зростає. Крім того, енергоефективність запропонованої системи сприяє економічній доцільності її впровадження.

Загалом виконаний проєкт демонструє, що сучасне виробництво дронів потребує комплексних рішень, які поєднують інженерну точність, автоматизацію, ергономіку та високі стандарти охорони праці. Реалізація запропонованої системи становить важливий крок у напрямку модернізації промислових об'єктів, підвищення якості продукції та створення безпечного високотехнологічного робочого середовища.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень (ДСН 3.3.6.042-99).URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/va042282-99> (дата звернення: 20.11.2025).
2. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0148858-13> (дата звернення: 20.11.2025).
3. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0012858-18> (дата звернення: 20.11.2025).
4. Боженко М.Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря:навч.посібник.КПІ,2019.URL:[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/33945/1/Bozhenko\\_OVK.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/33945/1/Bozhenko_OVK.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
5. Гранкіна В.В. Вентиляція : конспект лекцій. ХНУМГ ім. О.М. Бекетова,2012.URL:[https://eprints.kname.edu.ua/32069/1/Ventyliatsiia\\_Grankina.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/32069/1/Ventyliatsiia_Grankina.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
6. Юзбашьян А.П., Міланко В.А. Кондиціонування повітря : навч. посібник.ХНУМГ,2021.URL:<https://eprints.kname.edu.ua/63396/1/Kondytsionuvania.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).
7. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Збірник наук. праць,,46.КНУБА,2023.URL:<https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/03/202346.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).
8. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Збірник наук. праць,вип.17.КНУБА,2014.URL:[https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/03/VO\\_TGP\\_2014\\_17.pdf](https://library.knuba.edu.ua/books/zbirniki/03/VO_TGP_2014_17.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
9. Гігієна праці : підручник / за ред. Ю.І. Кундієва. Київ, 2011. URL: <http://irbis-nbuv.gov.ua/ulib/item/UKR0001234> (дата звернення: 20.11.2025).
10. Контроль повітря робочої зони при паяльних роботах. НБУВ. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?S21ID=&S21FMT=fullwebr&C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?S21ID=&S21FMT=fullwebr&C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE)

[DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/ptp\\_2014\\_5\\_6.pdf](#) (дата звернення: 20.11.2025).

11. Пили та аерозолі у виробничих приміщеннях. Наукова стаття. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/ecotox\\_2018\\_3\\_9.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/ecotox_2018_3_9.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

12. Методика розрахунку місцевих відсмоктувачів. ХНУМГ. URL:[https://eprints.kname.edu.ua/21292/1/Mistsevi\\_vidsmoktuvachi.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/21292/1/Mistsevi_vidsmoktuvachi.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

13. Проектування вентиляції виробничих цехів. КПІ, методичні вказівки. URL:[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41699/1/Vent\\_proekt.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/41699/1/Vent_proekt.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

14. Основи охорони праці : навч. посібник / О.Г. Левченко. КПІ, 2021. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/40212/1/OP\\_Levchenko.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/40212/1/OP_Levchenko.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

15. Світлотехніка та джерела світла : навч. посібник. ХНУМГ, 2018. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/48511/1/Svitlotehnika.pdf> (дата звернення: 20.11.2025).

16. Проектування LED-освітлення виробничих приміщень. ТНТУ. URL:[https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17141/5/LED\\_osvitlenni\\_a.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17141/5/LED_osvitlenni_a.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

17. Фотобіологічна безпека світлодіодного освітлення. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/svitlo\\_2021\\_4\\_12.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/svitlo_2021_4_12.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

18. Світлове середовище та працездатність людини. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/hyg\\_2019\\_2\\_7.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/hyg_2019_2_7.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

19. Ергономіка робочого середовища. Київ, 2016. URL:[https://chtyvo.org.ua/authors/Klymenko\\_VV/Ergonomika\\_robochoho\\_ser\\_edovyshcha.pdf](https://chtyvo.org.ua/authors/Klymenko_VV/Ergonomika_robochoho_ser_edovyshcha.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
20. Енергозбереження в системах вентиляції. Львівська політехніка. URL: [https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/39211/1/Energo\\_vent.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/39211/1/Energo_vent.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
21. Моніторинг параметрів мікроклімату. Львівська політехніка. URL:[https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/48124/1/Mikroklimat\\_monitoring.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/48124/1/Mikroklimat_monitoring.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
22. Автоматизовані системи керування мікрокліматом. КПІ. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50123/1/ASK\\_mikroklimat.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50123/1/ASK_mikroklimat.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
23. Промислова екологія : навч. посібник. КПІ. URL:[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28764/1/Promyslova\\_ekolohiia.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28764/1/Promyslova_ekolohiia.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
24. Захист повітряного середовища у виробництві. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAG E\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/eco\\_2017\\_6\\_10.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAG E_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/eco_2017_6_10.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
25. Техногенна безпека виробничих процесів. КНУБА. URL:[https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/12456/1/Technogenna\\_bezpeka.pdf](https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/12456/1/Technogenna_bezpeka.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
26. Безпека праці при роботі з композитними матеріалами. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAG E\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/comp\\_2020\\_3\\_5.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAG E_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/comp_2020_3_5.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).
27. Методичні рекомендації щодо оцінки якості повітря робочої зони. МОЗ України. URL: [https://moz.gov.ua/uploads/0/4219-yakist\\_povitrya.pdf](https://moz.gov.ua/uploads/0/4219-yakist_povitrya.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

28. Освітлення промислових будівель. ТНТУ, конспект лекцій. URL:[https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17142/4/Osvitlennia\\_pro\\_m.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/17142/4/Osvitlennia_pro_m.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

29. Світлодіодні системи освітлення. НТУ «ХПІ». URL:[https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/46321/1/LED\\_systemy.pdf](https://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPIPress/46321/1/LED_systemy.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

30. Оцінка ризиків при роботі з паяльними флюсами. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/ohp\\_2018\\_1\\_8.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/ohp_2018_1_8.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

31. Енергетична ефективність систем вентиляції. КПІ. URL:[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/36214/1/Energo\\_eff\\_vent.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/36214/1/Energo_eff_vent.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

32. Автоматизація інженерних систем будівель. КНУБА. URL:[https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/19876/1/Automatyzatsiia\\_ISB.pdf](https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/19876/1/Automatyzatsiia_ISB.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

33. Проектування LED-світильників з керуванням спектром. ТНТУ. URL:[https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/21456/1/LED\\_spectrum.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/21456/1/LED_spectrum.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

34. Світлові спектри та біоритми людини. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/biorytm\\_2021\\_2\\_4.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/biorytm_2021_2_4.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

35. Комплексні системи вентиляції виробничих приміщень. Львівська політехніка. URL:[https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/51234/1/Kompleks\\_vent.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/51234/1/Kompleks_vent.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

36. ДСП 9.9.5-080-2002. Державні санітарні правила при роботі з джерелами шкідливих аерозолів. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-02> (дата звернення: 20.11.2025).

37. Методичні вказівки з розрахунку кратності повітрообміну. КПІ ім. ІгоряСікорського. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31456/1/Kratnist\\_po\\_vitroobminu.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/31456/1/Kratnist_po_vitroobminu.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

38. Проектування систем місцевої витяжної вентиляції. ХНУМГ ім. О. М.Бекетова. URL: [https://eprints.kname.edu.ua/40211/1/Mistseva\\_vytyazhna\\_ventyli\\_atsiia.pdf](https://eprints.kname.edu.ua/40211/1/Mistseva_vytyazhna_ventyli_atsiia.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

39. Вплив параметрів мікроклімату на працездатність людини. URL: [http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/gigiena\\_2017\\_4\\_9.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/gigiena_2017_4_9.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

40. Охорона праці при електромонтажних та паяльних роботах. URL: [http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/op\\_2019\\_3\\_6.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/op_2019_3_6.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

41. Проектування вентиляції чистих та напівчистих приміщень. КНУБА. URL: [https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/21345/1/Chysti\\_pry\\_mishchennia\\_vent.pdf](https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/21345/1/Chysti_pry_mishchennia_vent.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

42. Контроль концентрації пилу в повітрі робочої зони. URL: [http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/pyl\\_2018\\_2\\_11.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/pyl_2018_2_11.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

43. Методика вимірювання параметрів мікроклімату виробничих приміщень. МОЗ України. URL: [https://moz.gov.ua/uploads/1/5678-metodyka\\_mikroklimat.pdf](https://moz.gov.ua/uploads/1/5678-metodyka_mikroklimat.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

44. Світлотехнічний розрахунок промислового освітлення. ТНТУ. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18321/1/Svitlotehn\\_rozrahakh.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/18321/1/Svitlotehn_rozrahakh.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

45. Світлодіодне освітлення виробничих приміщень: вимоги та розрахунок. URL: [https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/19564/1/LED\\_vyrobnychykh.pdf](https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/123456789/19564/1/LED_vyrobnychykh.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

46. Автоматизація вентиляційних систем промислових об'єктів. КПІ. URL:[https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48712/1/Automatyzatsiia\\_ventyliat\\_sii.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/48712/1/Automatyzatsiia_ventyliat_sii.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

47. Зниження концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/eko\\_2020\\_5\\_8.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/eko_2020_5_8.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

48. Енергоефективне освітлення промислових будівель. Львівська політехніка. URL: [https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/52113/1/Energo\\_osvitlennia.pdf](https://ena.lpnu.ua/bitstream/ntb/52113/1/Energo_osvitlennia.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

49. Біологічний вплив спектрального складу світла. URL:[http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?IMAGE\\_FILE\\_DOWNLOAD=1&Image\\_file\\_name=PDF/spektr\\_2021\\_1\\_5.pdf](http://irbisnbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/spektr_2021_1_5.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).

50. Інженерні системи виробничих будівель: вентиляція та освітлення. КНУБА. URL:[https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/17654/1/Inzhenerni\\_systemy.pdf](https://library.knuba.edu.ua/bitstream/987654321/17654/1/Inzhenerni_systemy.pdf) (дата звернення: 20.11.2025).