

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

БАЛАКІН Станіслав Олександрович

Автоматизована система керування вентиляцією
фарбувальної камери / Automated Control System for the
Ventilation of a Paint Booth

спеціальність: 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи АКІТ - 41
С.О. Балакін

Науковий керівник
к.т.н., доцент Н.Г.Яцків

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

« ____ » _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

_____ А.І.Сегін

ТЕРНОПІЛЬ – 2026

Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
спеціальність: 151 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології
освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри СКС

_____ А.І.Сегін
“ ____ ” _____ 20__ р.

З А В Д А Н Н Я **НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ** **БАЛАКІН Станіслав Олександрович**

(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи

Автоматизована система керування вентиляцією фарбувальної камери /
Automated Control System for the Ventilation of a Paint Booth.

керівник роботи к.т.н., доцент Н.Г.Яцків

затверджені наказом по університету від 01 грудня 2025 р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої кваліфікаційної роботи

25 травня 2026р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:

1. Технологічний процес фарбування виробів.
2. Будова та характеристики фарбувальної камери.
3. Принцип дії та будова вентиляційної системи фарбувальної камери.
4. Існуючі автоматизовані системи керування вентиляцією.

4. Основні питання, які потрібно розробити

1. Аналіз технологічного процесу та визначення об'єкта автоматизації.
2. Проектування автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери.
3. Реалізація автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі

- 1.Архітектура АСК.
- 2.Структурна схема АСК вентиляцією ФК.
3. Схема алгоритму роботи АСК вентиляцією ФК.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Н.Г. Яцків к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
2	Н.Г. Яцків к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		
3	Н.Г. Яцків к.т.н., доцент, доцент кафедри СКС		

7. Дата видачі завдання 01 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назви етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Проведення аналізу технологічного процесу та визначення об'єкта автоматизації	01.12.2025р. – 15.01.2026р.	
2	Проектування автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери	16.01.2026р. – 15.03.2026р.	
3	Реалізація автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери	16.03.2026р. – 30.04.2026р.	
4	Остаточне оформлення та подача кваліфікаційної роботи на перевірку щодо плагіату	01.05. 2026р. – 25.05.2026р.	

Студент

С.О. Балакін

(підпис)

Керівник роботи

к.т.н., доцент Н.Г. Яцків

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Балакін С.О. Автоматизована система керування вентиляцією фарбувальної камери. – Рукопис.

Дослідження на здобуття освітнього ступеня «бакалавр» за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна (наукова) програма. – Західноукраїнський національний університет, Тернопіль, 2026.

У роботі проведено аналіз технологічного процесу фарбування та визначено систему вентиляції як об'єкт автоматизації. Розроблено автоматизовану систему керування вентиляцією фарбувальної камери, виконано розрахунок її параметрів та обґрунтовано вибір технічних засобів. Реалізовано архітектуру та програмно-апаратну частину системи, що забезпечує автоматичне підтримання параметрів повітряного середовища.

ANNOTATION

Balakin, S.O. Automated Control System for the Ventilation of a Paint Booth. - Manuscript.

Doctoral studies for the education level «Bachelor» with the title 151 Automation and Computer-Integrated Technologies. – West Ukrainian National University, Ternopil, 2026.

The work analyzes the painting process and identifies the ventilation system as the object of automation. An automated control system for the ventilation of a paint booth has been developed, its main parameters have been calculated, and the selection of technical components has been substantiated. The architecture and the hardware-software implementation of the system have been developed, ensuring automatic maintenance of the air environment parameters.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОБ’ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	9
1.1 Технологічний процес фарбування виробів.....	9
1.2 Фарбувальна камера як технологічний об’єкт.....	11
1.3 Вентиляційна система фарбувальної камери.....	16
1.4 Аналіз існуючих систем автоматизації.....	19
2. ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ.....	23
2.1 Розрахунок повітрообміну фарбувальної камери.....	23
2.2 Аеродинамічний аналіз руху повітря в камері.....	25
2.3 Розрахунок параметрів вентиляційних каналів.....	27
2.4 Розрахунок втрат тиску у вентиляційній системі.....	28
2.5 Обґрунтування вибору компонентів проєктованої системи.....	31
2.5.1 Вибір програмованого логічного контролера.....	31
2.5.2 Вибір датчиків і вимірювальних приладів.....	33
2.5.3 Вибір виконавчих механізмів.....	36
3. РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ.....	39
3.1 Структурна схема автоматизованої системи керування.....	39
3.2 Розробка алгоритму роботи автоматизованої системи керування.....	42
3.3 Розробка системи автоматичного регулювання швидкості обертання вентиляторів.....	45

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ									
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата										
Розроб.		Балакін С.О.			Автоматизована система керування вентиляцією фарбувальної камери / Automated Control System for the Ventilation of a Paint Booth				Літ.		Арк.		Акрушів	
Перевір.		Яцків Н.Г.									4		60	
Консульт.		Яцків Н.Г.							ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41					
Н. Контр.		Заставний О.М.												
Затверд.		Сегін А.І.												

3.4 Програмна реалізація проєктованої системи.....	48
ВИСНОВКИ.....	57
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ФК - фарбувальна камера;

ПЛК - програмований логічний контролер;

АСК - автоматизована система керування;

ЛФП - лакофарбове покриття;

ФК - фарбувальна камера;

ТП - технологічний процес;

АЦП - аналого-цифровий перетворювач.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах розвитку промислового виробництва особливого значення набуває забезпечення високої якості технологічних процесів (ТП), енергоефективності та безпеки праці. Одним із важливих етапів у багатьох галузях, зокрема машинобудуванні, автомобільній промисловості та приладобудуванні, є процес нанесення лакофарбових покриттів (ЛФП), який здійснюється у спеціалізованих фарбувальних камерах (ФК).

Ефективність функціонування ФК значною мірою залежить від параметрів вентиляції, що забезпечують необхідний повітрообмін, видалення шкідливих речовин та підтримання стабільних мікрокліматичних умов. Під час фарбування у повітряне середовище виділяються леткі органічні сполуки, аерозолі фарб та розчинників, концентрація яких без належного контролю може перевищувати допустимі норми, створюючи небезпеку для здоров'я персоналу та підвищуючи ризик виникнення аварійних ситуацій. Крім того, нестабільність параметрів повітряного середовища, зокрема температури, вологості, швидкості та напрямку повітряних потоків, негативно впливає на якість ЛФП, що призводить до появи дефектів та збільшення частки браку. Це, у свою чергу, знижує ефективність виробництва та підвищує його собівартість.

Сучасні вимоги до енергоефективності та екологічної безпеки зумовлюють необхідність оптимізації роботи вентиляційних систем. Використання традиційних нерегульованих систем вентиляції призводить до надмірного споживання енергії та не забезпечує гнучкого реагування на зміну технологічних умов. У зв'язку з цим актуальним є впровадження автоматизованих систем керування (АСК), які дозволяють здійснювати адаптивне регулювання режимів роботи вентиляції залежно від поточних параметрів ТП.

Мета кваліфікаційної роботи: розробка АСК вентиляцією фарбувальної камери для забезпечення стабільних параметрів витрати та тиску повітря, підвищення безпеки і енергоефективності процесу фарбування.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- дослідити ТП фарбування виробів та визначити особливості ФК як

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

об'єкта автоматизації;

- проаналізувати структуру та принцип роботи вентиляційної системи ФК, визначити основні параметри контролю та регулювання;
- виконати розрахунок повітрообміну, параметрів повітряних потоків, вентиляційних каналів та втрат тиску в системі та обґрунтувати вибір компонентів АСК;
- провести аналіз існуючих систем автоматизації вентиляції та обґрунтувати вибір структури проєктованої системи;
- розробити алгоритм функціонування системи керування;
- реалізувати систему автоматичного регулювання швидкості обертання вентиляторів та дослідити її динамічні характеристики.

Об'єкт дослідження - технологічний процес вентиляції фарбувальної камери для нанесення ЛФП.

Предмет дослідження - АСК параметрами повітряного середовища фарбувальної камери.

Методи дослідження – аналіз і узагальнення науково-технічної літератури та нормативної документації, системний аналіз, математичне та імітаційне моделювання, методи теорії автоматичного керування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці АСК вентиляцією фарбувальної камери, яка забезпечує стабільність технологічних параметрів, підвищення якості ЛФП, зменшення енергоспоживання та підвищення рівня промислової безпеки. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та модернізації вентиляційних систем фарбувальних камер у промислових та сервісних підприємствах.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

1.1 Технологічний процес фарбування виробів

Фарбування виробів є технологічним процесом (ТП), який активно використовується у машинобудуванні, автомобільній індустрії, виготовленні металоконструкцій та інших сферах. Головним завданням даного ТП є формування захисного та естетичного шару готових виробів, що збільшує стійкість матеріалу до іржі та покращує їх вигляд.

ТП фарбування охоплює декілька послідовних етапів (рисунк 1.1), , спрямованих на отримання якісного та довговічного покриття [2]:

1. Обробка основи виробу.

На цьому етапі основу очищують від пилу, знежирюють, усувають іржу та інші забруднення. Для цього застосовують фізичні або хімічні методи обробки. Попередня обробка забезпечує кращу адгезію (зчеплення) фарби з поверхнею, а також усуває дефекти поверхні.

2. Грунтування.

На даному етапі відбувається нанесення на підготовлену поверхню спеціального шару ґрунтовки, який виконує функцію проміжного покриття між основою та лакофарбовим матеріалом. Основним призначенням цього етапу є покращення адгезії, зменшення поглинання фарби основою та формування захисного бар'єру від зовнішніх впливів. Для металевих виробів таке покриття додатково забезпечує антикорозійний захист, запобігаючи утворенню іржі та продовжуючи термін експлуатації.

3. Нанесення фарбового шару.

Фарба накладається на основу виробу за допомогою пневматичних чи електростатичних розпилювачів. У процесі розпилення формується дрібнодисперсний аерозоль фарби, частина якого осідає на виробі, а решта потрапляє у робочий простір. Зазвичай наноситься у 2-3 шари для досягнення рівномірного кольору та захисту. Після нанесення кожного з шарів матеріал

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

повинен пройти стадію висихання або полімеризації за визначених умов температури та повітрообміну.

4. Сушка шару.

Після накладання фарби треба забезпечити її полімеризацію та висихання. У певних випадках застосовуються особливі умови сушіння з вищою температурою та налагодженим повітряним потоком. Під час фарбування виникають великі обсяги шкідливих сполук, як-от органічні розчинники та фарбові аерозолі. Ці сполуки здатні погано впливати на здоров'я людини, а також створювати ризик пожежі чи вибуху.



Рисунок 1.1 –Технологічна схема процесу

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		10

На кожному з етапів ТП параметри повітряного середовища безпосередньо визначають якість нанесення та формування фарбового покриття, впливаючи на рівномірність, умови висихання та відсутність дефектів. Тому реалізація процесу потребує створення спеціалізованого технологічного простору – фарбувальної камери (ФК), яка забезпечує належні умови для проходження всіх його етапів.

1.2 Фарбувальна камера як технологічний об'єкт

Сучасні ФК (рисунок 1.2) це складні інженерні споруди – закриті приміщення, що складаються з герметичного теплоізовованого корпусу та герметичного дверного блоку, оснащені системами примусової припливно-витяжної вентиляції, фільтрації, підігріву повітря та автоматичного керування, що забезпечує чистоту фарбування, безпеку персоналу та відповідність екологічним нормам за рахунок створення контрольованого мікроклімату та ефективного видалення відпрацьованих аерозолів [3].

- 1- панель керування
- 2- відцентровий вентилятор
- 3- регулятор температури повітря
- 4- стеля з фільтром
- 5- решітка виведення повітря
- 6- фільтр для виведення відпрацьованого повітря
- 7- фільтр для рециркуляції відпрацьованого повітря

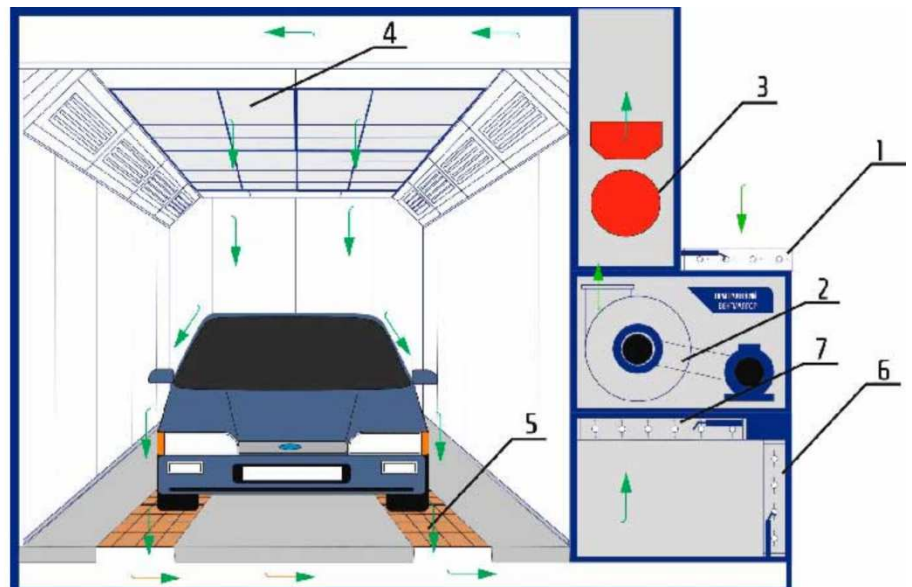


Рисунок 1.2 – Будова фарбувальної камери

Конструктивно камера являє собою герметизований об'єм із тепло- та звукоізовованими панелями, що забезпечують стабільність внутрішнього середовища та мінімізують вплив зовнішніх факторів. Внутрішні поверхні

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		11

виконуються з матеріалів, стійких до дії фарбових аерозолів і розчинників, що спрощує очищення та обслуговування.

Робоча зона є центральним елементом камери, у межах якого безпосередньо здійснюється процес фарбування. Вона розрахована на розміщення об'єкта фарбування та забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку. Конструкція підлоги часто включає решітки або перфоровані панелі, через які відводиться забруднене повітря, що дозволяє формувати вертикальний або комбінований напрям руху повітря. Така організація сприяє ефективному видаленню фарбового аерозолу та зменшенню турбулентності.

Система вентиляції виконує функцію подачі очищеного повітря та видалення забрудненого. Вона складається з припливного та витяжного каналів, вентиляторів, повітропроводів і регулюючих елементів. Припливна частина забезпечує рівномірну подачу повітря через стельові дифузори або фільтруючі панелі, тоді як витяжна система відводить повітря через підлогову або бокову зону. Узгоджена робота цих елементів дозволяє підтримувати необхідний перепад тиску в камері, що запобігає виходу забрудненого повітря назовні.

Система фільтрації призначена для очищення повітря як на вході, так і на виході з камери. На припливі встановлюються фільтри тонкого очищення, які затримують пил і сторонні частинки, забезпечуючи чистоту повітря перед подачею у робочу зону. На витяжці застосовуються фільтри грубого очищення або спеціалізовані фарбозатримуючі матеріали, що вловлюють аерозольні частинки фарби. Ефективність фільтрації безпосередньо впливає на якість покриття та екологічні показники системи.

Система підігріву повітря реалізується за допомогою теплообмінника, який забезпечує підтримання необхідної температури у камері. Як правило, використовується повітряний теплообмінник, що працює на основі водяного або електричного нагріву. Підігрів повітря необхідний для створення оптимальних умов нанесення та сушіння фарби, а також для стабілізації фізико-хімічних процесів. Робота теплообмінника регулюється автоматично залежно від заданих температурних параметрів.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Освітлення камери виконується із застосуванням герметичних світильників, розташованих у стельовій і бічних зонах. Джерела світла підбираються таким чином, щоб забезпечити рівномірне освітлення без утворення тіней і спотворення кольорів. Зазвичай використовуються світлодіодні або люмінесцентні лампи з високим коефіцієнтом передачі кольору, що є критично важливим для контролю якості фарбування.

Пульт керування є засобом взаємодії оператора із системою. Він може бути реалізований як окремий апаратний блок або у вигляді програмного інтерфейсу на базі Raspberry Pi. Через пульт здійснюється запуск і зупинка системи, встановлення параметрів роботи, контроль стану обладнання та відображення аварійних повідомлень. Наявність централізованого керування дозволяє підвищити зручність експлуатації та оперативність реагування на зміни умов роботи.

ФК є спеціалізованим технологічним приміщенням, призначеним для виконання операцій нанесення лакофарбових покриттів у контрольованих умовах. На відміну від звичайних виробничих приміщень, така камера повинна забезпечувати стабільні параметри повітряного середовища - температуру, чистоту повітря та напрямок руху повітряних потоків. Саме ці фактори безпосередньо впливають як на якість нанесеного покриття, так і на безпечність роботи людей.

Конструктивно фарбувальна камера являє собою герметичний об'єкт, у межах якого організовано керований повітряний потік. Зазвичай стінки камери виготовляються з металевих сендвіч панелей але для здешевлення можна використати листовий метал з теплоізоляційним шаром. Такі матеріали дозволяють підтримувати необхідний температурний режим і одночасно забезпечують достатню жорсткість конструкції.

Верхня частина камери виконує роль зони подачі очищеного повітря. Тут розміщуються стельові фільтри тонкого очищення, через які припливне повітря рівномірно розподіляється по всій площі робочої зони. Завдяки цьому формується вертикальний ламінарний потік, що рухається зверху вниз. Подібна схема застосовується досить часто, оскільки вона дозволяє ефективно відводити

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						13
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

аерозоль фарби від поверхні виробу та зменшує ймовірність потрапляння пилу на свіжопофарбовану поверхню.

У нижній частині камери передбачено систему відведення забрудненого повітря. Хоча деколи введення в виведення повітря відбувається з одного і того ж місця але в різні сторони. У невеликому приміщенні це все ще забезпечує хороший потік повітря при менших затратах на комплектуючі та мінімальні зміни в архітектурі. Залежно від конструкції установки витяжні канали можуть розташовуватися під решітчастою підлогою або вздовж нижніх частин стін. Повітря, що проходить через робочу зону, захоплює частинки фарбового аерозолі та інші домішки і спрямовується до витяжної системи, після чого транспортується до вентиляційного агрегату.

Важливим елементом камери є вентиляційний модуль, який зазвичай розміщується поза основним робочим об'ємом. У його складі знаходяться припливний і витяжний вентилятори (деколи один вентилятор виконує обидві задачі), система фільтрації, а також теплообмінні елементи або нагрівальні секції. Повітря ззовні спочатку проходить через фільтри грубого очищення, далі може нагріватися до необхідної температури і лише після цього подається до камери. Така послідовність дозволяє забезпечити стабільні параметри припливного повітря.

У процесі експлуатації фарбувальної камери важливе значення має рівномірність розподілу повітряних потоків. Якщо повітря подається нерівномірно або утворюються локальні турбулентні зони, це може призвести до погіршення якості фарбування. Саме тому конструкція повітророзподільних елементів та розташування вентиляційних каналів підбираються таким чином, щоб забезпечити максимально рівномірний рух повітря у робочому просторі.

Окремої уваги потребує система фільтрації. Як правило, у фарбувальних камерах використовується кілька ступенів очищення повітря. Перший ступінь затримує великі частинки пилу, тоді як наступні фільтри призначені для уловлювання дрібних частинок фарби та аерозолів. Така багатоступенева система дозволяє значно зменшити викиди забрудненого повітря у навколишнє середовище. Таким чином, конструкція фарбувальної камери являє собою

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

комплекс взаємопов'язаних елементів — робочого об'єму, вентиляційної установки, фільтраційних секцій та системи повітропроводів. Узгоджена робота цих елементів забезпечує формування стабільного повітряного середовища, необхідного для якісного виконання технологічного процесу фарбування.

Завдяки такій конструкції ФК забезпечує постійний потік очищеного підігрітого повітря, що видаляє шкідливі випари та пил, гарантуючи якісний результат фарбування.

Для забезпечення ТП та отримання якісного покриття, у ФК необхідно здійснювати контроль наступних параметрів:

- температура;
- швидкість повітря;
- тиск;
- чистота повітря.

Температура визначає умови випаровування розчинників, в'язкість лакофарбового матеріалу та швидкість полімеризації покриття. При недостатній температурі фарба має підвищену в'язкість, що ускладнює її рівномірне нанесення та може призводити до утворення патьоків або нерівностей. Надмірно висока температура, у свою чергу, викликає занадто швидке випаровування розчинників, що може спричинити дефекти типу «сухого напилення» або погіршення адгезії покриття. Оптимальний температурний режим забезпечує рівномірне розтікання фарби та правильне формування плівки.

Швидкість повітряного потоку впливає на перенесення фарбового аерозолю та ефективність його видалення з робочої зони. При недостатній швидкості повітря відбувається накопичення аерозолю, що призводить до повторного осідання частинок фарби на поверхню і погіршення якості покриття. Надмірна швидкість може викликати турбулентність, що порушує рівномірність нанесення та сприяє втратам матеріалу. Оптимальне значення швидкості забезпечує стабільний ламінарний потік, який ефективно видаляє надлишковий аерозоль без порушення процесу фарбування.

Тиск у камері визначає напрям руху повітря та герметичність системи. Як правило, у фарбувальних камерах підтримується незначне розрідження або

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

надлишковий тиск залежно від конструкції системи. Неправильно підібраний режим тиску може призвести до проникнення забрудненого повітря ззовні або, навпаки, до виходу аерозолі у навколишнє середовище. Стабільний контроль тиску забезпечує правильний повітряний баланс і сприяє підтриманню чистоти в робочій зоні.

Чистота повітря є критичним параметром для отримання якісного покриття. Наявність пилу або інших частинок у повітрі призводить до включень у фарбовому шарі, що значно погіршує зовнішній вигляд і експлуатаційні властивості покриття. Система фільтрації повинна забезпечувати очищення повітря як на вході, так і на виході з камери. Високий рівень чистоти повітря дозволяє уникнути дефектів типу «пилові включення» та забезпечує рівномірну структуру покриття.

Застосування таких камер дає можливість створити регульовані умови виконання ТП, гарантувати однакове накладання фарби, а також зменшити вплив шкідливих речовин на робітників та довкілля. Підтримання зазначених параметрів повітряного середовища в фарбувальній камері на заданому рівні забезпечується системою є вентиляції, яка визначає аеродинамічний режим роботи. Саме вона розглядається як об'єкт автоматизації, оскільки дозволяє створювати регульовані умови виконання ТП.

1.3 Вентиляційна система фарбувальної камери

Система вентиляції ФК здійснює багато важливих функцій як от [18]:

- постійна зміна повітря у робочій зоні;
- фільтрація аерозолів фарби та небезпечних випарів;
- підтримка потрібної температури та чистоти повітря.

Для гарантування безпечної та продуктивної роботи ФК вентиляція мусить відповідати певним технічним критеріям зазначеними у статті проект вентиляції фарбувальної камери. Однією з головних ознак є кратність повітрообміну, яка визначає, скільки разів повітря у камері повністю змінюється за певний проміжок часу. Для ФК цей показник зазвичай коливається від 20 до 100 об'ємів камери за

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

годину.

Іншим значущим параметром є швидкість руху повітряного струменя у робочій зоні. Для гарантування якісного фарбування та ефективного виведення фарбового аерозолі швидкість повітря повинна бути в межах приблизно 0,3–0,5 м/с.

Також важливим чинником є температурний режим. Температура повітря у малярській камері повинна утримуватись у визначених межах, що сприяє правильному нанесенню та висиханню лакофарбового шару.

Система вентиляції повинна забезпечувати однаковий розподіл повітря у робочому просторі камери, виведення забрудненого повітря, очищення вхідного повітря та зведення до мінімуму забруднених потоків.

Головною метою їх використання є створення найкращих умов для проведення процесу фарбування. У більшості сучасних камер використовується спрямована схема руху повітря, за якої свіже повітря подається зверху крізь систему фільтрів, після чого рівномірно проходить через робочу ділянку та відводиться через нижню частину камери (рисунок 1.3) [4].

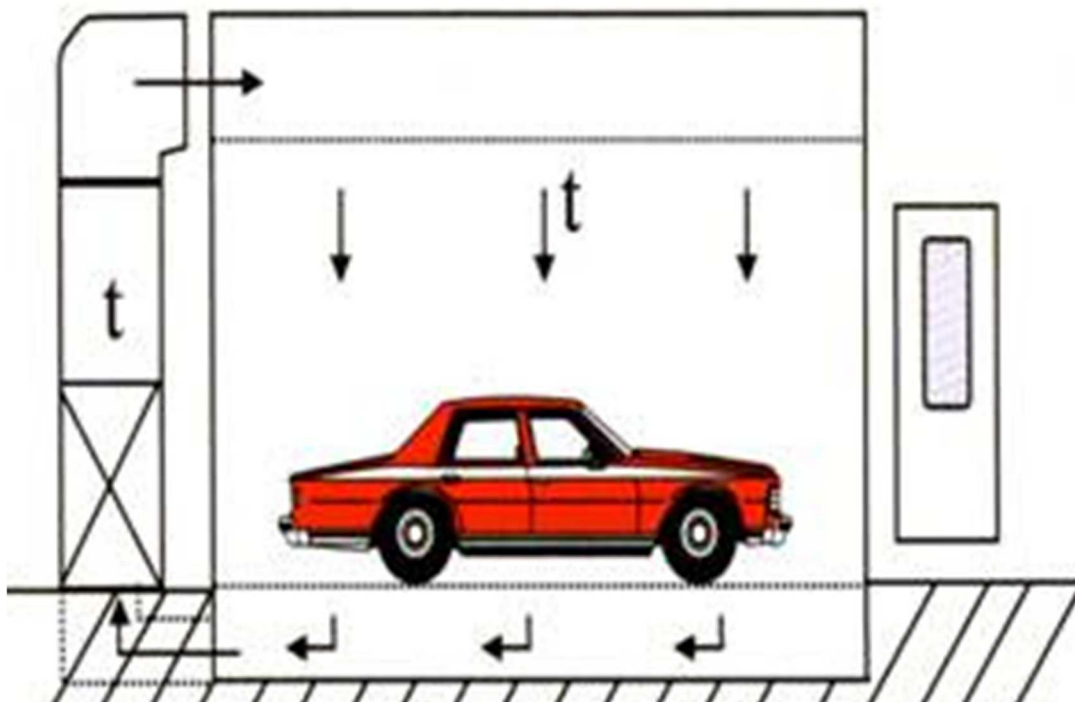


Рисунок 1.3 – Структура системи вентиляції

Такий принцип роботи надає ефективне видалення фарбового аерозолі, уникнення осідання пилу на поверхні виробу та однаковий розподіл повітряного потоку. Припливне повітря проходить через багаторічну систему фільтрації, яка очищає його від пилу та інших домішок. Після цього повітря подається у робочу зону камери через спеціальні розподілювачі. Забруднене повітря разом з частинками фарби забирається через витяжну систему, яка може бути розміщена у підлозі або у нижній частині стін камери. Перед викидом у атмосферу повітря проходить додаткове очищення у фільтрах. У новітніх установках також можуть застосовуватися теплообмінники чи системи рекуперації тепла, що дає змогу знизити витрати енергії системи вентиляції.

Ефективна робота ФК значною мірою залежить від конструкції та узгодженої роботи основних елементів вентиляційної системи. Кожен компонент такої системи виконує певну функцію у процесі підготовки, подачі, очищення та видалення повітря. Одним із ключових елементів є припливна вентиляційна установка. Вона забезпечує подачу свіжого повітря до камери. У складі припливної установки зазвичай знаходяться вентилятор, фільтри очищення повітря, а також нагрівальні або теплообмінні елементи. Повітря, що подається у камеру, повинно бути очищене від пилу та інших забруднень, оскільки навіть незначна кількість частинок може негативно вплинути на якість лакофарбового покриття.

Важливим компонентом системи є вентилятори, які створюють необхідний повітряний потік. У фарбувальних камерах зазвичай використовують як припливні, так і витяжні вентилятори. Їх продуктивність підбирається таким чином, щоб забезпечити задану кратність повітрообміну та стабільний напрямок руху повітря. Не менш важливу роль відіграє система фільтрації повітря.

Фільтри встановлюються як у припливній, так і у витяжній частині вентиляційної системи. Припливні фільтри очищують повітря перед подачею у камеру, тоді як витяжні фільтри затримують частинки фарби та аерозолі перед викидом повітря у навколишнє середовище.

Для транспортування повітря між різними елементами вентиляційної системи використовуються повітропроводи. Вони з'єднують вентиляційні

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

агрегати з камерою та забезпечують рух повітряного потоку у потрібному напрямку. При проектуванні повітропроводів враховують їхній діаметр, довжину та кількість поворотів, оскільки ці фактори впливають на втрати тиску у системі.

Окрім цього, у вентиляційній системі можуть використовуватися теплообмінні пристрої, які дозволяють нагрівати припливне повітря або здійснювати рекуперацію тепла. Це сприяє підвищенню енергоефективності вентиляційної установки та зменшенню витрат на її експлуатацію.

Вентиляційна система ФК складається з ряду взаємопов'язаних елементів, кожен з яких впливає на загальну ефективність роботи установки. Правильний вибір і узгодження цих компонентів є необхідною умовою забезпечення стабільної роботи камери.

1.4 Аналіз існуючих систем автоматизації

У сучасних виробничих умовах значна увага приділяється автоматизації ТП [15,16]. Використання автоматизованих систем керування (АСК) дозволяє підвищити ефективність роботи обладнання, забезпечити стабільність технологічних параметрів та гарантують безпечну експлуатацію апаратури.

Однією з головних задач автоматизації є підтримання заданих параметрів роботи системи. До таких параметрів належать:

- швидкість повітряного потоку,
- температура припливного повітря,
- тиск у вентиляційних каналах та інші характеристики.

Для контролю цих параметрів використовуються різноманітні датчики, сигнали від яких надходять до системи керування.

Центральним елементом системи автоматизації зазвичай є програмований логічний контролер (ПЛК). Він виконує обробку інформації від датчиків та формує керуючі сигнали для виконавчих механізмів. До таких механізмів належать електродвигуни вентиляторів, приводи заслінок, а також інші елементи вентиляційного обладнання.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

Беручи до уваги статтю Принцип роботи автомобільної фарбувальної камери в таблиці 1.1 наведено порівняльні характеристики існуючих АСК вентиляцією ФК [15].

Таблиця 1.1 - Порівняльний аналіз існуючих систем автоматизації вентиляції

Тип системи	Приклади реалізації	Переваги	Недоліки	Доцільність застосування
1	2	3	4	5
PLC-системи промислового класу	Siemens S7-1500, Schneider Modicon M580, Allen-Bradley CompactLogix	Максимальна надійність; швидка реакція на аварії; реалізація складних сценаріїв (продувка, аварійне відключення подачі фарби); підтримка вибухозахищених систем (ATEX)	Вища вартість; складніше програмування; потребує кваліфікованого персоналу	Стандарт для ФК у промисловості (авто, металоконструкції)
DDC-контролери HVAC-адаптовані	Siemens Climatix, Honeywell CPO, Schneider Unitary Controllers	Точне регулювання температури та повітрообміну; проста інтеграція датчиків; енергоефективність	Обмежена робота з аварійними сценаріями; слабка підтримка вибухонебезпечних режимів	Малопотужні або напівпромислові ФК

Продовження таблиці 1.1

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		20

1	2	3	4	5
BMS/BAS з інтеграцією фарбувальних зон	Siemens Desigo CC, Honeywell EBI, Johnson Controls Metasys	Централізований контроль камери + цеху; моніторинг температури, тиску, фільтрів; архівація параметрів процесу	Не виконує реальне керування в реальному часі без PLC/DDC; висока вартість	Великі виробництва з кількома камерами
Спеціалізовані контролери ФК	Col-Met control systems, Blowtherm controllers, ELMO Rietschle systems	Оптимізовані режими “фарбування / сушка / продувка”; вбудовані безпечні логіки; простота експлуатації	Обмежена гнучкість; прив’язаність до виробника; складна інтеграція в BMS	Автомобільні СТО, серійні фарбувальні лінії
IoT / Smart industrial ventilation systems	Siemens MindSphere, PTC ThingWorx, AWS IoT Industrial	Аналіз VOC та енергоспоживання; прогнозування заміни фільтрів; віддалений моніторинг	Не підходить як єдина система керування; залежність від мережі; кіберризика	Сучасні “розумні” фарбувальні комплекси

Важливим аспектом автоматизації є можливість регулювання продуктивності вентиляторів. У сучасних системах для цього часто застосовуються частотні перетворювачі, які дозволяють змінювати швидкість обертання електродвигунів. Завдяки цьому можна гнучко керувати інтенсивністю повітряного потоку та підтримувати оптимальні умови роботи камери.

Ще однією функцією автоматизованих систем є контроль аварійних

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		21

режимів роботи. У разі виникнення відхилень від нормальних параметрів система може автоматично зупинити обладнання або подати сигнал оператору. Це дозволяє запобігти пошкодженню обладнання та підвищує рівень безпеки роботи.

Крім того, сучасні АСК оснащуються засобами візуалізації та диспетчеризації, які дають можливість оператору контролювати роботу вентиляційної системи у реальному часі. Інформація про основні параметри відображається на екрані операторської панелі або комп'ютера, що значно полегшує процес керування установкою.

На підставі проведеного аналізу можна дійти висновку, що АСК вентиляцією є одним із вирішальних чинників забезпечення якості фарбування та безпеки роботи ФК. Існуючі системи вентиляції нерідко мають обмежені можливості регулювання параметрів повітряного потоку або не забезпечують достатньої енергетичної ефективності. Тому актуальним є завдання розробки сучасної автоматизованої системи вентиляції.

Автоматизація вентиляційних систем ФК дозволяє підвищити надійність роботи обладнання, забезпечити стабільність ТП та зменшити вплив людського фактора.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

2. ПРОЄКТУВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ

2.1 Розрахунок повітрообміну фарбувальної камери

Під час проєктування АСК вентиляцією ФК одним із ключових етапів є визначення необхідної інтенсивності повітрообміну [1]. В документі Опалення, вентиляція та кондиціонування зазначено, що саме правильно організований повітряний потік дозволяє підтримувати стабільні умови виконання ТП, а також забезпечує ефективне видалення аерозолі фарби, розчинників і інших шкідливих домішок, що утворюються під час фарбування. Недостатній повітрообмін призводить до накопичення фарбового туману у робочій зоні, що може негативно впливати як на якість нанесеного покриття, так і на безпеку праці. З іншого боку, надмірна інтенсивність вентиляції спричиняє збільшення енергоспоживання та не завжди є економічно доцільною. Саме тому при розрахунку системи вентиляції необхідно знайти раціональне співвідношення між ефективністю очищення повітря і витратами енергії.

Для визначення необхідної продуктивності вентиляційної системи необхідно встановити геометричні параметри камери. Об'єм робочого простору визначається добутком її довжини l , ширини b та висоти h .

Отримане значення дозволяє оцінити загальну кількість повітря, що знаходиться у камері в нормальних умовах експлуатації.

У практиці проєктування вентиляційних систем часто використовується поняття кратності повітрообміну. Воно показує, скільки разів за певний проміжок часу повітря у приміщенні повністю замінюється свіжим. Для ФК цей показник, як правило, значно вищий, ніж для звичайних виробничих приміщень, оскільки під час фарбування утворюється значна кількість аерозольних частинок. Кількість повітря, яку повинна подавати вентиляційна система, визначається за співвідношенням між об'ємом камери та заданою кратністю повітрообміну.

Узагальнено цей розрахунок можна подати таким чином.

$$Q = n * V,$$

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де Q - необхідна витрата повітря, м³/год;

n - кратність повітрообміну за годину;

V - об'єм фарбувальної камери, м³.

Окрім кратності повітрообміну, у ФК важливим параметром є швидкість руху повітря у робочій зоні. У більшості сучасних установок застосовується вертикальний потік, коли очищене повітря подається зверху через систему фільтрів і рівномірно опускається до нижньої частини камери. Така організація повітряного руху дозволяє ефективно переносити фарбовий аерозоль до витяжних каналів. Витрата повітря у цьому випадку також може визначатися через швидкість потоку та площу перерізу робочої зони камери.

$$Q = v \cdot A,$$

де Q - необхідна витрата повітря, м³/год;

v - середня швидкість повітряного потоку, м/с;

A - площа поперечного перерізу камери, м².

Для обґрунтування вибору компонентів АСК вентиляцією виконано розрахунок параметрів стандартної ФК розмірами 7 × 4 × 3 м. Результати розрахунків наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Розрахунок повітрообміну ФК

Параметр	Формула	Значення	Результат
Об'єм ФК	$V = l \cdot b \cdot h$	7×4×3	84 м ³
Кратність повітрообміну	n	50 1/год	
Витрата повітря за кратністю повітрообміну	$Q_1 = n \cdot V$	50×84	4200 м ³ /год
Площа робочого перерізу камери	$A = l \cdot b$	7×4	28 м ²
Швидкість повітря	v	0,30 м/с	
Витрата повітря за швидкістю потоку	$Q_2 = v \cdot A$	0,30×28	30240 м ³ /год
Порівняння двох методів	$Q = \max(Q_1, Q_2)$		30240 м ³ /год

Результати двох методів можуть відрізнятися, оскільки вони враховують різні параметри роботи системи. На практиці при проектуванні вентиляції ФК орієнтуються на більш жорстку вимогу. Отримані значення використовуються під час вибору вентиляторів, визначення параметрів повітроводів та розрахунку втрат тиску у вентиляційній системі.

При проектуванні основною задачею зазвичай є забезпечення такого режим руху повітря, при якому потік залишається максимально рівномірним. Якщо швидкість занадто велика, можуть виникати турбулентні завихрення, що негативно впливає на якість фарбування. Якщо ж швидкість недостатня, аерозоль фарби не буде ефективно відводитися із робочої зони.

2.2 Аеродинамічний аналіз руху повітря в камері

Після визначення необхідної витрати повітря та кратності повітрообміну важливим етапом проектування фарбувальної камери є аеродинамічний аналіз руху повітря. Цей аналіз дозволяє оцінити, наскільки рівномірно повітряний потік розподіляється по всьому об'єму камери, а також виявити можливі зони застою або локальної турбулентності, які можуть негативно впливати на якість фарбування.

У сучасних ФК зазвичай застосовується односпрямований потік очищеного відфільтрованого повітря з постійною швидкістю 0,22 – 0,55 м/с по всій чистій робочій зоні також відомий як ламінарний потік, при якому очищене повітря подається зверху через фільтруючі елементи і опускається до витяжної системи в нижній частині камери. Така схема дозволяє забезпечити ефективне видалення аерозолів фарби та уникнути підняття пилу з підлоги на поверхню виробів. Як зазначено в статті Проект вентиляції ФК для оцінки аеродинамічних характеристик потоку застосовують кілька підходів:

1. Аналітичний підхід. Використовуються спрощені формули для визначення швидкості та напрямку повітряного потоку, втрат тиску у вентиляційних каналах та на фільтрах. Наприклад, середню швидкість потоку у робочій зоні можна оцінити через витрату повітря та площу поперечного перерізу:

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

$$v = \frac{Q}{A},$$

де v - швидкість повітряного потоку, м/с;

Q - витрата повітря, м³/с;

A - площа поперечного перерізу камери, м².

2. Чисельне моделювання (CFD). Для більш точного аналізу застосовують моделювання за допомогою програмних комплексів, таких як SolidWorks Flow Simulation або ANSYS Fluent. За допомогою таких програм можна побудувати тривимірну модель камери та візуалізувати рух повітряного потоку, визначити швидкісні профілі, зони турбулентності та концентрацію аерозолі фарби у різних частинах камери.

Це дозволяє коригувати розташування повітропроводів, решіток і фільтрів для досягнення оптимального розподілу повітря.

3. Експериментальний підхід. На етапі налагодження та тестування камери використовують вимірювання швидкості повітря у різних точках за допомогою анемометрів та візуалізацію потоків за допомогою димових або газових траєкторій. Такий підхід дозволяє підтвердити правильність проектування та внести необхідні корективи.

При проектуванні важливо забезпечити, щоб повітря рухалося максимально рівномірно у робочій зоні. Локальні завихрення або застійні зони можуть спричинити нерівномірне осідання фарби на виробі, що призведе до дефектів покриття. Застосування ламінарного потоку та правильне розташування вентиляційних елементів дозволяє зменшити ці негативні ефекти.

Для ефективного видалення забрудненого повітря повітропроводи витяжної системи розташовують у нижній частині камери або під підлогою. Це дозволяє створити спрямований потік, який «змиває» аерозоль фарби вниз і спрямовує його до витяжного вентилятора. Одночасно припливне повітря подається через стельові решітки або дифузори, які забезпечують рівномірний розподіл по площі камери.

2.3 Розрахунок параметрів вентиляційних каналів

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Після визначення необхідної витрати повітря та аналізу його руху в робочому об'ємі ФК наступним етапом є розрахунок параметрів вентиляційних каналів. Саме від правильно підібраних розмірів повітропроводів залежить ефективність роботи всієї системи вентиляції, а також рівень втрат тиску та енергоспоживання. Вентиляційні канали призначені для транспортування повітря від припливної установки до камери та від камери до витяжного вентилятора. При цьому важливо забезпечити такі умови, за яких повітря рухається з допустимою швидкістю, не створюючи надмірного шуму та зайвих гідравлічних втрат.

Першим кроком розрахунку є визначення площі поперечного перерізу повітропроводу. Вона залежить від витрати повітря та допустимої швидкості його руху. Узагальнено цей зв'язок можна подати через наступне співвідношення.

$$Q = v * A,$$

де Q - витрата повітря, м³/с;

v - швидкість руху повітря у повітропроводі, м/с;

A - площа поперечного перерізу повітропроводу, м².

На практиці швидкість повітря у вентиляційних каналах вибирається в певних межах. Для магістральних повітропроводів вона зазвичай становить 6–10 м/с, тоді як у розподільчих каналах може бути меншою. Вибір швидкості є компромісом між розмірами каналів і втратами тиску: зі збільшенням швидкості зменшується діаметр повітропроводу, але зростають втрати енергії. Після визначення площі перерізу можна перейти до розрахунку геометричних розмірів повітропроводу. У випадку круглого каналу його діаметр визначається через площу перерізу.

$$A = \pi D^2 / 4,$$

де D - діаметр повітропроводу.

В таблиці 2.2 наведено параметри повітропроводів для проєктованої системи.

Таблиця 2.2 – Розрахунок параметрів повітропроводів

Параметр	Формула	Значення	Результат
----------	---------	----------	-----------

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		27

Швидкість повітряного потоку у каналі	v	8 м/с	
Площа перерізу повітропроводу	$A = Q / v$	8,4 / 8	1,05 м ²
Діаметр круглого повітропроводу	$D = \sqrt{(4A/\pi)}$	—	≈1,16 м
Прийнятий діаметр			1200 мм

2.4 Розрахунок втрат тиску у вентиляційній системі

Рух повітря у вентиляційній системі супроводжується втратою енергії, яка проявляється у вигляді зниження тиску вздовж траси повітропроводів. Фізично це пояснюється внутрішнім тертям у самому потоці, а також взаємодією повітря з поверхнями каналів і конструктивними елементами системи. У реальних умовах рух повітря в вентиляційних мережах є переважно турбулентним, що додатково підсилює енергетичні втрати через виникнення вихорів та нерівномірність швидкісного поля. Саме тому оцінка втрат тиску є необхідною для забезпечення стабільного повітрообміну та правильного підбору вентилятора.

Сумарні втрати тиску у вентиляційній системі формуються як сума двох складових - лінійних і місцевих втрат, що описується залежністю

$$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{місц}},$$

де ΔP - загальні втрати тиску;

$\Delta P_{\text{тр}}$ - втрати тиску на тертя при русі повітря по прямолінійних ділянках;

$\Delta P_{\text{місц}}$ - втрати тиску, зумовлені локальними опорами, Па.

Такий поділ дозволяє окремо враховувати вплив протяжності мережі та її конструктивної складності. Втрати на тертя виникають унаслідок в'язкісної взаємодії частинок повітря між собою та зі стінками повітропроводу. При турбулентному режимі течії структура потоку характеризується наявністю хаотичних пульсацій швидкості, що збільшує інтенсивність обміну імпульсом і, відповідно, втрати енергії.

Для інженерних розрахунків ці втрати визначаються за формулою

$$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda * \frac{L}{D} * \frac{\rho v^2}{2},$$

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

де λ - коефіцієнт гідравлічного тертя, який залежить від числа Рейнольдса та відносної шорсткості внутрішньої поверхні повітропроводу

L - довжина ділянки;

D - характерний (еквівалентний) діаметр каналу;

ρ - густина повітря;

v - середня швидкість потоку, м/с.

Величина $\frac{\rho v^2}{2}$ у цьому виразі відповідає динамічному тиску потоку і характеризує його кінетичну енергію. Місцеві втрати виникають у тих ділянках, де відбувається порушення усталеного руху повітря: зміна напрямку, перерізу або швидкості. До таких елементів належать повороти, трійники, звуження і розширення каналів, решітки, дифузори, а також фільтрувальні секції. У цих зонах формуються додаткові турбулентні структури, відриви потоку та зони рециркуляції, що призводить до суттєвих енергетичних втрат. Розрахунок виконується за формулою

$$\Delta P_{\text{місц}} = \sum \zeta * \frac{\rho v^2}{2},$$

де ζ - коефіцієнт місцевого опору, що визначається конструкцією елемента і встановлюється за довідковими даними.

У більшості практичних випадків саме місцеві опори дають найбільший внесок у загальний перепад тиску, особливо в системах з фільтрацією. Важливо враховувати, що втрати тиску суттєво залежать від швидкості руху повітря, причому ця залежність є квадратичною. Це означає, що навіть незначне збільшення швидкості призводить до різкого зростання енергетичних витрат. З іншого боку, зменшення швидкості вимагає збільшення розмірів повітропроводів, що впливає на габарити та вартість системи. Таким чином, при проектуванні необхідно знаходити компроміс між аеродинамічними втратами та конструктивними параметрами вентиляційної мережі. Отримане значення сумарних втрат тиску відображає опір усієї системи руху повітря і визначає необхідний напір, який має створювати вентилятор для забезпечення заданої витрати повітря та стабільного функціонування вентиляції фарбувальної камери.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Таблиця 2.3 – Розрахунок втрат тиску та вибір вентилятора

Розрахунковий параметр	Формула	Прийняті / розрахункові значення	Результат
Динамічний тиск у каналі	$\rho v^2 / 2$	$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$; $v_k = 8 \text{ м/с}$	38,4 Па
Втрати тиску на тертя	$\Delta P_{\text{тр}} = \lambda \cdot L/D \cdot \rho v^2 / 2$	$\lambda = 0,02$; $L = 10 \text{ м}$; $D = 1,16 \text{ м}$	$\Delta P_{\text{тр}} \approx 6,6 \text{ Па}$
Місцеві втрати тиску	$\Delta P_{\text{місц}} = \zeta \cdot \rho v^2 / 2$	$\zeta = 6$; $\rho v^2 / 2 = 38,4 \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{місц}} = 230,4 \text{ Па}$
Загальні втрати тиску	$\Delta P = \Delta P_{\text{тр}} + \Delta P_{\text{місц}}$	6,6 + 230,4	$\Delta P \approx 237 \text{ Па}$
Прийнятий напір вентилятора із запасом	$\Delta P_{\text{пр}} = 1,2 \cdot \Delta P$	$\Delta P = 237 \text{ Па}$	$\Delta P_{\text{пр}} \approx 285 \text{ Па}$
Продуктивність вентилятора із запасом	$Q_{\text{пр}} = 1,2 \cdot Q_{\text{розр}}$	$Q_{\text{розр}} = 30240 \text{ м}^3/\text{год}$	$Q_{\text{пр}} \approx 36290 \text{ м}^3/\text{год}$
Рекомендована продуктивність вентилятора	—	З урахуванням стандартного ряду	36000–40000 м ³ /год

За результатами проведених розрахунків для фарбувальної камери розмірами 7 × 4 × 3 м встановлено, що визначальним є розрахунок за швидкістю повітряного потоку в робочій зоні, а не за кратністю повітрообміну. При швидкості повітря 0,30 м/с необхідна витрата становить 30240 м³/ год. З урахуванням коефіцієнта запасу доцільно прийняти припливний і витяжний вентилятори продуктивністю 36000–40000 м³/год з напором не менше 300 Па. Для забезпечення розрахункової витрати повітря приймається круглий вентиляційний канал діаметром 1200 мм.

Отримані результати є вихідними даними для подальшого вибору елементів автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

2.5 Обґрунтування вибору компонентів проєктованої системи

2.5.1 Вибір програмованого логічного контролера

Вибір ПЛК визначається структурою системи автоматизації, кількістю вимірювальних каналів, типами сигналів та складністю алгоритму керування. У даній системі контролер виконує функції центрального вузла обробки інформації, забезпечуючи збір даних із датчиків, їх фільтрацію та формування керуючих впливів на виконавчі механізми.

З урахуванням реалізації контурів регулювання, обробки аварійних станів і необхідності взаємодії з частотними перетворювачами, до контролера висуваються вимоги щодо достатньої обчислювальної продуктивності, наявності аналогових і дискретних входів/виходів та підтримки промислових інтерфейсів. Серед класичних промислових рішень можна виділити контролери сімейства Siemens (лінійка SIMATIC S7), Schneider Electric (Modicon), а також Allen-Bradley (ControlLogix, CompactLogix) [12]. Такі ПЛК характеризуються високою надійністю, гарантованим часом виконання циклу, розвиненою системою діагностики та повною відповідністю промисловим стандартам. Вони добре підходять для критичних застосувань, однак мають відносно високу вартість і надлишковий функціонал для задач середньої складності, таких як вентиляція окремої фарбувальної камери.

Альтернативою є більш доступні контролери, наприклад ОВЕН або Unitronics, які забезпечують необхідний мінімум функцій для реалізації алгоритмів керування, включаючи підтримку аналогових сигналів і базових ПІД-регуляторів [19,20]. Такі рішення є компромісом між ціною та функціональністю, однак можуть мати обмеження щодо масштабування системи та інтеграції з сучасними цифровими інтерфейсами.

Окрему категорію складають мікроконтролерні та одноплатні рішення, зокрема Arduino та Raspberry Pi [7]. Платформа Arduino відзначається простотою використання та низькою вартістю, що робить її зручною для прототипування та навчальних задач. Водночас вона має обмежені обчислювальні ресурси, відсутність повноцінної багатозадачності та недостатній рівень надійності для

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

безперервної роботи в промислових умовах. Крім того, реалізація складних алгоритмів регулювання і обробки великої кількості сигналів на такій платформі є обмеженою.

На відміну від Arduino, Raspberry Pi (рисунок 2.1) являє собою повноцінний одноплатний комп'ютер із операційною системою, що відкриває значно ширші можливості. Він підтримує багатозадачність, мережеві протоколи, зберігання та обробку даних, що дозволяє реалізувати не лише базові функції керування, але й елементи диспетчеризації або віддаленого моніторингу. Завдяки цьому Raspberry Pi може виступати як програмний ПЛК (soft PLC), на якому реалізується логіка керування із використанням мов, сумісних зі стандартом IEC 61131-3 або високорівневих мов програмування.

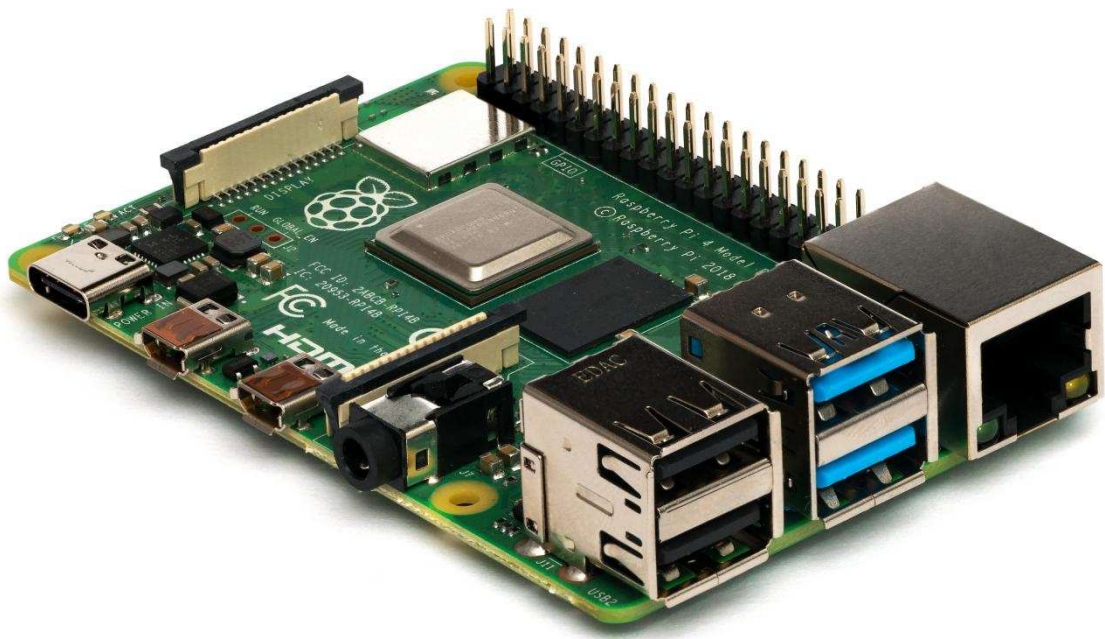


Рисунок 2.1 - Raspberry Pi 4 Model B

Разом з тим, використання Raspberry Pi має певні обмеження. Зокрема, відсутність вбудованих аналогових входів вимагає застосування додаткових модулів або перетворювачів сигналів, а операційна система загального призначення не гарантує жорсткого реального часу. Це означає, що для критичних контурів регулювання необхідно враховувати можливі затримки виконання. Також потрібне забезпечення захисту від електромагнітних завад і стабільного живлення, що є типовими вимогами для промислових умов.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		32

Незважаючи на зазначені обмеження, для даного проєкту вибір на користь Raspberry Pi є обґрунтованим.

АСК вентиляції ФК не вимагає надзорських часових обмежень, а наявність додаткових функцій, таких як реєстрація параметрів, віддалений доступ або інтеграція з іншими інформаційними системами, є суттєвою перевагою. Використання Raspberry Pi у поєднанні з зовнішніми модулями вводу-виводу дозволяє реалізувати повноцінну систему автоматизації з достатнім рівнем гнучкості, при цьому зменшуючи загальну вартість рішення.

2.5.2 Вибір датчиків і вимірювальних приладів

Для забезпечення стабільної роботи АСК вентиляції ФК необхідно організувати безперервний контроль основних параметрів повітряного середовища та стану обладнання. Вибір датчиків і вимірювальних приладів виконується з урахуванням фізичної природи вимірюваних величин, умов експлуатації та вимог до точності й швидкодії системи. При цьому важливо враховувати сумісність із обраною апаратною платформою, оскільки використання Raspberry Pi накладає певні обмеження на типи сигналів та інтерфейси підключення.

Контроль витрати або швидкості повітря може здійснюватися непрямим методом через вимірювання перепаду тиску. Для цього доцільно використовувати диференціальні датчики тиску, які формують аналоговий або цифровий сигнал. У простіших реалізаціях, сумісних із Raspberry Pi, можуть застосовуватись датчики типу MPX5010 або MPX5050, які дозволяють оцінювати невеликі перепади тиску (рисунк 2.2) [19]. Контроль перепаду тиску на фільтрах реалізується аналогічним способом, але з підвищеними вимогами до точності вимірювання. Для цього можуть застосовуватись більш чутливі датчики або модулі з цифровим інтерфейсом (I2C, SPI), що спрощує інтеграцію з Raspberry Pi та зменшує вплив електромагнітних завад. Отримані значення використовуються не лише для регулювання, але й для діагностики стану фільтрів.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						33
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		



Рисунок 2.2 - Датчик тиску MPX 5010

Температурний контроль може бути реалізований за допомогою простих і доступних цифрових датчиків, таких як DS18B20 (рисунок 2.3) або комбінованих датчиків температури і вологості, наприклад DHT22. Вони підключаються безпосередньо до GPIO-інтерфейсу Raspberry Pi і не потребують додаткових перетворювачів сигналу [20].

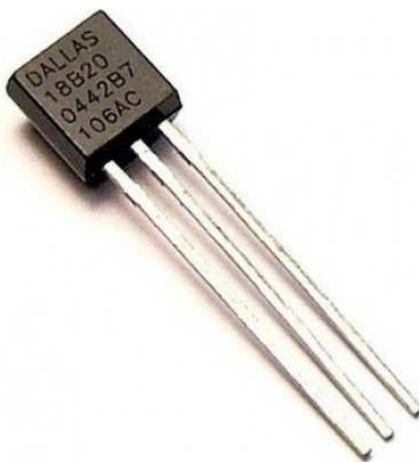


Рисунок 2.3 - Датчик температури DS18B20

Такі датчики забезпечують достатню точність для контролю мікроклімату та можуть використовуватись як у припливному, так і у витяжному каналах.

Для контролю стану повітряного потоку в системі можуть застосовуватись датчики на основі ефекту Холла або оптичні датчики обертів, які встановлюються на вентилятори. Наприклад, контроль частоти обертання дозволяє непрямо оцінювати продуктивність вентилятора та виявляти відхилення від заданого

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		34

режиму. Такі датчики формують дискретні імпульсні сигнали, які безпосередньо обробляються Raspberry Pi через цифрові входи.

Стан виконавчих механізмів контролюється за допомогою простих кінцевих вимикачів або датчиків положення, які формують дискретні сигнали. Вони використовуються для визначення положення заслінок, наявності живлення на обладнанні або підтвердження виконання команд. Підключення таких датчиків до Raspberry Pi здійснюється безпосередньо через GPIO із використанням схем узгодження рівнів напруги. З урахуванням використання Raspberry Pi важливим є також застосування додаткових модулів розширення, які забезпечують промислову сумісність сигналів. Це можуть бути плати вводу-виводу з гальванічною розв'язкою, модулі релейних виходів або інтерфейсні перетворювачі, що дозволяють працювати зі стандартами 4–20 мА. Такий підхід дозволяє поєднати доступність платформи з вимогами до надійності та завадостійкості.

Таким чином, у системі можуть використовуватись як промислові датчики, так і більш прості та доступні рішення, орієнтовані на інтеграцію з Raspberry Pi. Правильний підбір вимірювальних приладів забезпечує достатню точність контролю параметрів і створює основу для ефективної реалізації алгоритмів автоматизації вентиляційної системи.

Оскільки обрана апаратна платформа Raspberry Pi не має вбудованих аналогових входів, виникає необхідність використання додаткових засобів для обробки аналогових сигналів від датчиків. У системі вентиляції ФК значна частина вимірювальних приладів, зокрема датчики тиску та перепаду тиску, формують аналогові сигнали у вигляді напруги.

Для забезпечення можливості їх підключення до контролера було обрано АЦП ADS1115 (рисунок 2.4) [21], який дозволяє перетворювати аналогові сигнали у цифрову форму та передавати їх до Raspberry Pi через інтерфейс I2C. Використання даного модуля забезпечує достатню точність вимірювань, багатоканальність та простоту інтеграції у систему.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

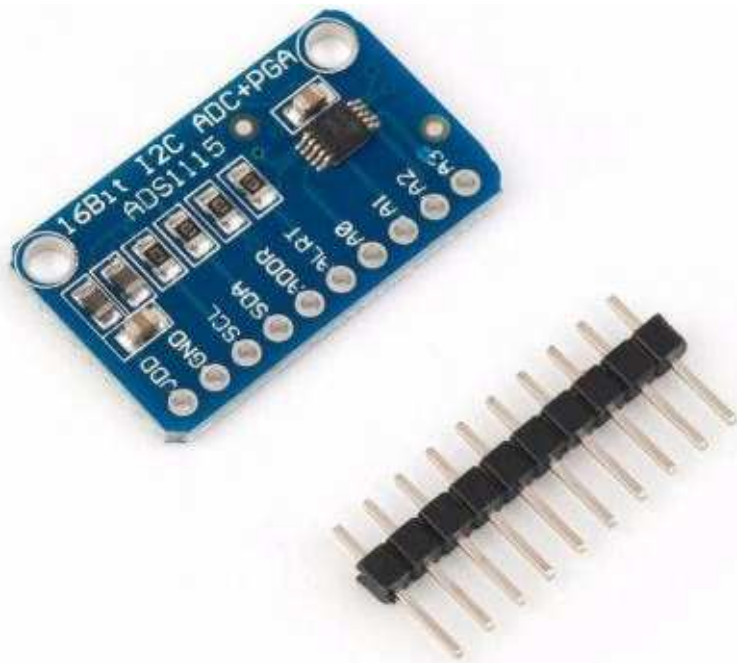


Рисунок 2.4 - АЦП ADS1115

2.5.3 Вибір виконавчих механізмів

Після визначення необхідної витрати повітря та розрахунку втрат тиску виконується підбір вентиляторів, які забезпечують задані параметри роботи вентиляційної системи. Основним завданням на цьому етапі є вибір такого типу вентиляційного обладнання, яке здатне створити необхідну подачу повітря при відповідному аеродинамічному опорі системи. Робоча точка вентилятора визначається перетином його характеристики з характеристикою мережі, що дозволяє забезпечити стабільний режим роботи без перевантаження або недовантаження. Вихідними даними для вибору є витрата повітря, отримана при розрахунку повітрообміну, та сумарні втрати тиску у вентиляційній системі. Продуктивність вентилятора повинна відповідати або незначно перевищувати розрахункову витрату повітря, що забезпечує компенсацію можливих додаткових опорів, які виникають у процесі експлуатації, наприклад через забруднення фільтрів. Напір вентилятора має бути не меншим за розрахований перепад тиску, інакше система не зможе підтримувати необхідний режим руху повітря.

У вентиляційних системах ФК зазвичай застосовуються радіальні (відцентрові) вентилятори (рисунок 2.5) [22], оскільки вони здатні створювати відносно високий тиск і стабільно працювати при значних аеродинамічних

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		36

навантаженнях. Осьові вентилятори, хоча й мають більшу продуктивність при менших габаритах, менш ефективні в умовах високого опору, тому їх використання обмежене або потребує спеціального обґрунтування.



Рисунок 2.4 – Відцентровий вентилятор

В таблиці 2.4 наведено порівняльні характеристики виконавчих механізмів

Таблиця 2.4 – Порівняльні характеристики

Тип вентилятора	Переваги	Недоліки
Канальний вентилятор	Гнучкість установки	Складність монтажу
Осьовий вентилятор	Великий об'єм повітря	Низький рівень тиску
Витяжний вентилятор	Ефективне видалення забруднень	Потребує регулярного очищення
Припливний вентилятор	Підігрів та фільтрація повітря	Висока вартість
Вентилятор равлик	Високий тиск повітря	Великий рівень шуму під час роботи

Вибір конкретного типу вентилятора визначається співвідношенням між необхідною витратою повітря та втратами тиску у системі. Важливим аспектом є також врахування режиму роботи вентилятора. У ФК вентиляція повинна

забезпечувати рівномірний і стабільний потік повітря, тому бажано, щоб робоча точка знаходилась у зоні максимальної ефективності вентилятора. Це дозволяє зменшити енергоспоживання, рівень шуму та знос обладнання. Додатково враховуються такі параметри, як коефіцієнт корисної дії, рівень вібрацій, а також відповідність умовам експлуатації, зокрема наявність забрудненого або насиченого аерозолями повітря.

Оскільки система вентиляції ФК включає як припливну, так і витяжну частини, підбір вентиляторів виконується окремо для кожної з них. При цьому їх робота повинна бути узгодженою для забезпечення правильного напрямку повітряного потоку. Як правило, витяжна система працює з невеликим перевищенням продуктивності, що дозволяє створити незначний розріджений тиск у камері та запобігти виходу забрудненого повітря у виробниче приміщення. Окрему увагу необхідно приділити можливості регулювання продуктивності вентилятора. У сучасних системах це досягається за рахунок використання частотних перетворювачів, які дозволяють плавно змінювати швидкість обертання електродвигуна. Такий підхід забезпечує адаптацію системи до змінних умов роботи, підвищує енергоефективність і дозволяє підтримувати стабільні параметри повітряного середовища в камері.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3. РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ ФАРБУВАЛЬНОЇ КАМЕРИ

3.1 Структурна схема автоматизованої системи керування

На рисунку 3.1 наведено архітектуру проєктованої системи вентиляції ФК, що відображає склад і взаємне розташування елементів припливної та витяжної установок, а також напрямки руху повітряних потоків.

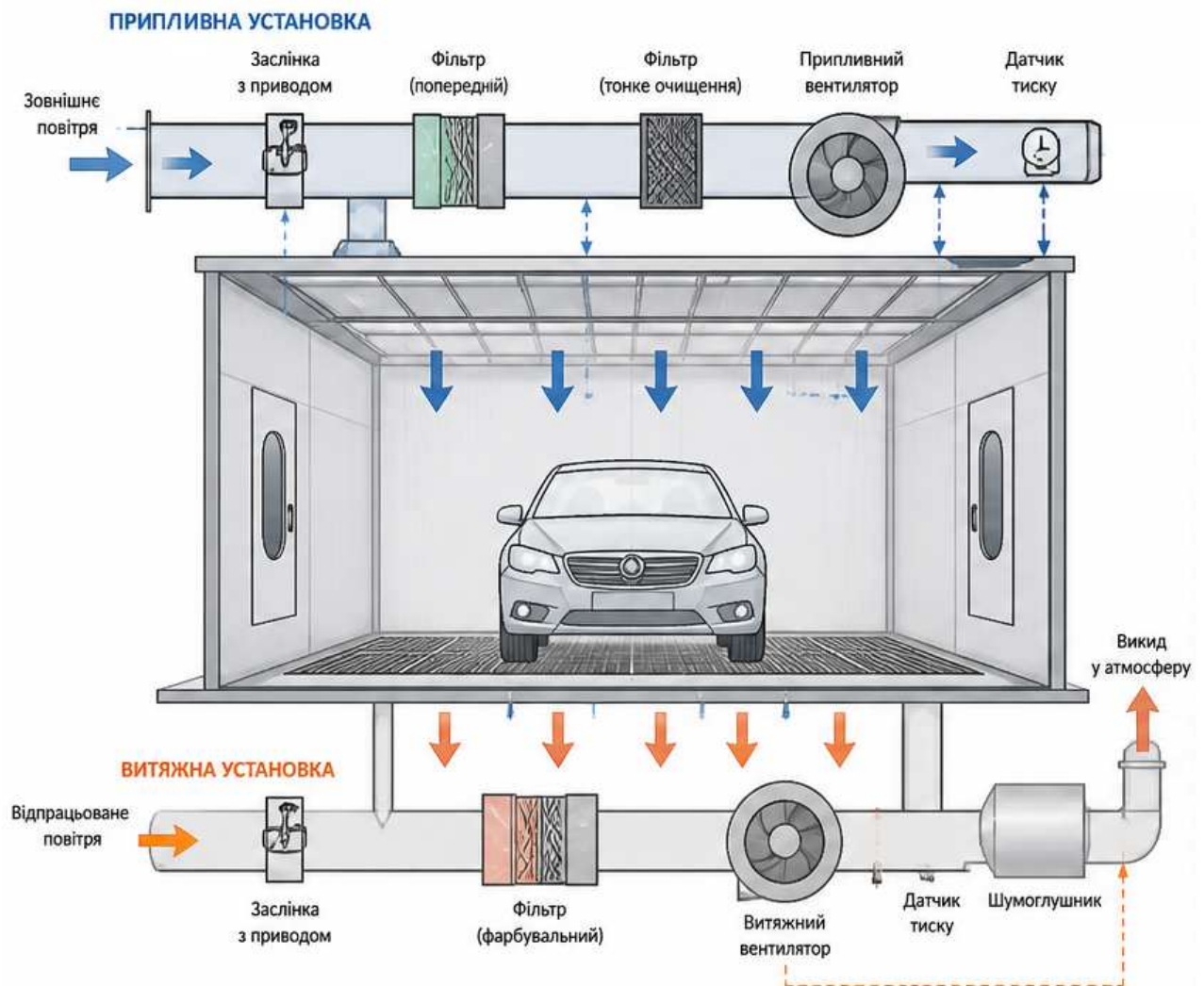


Рисунок 3.1 – Архітектура АСК

Припливна частина системи забезпечує подачу зовнішнього повітря, яке проходить через заслінку з приводом, попередній і тонкий фільтри, після чого за допомогою припливного вентилятора подається у робочий об'єм камери зверху вниз, формуючи рівномірний ламінарний потік.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

У нижній частині камери розташована витяжна установка, через яку відпрацьоване повітря разом із фарбовим аерозолем відводиться через фільтр, витяжний вентилятор та систему повітропроводів у атмосферу. Для контролю параметрів роботи системи на припливному та витяжному каналах встановлено датчики тиску, а напрямки руху повітря в камері показані відповідними стрілками.

Структурна схема АСК вентиляції ФК (рисунок 3.2) визначає структуру взаємодії між вимірювальними каналами, обчислювальним ядром і виконавчими механізмами, які формують керований повітряний режим у робочому об'ємі.

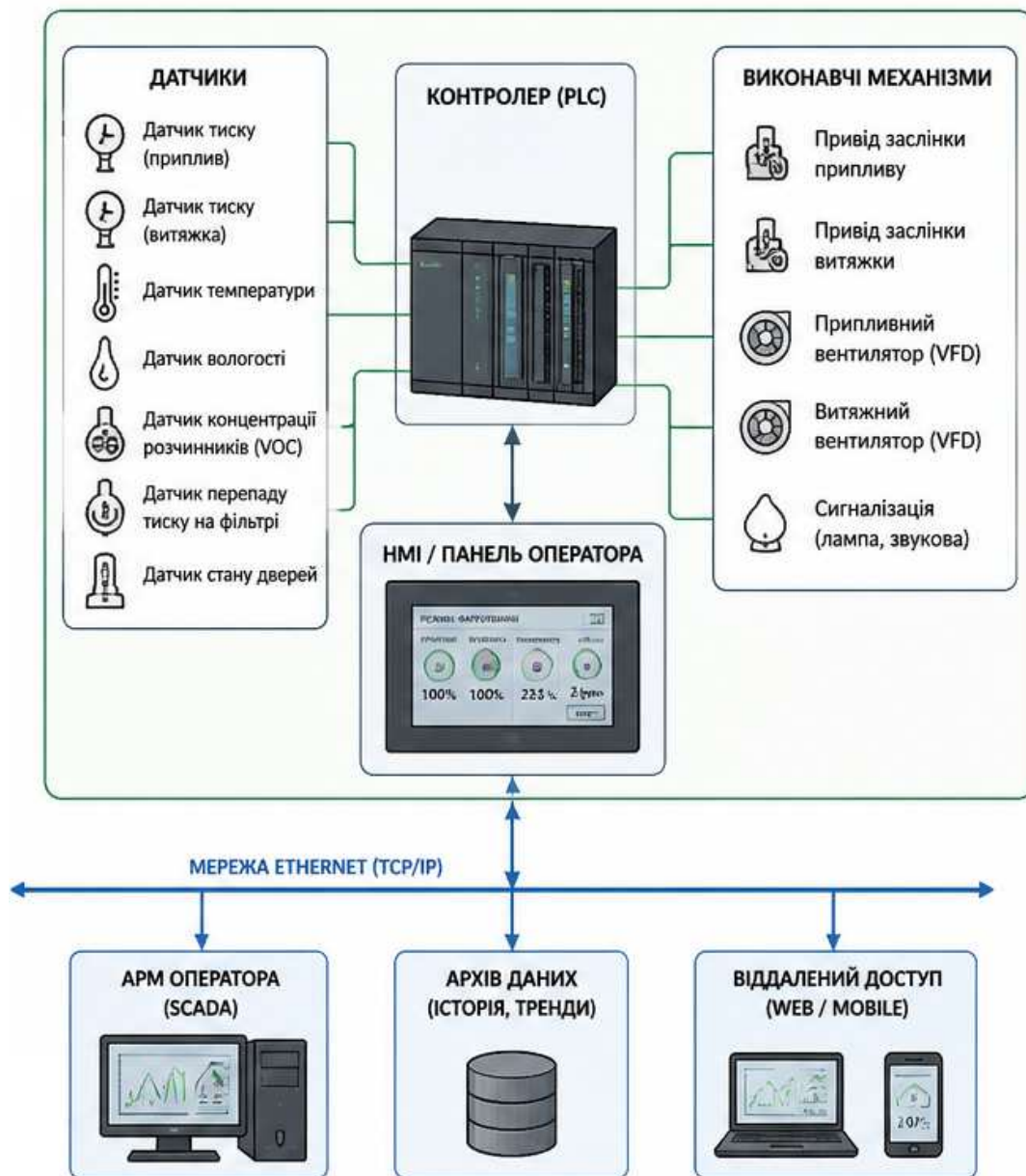


Рисунок 3.2 – Структурна схема АСК вентиляцією ФК

У даному випадку система реалізується як багатоконтурна з елементами каскадного регулювання, де зовнішній контур відповідає за підтримання технологічних параметрів повітряного середовища, а внутрішній - за стабілізацію швидкості обертання вентиляторів та витрати повітря.

Центральним елементом є ПЛК, який виконує функції збору, нормалізації та обробки сигналів, а також синтезу керуючих впливів. На рівні польових пристроїв система оперує аналоговими сигналами стандарту 4–20 мА або 0–10 В, що забезпечує достатню завадостійкість і точність передачі даних у промислових умовах.

Для контролю стану вентиляційної системи використовуються датчики перепаду тиску, які фактично виконують роль непрямого індикатора аеродинамічного опору мережі та ступеня засмічення фільтрувальних елементів. Алгоритмічно система будується з урахуванням інерційності повітряних процесів і наявності запізнення в каналах регулювання. Для цього застосовується ПІД-регулювання витрати повітря або швидкості потоку, причому коефіцієнти регулятора підбираються з урахуванням динамічних характеристик вентилятора та об'єму камери.

У практичній реалізації доцільно використовувати обмеження на швидкість зміни керуючого сигналу, щоб уникнути різких коливань потоку та появи небажаних турбулентних зон у робочому просторі.

Виконавча частина системи включає вентилятори з частотним регулюванням, що дозволяє змінювати продуктивність за законом, близьким до кубічної залежності між швидкістю обертання та витратою повітря. Це дає можливість більш гнучко керувати режимами роботи і знижувати енергоспоживання при часткових навантаженнях.

Окрім цього, у схемі передбачаються керовані заслінки, які дозволяють балансувати повітряні потоки між окремими ділянками системи та компенсувати нерівномірності розподілу. З точки зору аеродинаміки, важливо забезпечити стабільний перепад тиску між верхньою та нижньою зонами камери, що формує направлений вертикальний потік. Тому в системі доцільно реалізувати окремий контур контролю розрідження, який працює за сигналом диференціального

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

датчика тиску і коригує співвідношення продуктивностей припливного та витяжного вентиляторів. Такий підхід дозволяє уникнути виносу аерозолю фарби за межі камери та забезпечує контрольовану траєкторію руху частинок.

У проєктованій схемі також передбачено обробку аварійних і граничних станів із використанням логічних умов та міжблокувань. Наприклад, запуск припливного вентилятора може бути дозволений лише після підтвердження працездатності витяжної частини, що виключає накопичення шкідливих домішок у робочій зоні. Додатково реалізуються діагностичні функції, зокрема контроль достовірності сигналів датчиків і виявлення відхилень від нормального режиму роботи.

3.2 Розробка алгоритму роботи системи автоматизованого керування

Алгоритм роботи АСК вентиляції ФК (рисунок 3.3) визначає послідовність дій керуючої системи при різних режимах експлуатації та описує логіку взаємодії між вимірювальними каналами, регуляторами і виконавчими механізмами. Його структура формується з урахуванням технологічних вимог до процесу фарбування, а також особливостей аеродинаміки повітряних потоків у камері. Основна задача алгоритму полягає у підтриманні стабільного повітряного режиму при мінімальних енергетичних витратах і забезпеченні безпечної роботи обладнання.

Початковий етап роботи системи передбачає перевірку готовності всіх елементів до запуску. Контролер здійснює опитування датчиків, перевіряє наявність сигналів зворотного зв'язку від виконавчих механізмів та відсутність аварійних станів. У випадку некоректних значень або відсутності сигналів формується заборона на запуск системи. Такий підхід дозволяє уникнути роботи в умовах неповної або недостовірної інформації.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

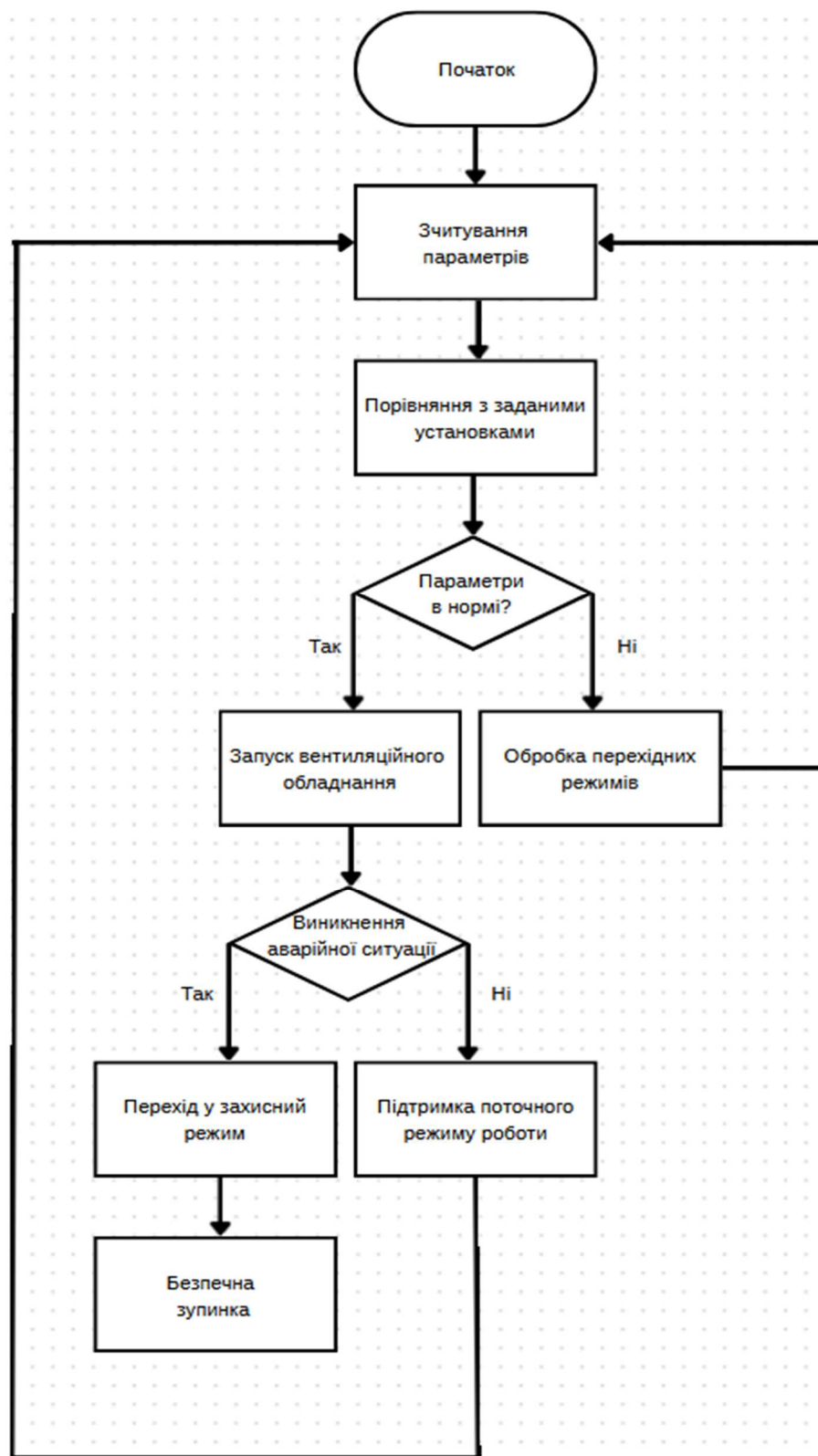


Рисунок 3.2 – Схема алгоритму роботи АСК вентиляцією ФК

Після підтвердження готовності реалізується послідовний запуск вентиляційного обладнання. Спочатку вмикається витяжний вентилятор, що створює початкове розрідження в камері, після чого запускається припливна

частина. Це забезпечує формування направленого потоку повітря і виключає вихід забрудненого повітря у навколишнє середовище.

Розгін електродвигунів виконується плавно за рахунок використання частотного регулювання, що знижує механічні навантаження і електричні пускові струми. У робочому режимі алгоритм реалізує замкнений цикл регулювання. Основним керованим параметром є витрата або швидкість повітряного потоку, яка підтримується на заданому рівні за допомогою ПД-регулятора. При цьому сигнал керування формується на основі відхилення виміряного значення від заданого.

Додатково використовується контур контролю перепаду тиску, який дозволяє коригувати роботу системи з урахуванням зміни аеродинамічного опору, наприклад при забрудненні фільтрів. У цьому випадку алгоритм може автоматично збільшувати частоту обертання вентилятора для компенсації втрат.

Окремо реалізується логіка балансування припливного і витяжного потоків. Для цього контролер аналізує значення тиску в камері і регулює співвідношення продуктивностей вентиляторів таким чином, щоб підтримувати заданий рівень розрідження. Такий режим є критично важливим для забезпечення напрямленого руху повітря і стабільної якості технологічного процесу.

Алгоритм також включає обробку перехідних режимів, які виникають при зміні умов роботи або заданих параметрів. У цих випадках використовуються обмеження на швидкість зміни керуючих сигналів і фільтрація виміряних значень, що дозволяє уникнути коливань і нестійкості системи. Це особливо важливо для запобігання утворенню турбулентних зон, які можуть негативно впливати на рівномірність нанесення фарби.

У разі виникнення аварійних ситуацій алгоритм переходить у захисний режим. До таких ситуацій належать перевищення допустимого перепаду тиску, відмова датчиків, перегрів електродвигунів або відсутність повітряного потоку. У залежності від типу аварії система або обмежує режим роботи, або виконує повне відключення обладнання з одночасною подачею сигналу тривоги. При цьому пріоритет надається безпечній зупинці, що виключає можливість накопичення шкідливих речовин у камері.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Завершення роботи системи також відбувається за визначеним алгоритмом. Спочатку відключається припливна частина, після чого витяжний вентилятор продовжує працювати протягом заданого часу для очищення камери від залишкових аерозолів. Лише після цього система повністю зупиняється. Така послідовність забезпечує видалення забрудненого повітря і підготовку камери до наступного циклу роботи.

3.3 Розробка системи автоматичного регулювання швидкості обертання вентиляторів

Регулювання швидкості вентиляторів є ключовим елементом забезпечення необхідного повітрообміну та стабільності аеродинамічного режиму в фарбувальній камері. Зміна швидкості обертання робочого колеса безпосередньо впливає на продуктивність вентилятора, створюваний тиск та енергоспоживання. З урахуванням аеродинамічних законів подібності, витрата повітря пропорційна швидкості обертання, тоді як тиск змінюється пропорційно квадрату швидкості, що робить регулювання ефективним інструментом адаптації системи до змінних умов.

Найбільш доцільним способом регулювання є використання частотних перетворювачів, які дозволяють плавно змінювати частоту живлення електродвигуна та швидкість його обертання. Такий підхід забезпечує високу енергоефективність, зменшує пускові струми і знижує механічні навантаження на обладнання. У АСК вентиляції ФК це особливо важливо, оскільки дозволяє підтримувати стабільний повітряний потік без різких змін швидкості, які можуть призводити до порушення ТП.

Керування частотними перетворювачами може здійснюватися за аналоговим сигналом і через цифрові інтерфейси. У випадку використання Raspberry Pi реалізація керування можлива кількома способами. Найпростішим є формування широтно-імпульсного сигналу (PWM) з подальшим перетворенням його в аналогову напругу за допомогою зовнішнього цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) або спеціалізованого модуля. Отриманий сигнал

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

використовується як керуючий для частотного перетворювача, що задає необхідну швидкість обертання вентилятора.

Більш гнучким варіантом є використання цифрових протоколів обміну, наприклад Modbus RTU або Modbus TCP, якщо частотний перетворювач підтримує такі інтерфейси. У цьому випадку Raspberry Pi виступає як майстер-пристрій, який передає команди керування, зчитує робочі параметри (частоту, струм, стан приводу) і реалізує зворотний зв'язок у програмному середовищі. Такий підхід дозволяє значно розширити функціональні можливості системи, включаючи діагностику та віддалений моніторинг.

Структурно система складається з таких основних ланок:

- регулятор (ПД),
- частотний перетворювач,
- електродвигун,
- вентилятор,
- об'єкт регулювання (повітряний об'єм камери),
- вимірювальний елемент (датчик).

Передавальні функції основних ланок можуть бути представлені таким чином:

1. Частотний перетворювач (аперіодична ланка):

$$W_{\text{пч}}(s) = \frac{k_{\text{пч}}}{T_{\text{пч}}s + 1}.$$

2. Електродвигун (інерційна ланка):

$$W_{\text{дв}}(s) = \frac{k_{\text{дв}}}{T_{\text{дв}}s + 1}.$$

3. Вентилятор (статична ланка):

$$W_{\text{в}}(s) = k_{\text{в}}.$$

4. Об'єкт регулювання (камера як інерційна ланка):

$$W_{\text{об}}(s) = \frac{k_{\text{об}}}{T_{\text{об}}s + 1}.$$

5. Датчик (вимірювальна ланка):

$$W_{\text{д}}(s) = k_{\text{д}}.$$

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Загальна передавальна функція об'єкта керування (ОК):

$$W_{\text{ок}}(s) = W_{\text{пч}}(s) * W_{\text{дв}}(s) * W_{\text{в}}(s) * W_{\text{об}}(s) * W_{\text{д}}(s);$$

або

$$W_{\text{ок}}(s) = \frac{k}{(T_{\text{пч}}s + 1)(T_{\text{дв}}s + 1)(T_{\text{об}}s + 1)},$$

де

$$k = k_{\text{пч}} * k_{\text{дв}} * k_{\text{в}} * k_{\text{об}}.$$

Алгоритм регулювання швидкості вентиляторів базується на принципі зворотного зв'язку і може бути представлений у вигляді замкненої системи автоматичного регулювання.

Структурна схема системи автоматичного регулювання (САР) швидкості вентиляторів наведена на рисунку 3.3.

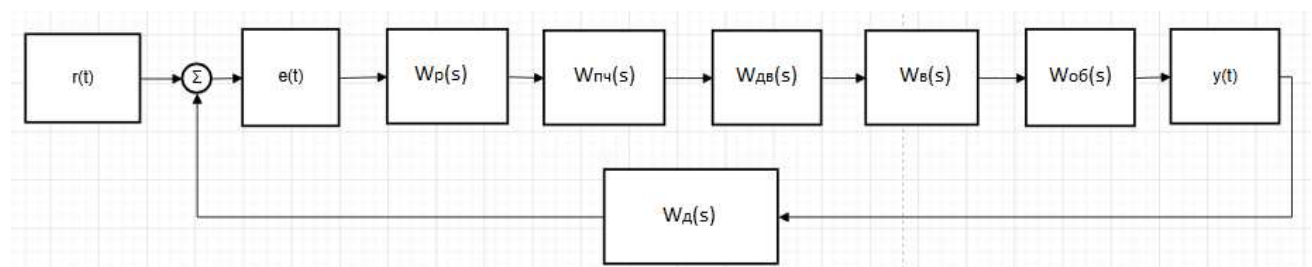


Рисунок 3.3 – Структурна схема САР швидкості вентиляторів

До складу системи входять ПІД-регулятор $W_p(s)$, частотний перетворювач, електродвигун, вентилятор, об'єкт регулювання. Вимірювальна ланка (датчик) $W_d(s)$ враховується у контурі зворотного зв'язку. З урахуванням регулятора загальна передавальна функція замкненої системи має вигляд:

$$W_{\text{зс}}(s) = \frac{W_p(s) * W_{\text{ок}}(s)}{1 + W_p(s) * W_{\text{ок}}(s) * W_d(s)}.$$

В якості керованої величини може виступати витрата повітря, швидкість потоку або перепад тиску. Відповідний сигнал з датчика порівнюється із заданим значенням, після чого формується керуючий вплив на частотний перетворювач.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		47

Для цього використовується ПІД-регулятор, який дозволяє мінімізувати відхилення та забезпечити стійкий режим роботи без коливань.

При налаштуванні регулятора враховується інерційність системи, обумовлена механічними характеристиками вентилятора і об'ємом повітря в камері. У системі також доцільно реалізувати обмеження мінімальної та максимальної швидкості обертання, що запобігає роботі вентилятора у неефективних або небезпечних режимах.

Додатково можуть використовуватись функції плавного пуску і зупинки, які реалізуються на рівні частотного перетворювача або програмно. Це дозволяє зменшити динамічні навантаження та продовжити ресурс обладнання. З урахуванням використання Raspberry Pi, регулювання швидкості може бути інтегроване з іншими функціями системи автоматизації, зокрема логікою балансування припливного і витяжного потоків. Контролер у реальному часі коригує швидкість обертання кожного вентилятора, підтримуючи необхідний перепад тиску в камері та забезпечуючи задану траєкторію руху повітря. Це дозволяє досягти оптимального поєднання якості технологічного процесу та енергоефективності системи.

3.4 Програмна реалізація проєктованої системи

Програмна реалізація АСК вентиляції ФК базується на принципах ПЛК, однак з урахуванням обраної апаратної платформи у вигляді Raspberry Pi фактично реалізується як програмний ПЛК (soft PLC). Логіка керування виконується у вигляді циклічного опитування входів, обробки сигналів та формування керуючих впливів, що відповідає класичній моделі scan cycle у промислових контролерах, ці та інші команди описані в посібнику Python.

Програма структурно поділяється на кілька функціональних блоків:

- зчитування даних із датчиків;
- фільтрація та нормалізація сигналів;
- реалізація алгоритмів керування;
- формування вихідних сигналів;

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- обробка аварійних станів.

Основний цикл виконується з фіксованим або квазіреальним інтервалом часу, що визначає швидкодію системи. На рисунку 3.4 наведено приклад реалізації на мові Python, яка використовується для програмування Raspberry Pi:

```
import time
import spidev # для роботи з АЦП
import RPi.GPIO as GPIO

# Налаштування GPIO
FAN_PWM_PIN = 18
GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(FAN_PWM_PIN, GPIO.OUT)

pwm = GPIO.PWM(FAN_PWM_PIN, 1000) # частота 1 кГц
pwm.start(0)

# Параметри ПІД-регулятора
Kp = 2.0
Ki = 0.5
Kd = 0.1

setpoint = 8.0 # задана швидкість повітря
integral = 0
prev_error = 0

def read_sensor():
    # умовна функція зчитування значення швидкості
    # тут має бути код роботи з АЦП
    return 6.5

while True:
    # 1. Зчитування даних
    velocity = read_sensor()

    # 2. Обчислення похибки
    error = setpoint - velocity

    # 3. ПІД-регулювання
    integral += error
    derivative = error - prev_error
    output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative

    prev_error = error

    # 4. Обмеження сигналу
    output = max(0, min(100, output))

    # 5. Формування керуючого сигналу
    pwm.ChangeDutyCycle(output)

    # 6. Затримка циклу
    time.sleep(0.1)
```

Рисунок 3.4 - Керування швидкістю вентилятора

У наведеному фрагменті реалізовано базовий цикл керування швидкістю вентилятора. Блок зчитування даних представлений функцією `read_sensor()`, яка в реальній системі повинна взаємодіяти з аналого-цифровим перетворювачем або цифровим датчиком. Отримане значення інтерпретується як поточна швидкість повітря або еквівалентна їй величина.

Далі виконується обчислення похибки як різниці між заданим значенням (`setpoint`) і поточним значенням. На основі цієї похибки працює ПІД-регулятор, який складається з трьох складових:

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

- пропорційної (K_p);
- інтегральної (K_i);
- диференціальної (K_d).

Пропорційна частина визначає реакцію на поточну похибку, інтегральна - накопичує похибку в часі для усунення статичного відхилення, а диференціальна - враховує швидкість зміни похибки, що дозволяє зменшити перерегулювання. Отриманий керуючий сигнал обмежується в діапазоні від 0 до 100, що відповідає відсотку заповнення ШІМ-сигналу.

Далі цей сигнал подається на вихід PWM, який використовується для керування частотним перетворювачем або драйвером вентилятора через відповідний інтерфейс узгодження.

Важливою частиною програми є забезпечення стабільності циклу виконання. Використання затримки `time.sleep()` дозволяє задати період опитування, однак у більш складних системах доцільно застосовувати таймери або багатопотокову обробку для підвищення точності часу виконання.

Окрім основного контуру регулювання, у програмі мають бути реалізовані додаткові функції, такі як контроль аварійних станів, перевірка достовірності сигналів датчиків, логіка запуску та зупинки системи, а також обробка взаємозв'язків між припливною і витяжною вентиляцією. Наприклад, у випадку перевищення допустимого перепаду тиску може формуватись сигнал на обмеження швидкості або повне відключення системи.

Програмна реалізація, доповнена блоками, які реалізують обробку аварій, керування запуском/зупинкою, обмін по Modbus та логування даних. В результаті структуру програми розширено шляхом додавання глобальних станів системи та базової логіки керування режимами (рисунок 3.5).

У наведеному фрагменті додано систему логування, яка записує події у файл, а також підключення до Modbus-пристрою, наприклад, частотного перетворювача. Введено змінні стану системи, що дозволяють реалізувати логіку роботи на рівні автомата станів.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```

import time
import logging
from pymodbus.client import ModbusTcpClient
import RPi.GPIO as GPIO

# --- Налаштування логування ---
logging.basicConfig(
    filename='ventilation.log',
    level=logging.INFO,
    format='%(asctime)s %(levelname)s: %(message)s'
)

# --- GPIO ---
FAN_PWM_PIN = 18
START_BUTTON = 23
STOP_BUTTON = 24

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(FAN_PWM_PIN, GPIO.OUT)
GPIO.setup(START_BUTTON, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)
GPIO.setup(STOP_BUTTON, GPIO.IN, pull_up_down=GPIO.PUD_UP)

pwm = GPIO.PWM(FAN_PWM_PIN, 1000)
pwm.start(0)

# --- Modbus ---
client = ModbusTcpClient('192.168.0.100') # частотник або інший пристрій
client.connect()

# --- Стани ---
system_running = False
alarm_state = False

# --- PID ---
Kp, Ki, Kd = 2.0, 0.5, 0.1
setpoint = 8.0
integral = 0
prev_error = 0

```

Рисунок 3.5 - Система логування

Далі реалізовано блок запуску та зупинки проєктованої АСК вентиляцією ФК. Функція для реалізації кнопок керування наведено на рисунку 3.6.

Реалізований блок виконує опитування кнопки керування і змінює стан системи. Використовується проста затримка для усунення фальшивого спрацювання.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

```
def check_buttons():
    global system_running

    if GPIO.input(START_BUTTON) == 0:
        system_running = True
        logging.info("Система запущена")
        time.sleep(0.3)

    if GPIO.input(STOP_BUTTON) == 0:
        system_running = False
        logging.info("Система зупинена")
        time.sleep(0.3)
```

Рисунок 3.6 - Кнопки керування

На рисунку 3.7 наведено функцію, що реалізує блок обробки аварійних ситуацій.

```
def check_alarms(pressure, temperature):
    global alarm_state

    if pressure > 300: # перевищення тиску
        alarm_state = True
        logging.error("Аварія: перевищення тиску")

    elif temperature > 50: # перегрів
        alarm_state = True
        logging.error("Аварія: перегрів")

    else:
        alarm_state = False
```

Рисунок 3.7 - Блок обробки аварійних ситуацій

Даний блок реалізує базову діагностику. У випадку аварії АСК переходить у захисний режим. У реальному проєкті перелік умов значно ширший (втрата сигналу датчика, обрив зв'язку, перевантаження приводу).

Оновлений ПД-регулятор з урахуванням станів наведений на рисунку 3.8.

```
def pid_control(measured):
    global integral, prev_error

    error = setpoint - measured
    integral += error
    derivative = error - prev_error

    output = Kp * error + Ki * integral + Kd * derivative
    prev_error = error

    return max(0, min(100, output))
```

Рисунок 3.8 – Реалізація ПД-регулятора

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

Функція повертає керуючий сигнал, який далі використовується або для PWM, або для передачі через Modbus.

Блок керування через Modbus наведений на рисунку 3.9.

```
def send_to_vfd(value):  
    try:  
        register_value = int(value * 10) # масштабування  
        client.write_register(0x0001, register_value)  
    except Exception as e:  
        logging.error(f"Помилка Modbus: {e}")
```

Рисунок 3.9 - Блок керування

Цей фрагмент демонструє передачу керуючого сигналу у частотний перетворювач. Адреса регістру залежить від конкретної моделі пристрою.

Основний цикл програми наведений на рисунку 3.10.

```
while True:  
    check_buttons()  
  
    if system_running and not alarm_state:  
        velocity = read_sensor()  
  
        check_alarms(pressure=250, temperature=30)  
  
        if not alarm_state:  
            control_signal = pid_control(velocity)  
  
            pwm.ChangeDutyCycle(control_signal)  
            send_to_vfd(control_signal)  
  
            logging.info(f"Швидкість: {velocity}, Керування: {control_signal}")  
        else:  
            pwm.ChangeDutyCycle(0)  
  
    else:  
        pwm.ChangeDutyCycle(0)  
  
    time.sleep(0.1)
```

Рисунок 3.10 - Цикл програми

У цьому циклі реалізовано повну логіку:

- перевірка стану АСК;
- контроль аварійних станів системи;
- виконання регулювання швидкості роботи вентиляторів;
- журналювання та ведення архіву.

У випадку аварії або зупинки система негайно відключає керування

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

вентилятором.

Для перевірки коду було створено імітаційну модель. Програмна реалізація імітаційної моделі АСК вентиляцією ФК виконана мовою Python і базується на принципах дискретного моделювання замкнених систем керування. У межах роботи створено програмний симулятор, який відтворює поведінку реальної системи без використання фізичних датчиків та виконавчих пристроїв, замінюючи їх математичними та алгоритмічними моделями.

Вхідні дані у симуляторі задаються у вигляді програмних змінних, що відповідають основним контрольованим параметрам системи. Зокрема, задане значення (setpoint) визначає необхідний рівень швидкості повітряного потоку, який система повинна підтримувати. Поточні значення вимірюваних величин, таких як швидкість повітря, тиск та температура, не зчитуються з реальних датчиків, а генеруються внутрішньою моделлю стану системи. Таким чином, функції зчитування замінені програмними змінними, що оновлюються на кожному кроці симуляції.

Основу моделювання поведінки об'єкта керування становить функція `plant_model()`, яка імітує реакцію вентиляційної системи на зміну керуючого сигналу. Керуючий вплив у вигляді виходу ПД-регулятора (`fan_output`) передається у модель, де він змінює стан системи з урахуванням інерційності та обмежень.

У результаті на кожній ітерації циклу перераховується фактична швидкість повітряного потоку, а також оновлюються допоміжні параметри, такі як тиск і температура. Це дозволяє відтворити динамічну поведінку реальної вентиляційної камери, де зміни не відбуваються миттєво, а мають перехідний характер.

Обчислення керуючого сигналу здійснюється за допомогою ПД-регулятора, який реалізований у вигляді функції `pid()`. На кожному кроці моделювання визначається похибка як різниця між заданим значенням та поточним станом системи. На основі цієї похибки обчислюються три складові регулятора: пропорційна, інтегральна та диференціальна.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

Отриманий результат формує керуючий сигнал, який обмежується у діапазоні від 0 до 100 відсотків, що інтерпретується як рівень потужності вентилятора.

Основний цикл програми реалізує принцип дискретного часового кроку, що імітує роботу промислового контролера у режимі циклічного опитування. На кожній ітерації виконуються послідовні операції: обчислення вихідного стану об'єкта, розрахунок керуючого впливу, оновлення параметрів середовища та збереження результатів у масивах даних. Таким чином формується часовий ряд, який дозволяє аналізувати перехідні процеси та якість регулювання.

Додатково у моделі реалізовано механізм аварійних обмежень, який перевіряє перевищення допустимих значень тиску та температури. У випадку виходу параметрів за встановлені межі система переходить у захисний режим, при якому керуючий сигнал примусово встановлюється в нульове значення. Це дозволяє імітувати поведінку реальних систем безпеки, що використовуються у промислових вентиляційних установках.

Отримані в процесі моделювання дані накопичуються та візуалізуються у вигляді графіків (рисунок 3.11).

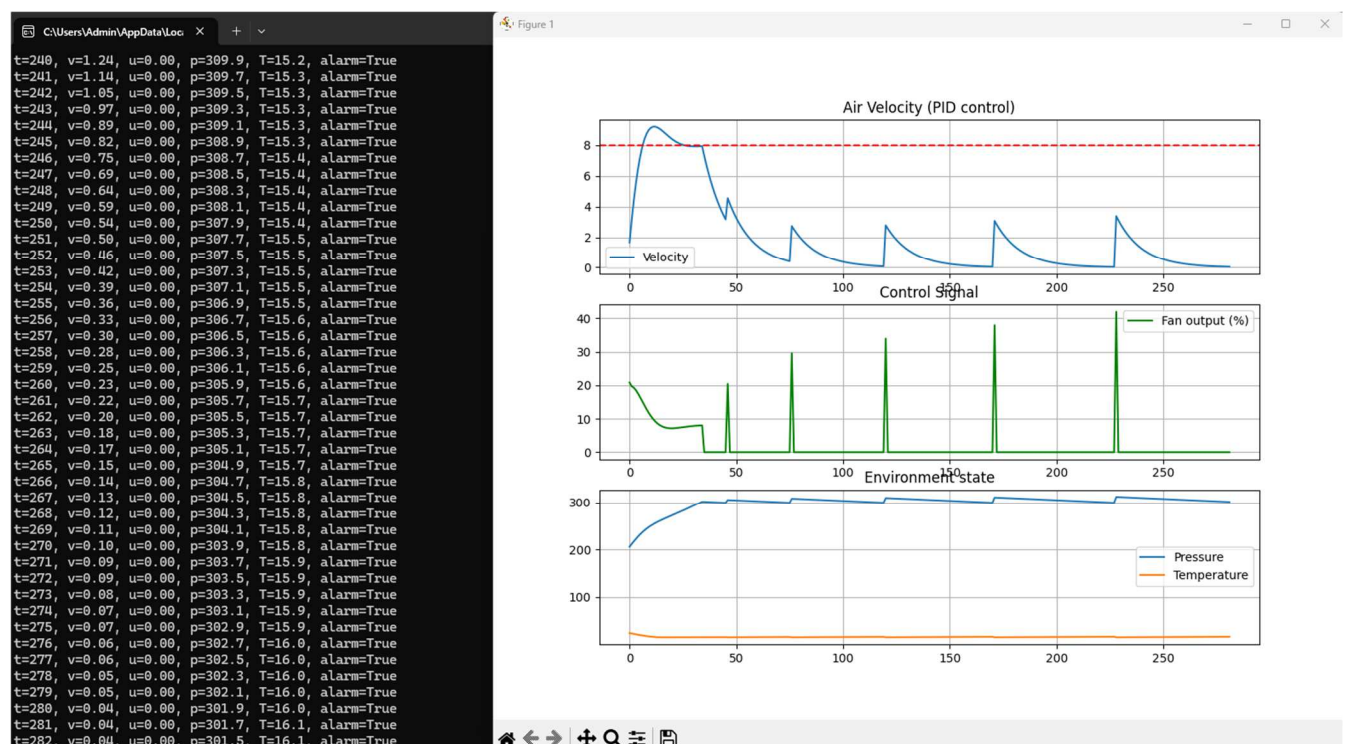


Рисунок 3.11 - Реалізація імітаційної моделі

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		55

Це дозволяє оцінити характер зміни контрольованих параметрів, швидкість виходу системи на режим, наявність перерегулювання та загальну стійкість системи автоматичного керування. Таким чином програмна модель виконує функцію інструменту для дослідження динаміки системи без необхідності використання фізичного обладнання.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано розробку автоматизованої системи керування вентиляцією фарбувальної камери з метою забезпечення стабільних параметрів повітряного середовища, підвищення якості технологічного процесу фарбування та зменшення енергоспоживання.

У процесі виконання роботи проведено аналіз технологічного процесу фарбування та визначено основні параметри, що впливають на якість нанесення лакофарбового покриття, зокрема швидкість повітряного потоку, температуру, тиск і чистоту повітря. Встановлено, що система вентиляції є ключовим об'єктом автоматизації, оскільки забезпечує формування необхідного аеродинамічного режиму в робочій зоні.

На основі проведених розрахунків визначено параметри вентиляційної системи для стандартної фарбувальної камери розмірами $7 \times 4 \times 3$ м. Обґрунтовано, що визначальним фактором є швидкість повітряного потоку, а не кратність повітрообміну. Розраховано, що необхідна витрата повітря становить $30240 \text{ м}^3/\text{год}$, що стало основою для подальшого вибору обладнання та розрахунку повітропроводів.

У роботі виконано розрахунок параметрів вентиляційних каналів та втрат тиску у системі, що дозволило обґрунтувати вибір вентиляторів продуктивністю $36000\text{--}40000 \text{ м}^3/\text{год}$ із напором не менше 300 Па . Отримані результати забезпечують ефективне видалення фарбового аерозолі та стабільність повітряного потоку в камері.

Обґрунтовано вибір компонентів автоматизованої системи керування, зокрема вентиляторів, частотних перетворювачів, датчиків та контролера.

У роботі синтезовано структуру системи автоматичного керування, що базується на використанні частотного регулювання швидкості вентиляторів. Реалізовано алгоритм керування із застосуванням ПД-регулятора, що забезпечує підтримання заданих параметрів повітряного середовища з необхідною точністю та стійкість роботи системи.

Запропоновано реалізацію системи керування на базі мікроконтролерної

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

платформи з використанням цифрових протоколів обміну даними, що забезпечує гнучкість, масштабованість і можливість інтеграції з системами моніторингу.

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Міністерство регіонального розвитку України, 2013.

2. Автоматизація процесів сушіння поверхонь після фарбування. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://tweko.com.ua/avtomatizacija-procesiv-sushinnja-povertihni-pislja-farbuвання/>

3. Автоматизовані системи фарбування, що підвищують ефективність та якість у сучасному виробництві. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.evsint.com/uk/automated-paint-systems-enhancing-efficiency/>

4 .Покривна камера для ліній промислового нанесення покриттів та автоматизованих систем остаточної обробки металевих поверхонь. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.ourcoatingline.com/uk/showlist/paintline-spray-booth>

5. How to build a Shop Air Cleaner and Paint Booth Ventilation System. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=huGU5WzWA5w>

6. Why Is Your Spray Booth - Paint Booth Air Flow So Important? [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=AFNfW3Bs3CM>

7. Raspberry Pi Documentation. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.raspberrypi.com/documentation/>

8. Python Documentation. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://docs.python.org/3/>

9. Modbus manual. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocollspecification.pdf>

10. Åström K.J., Murray R.M. Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers. Princeton: Princeton University Press, 2008. 408 p.

11. Node red user guide. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://nodered.org/docs/user-guide/>

12. Documentation for SIMATIC Controller. [Електронний ресурс].- Режим

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

доступу:

<https://support.industry.siemens.com/cs/document/109744173/documentation-for-simatic-controller?dti=0&lc=en-UA>

13. How to measure spray booth Airflow. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.youtube.com/watch?v=UCDHvG4HlmU>

14. Viewer Request: Paint Booth Explained (Size & How It Works). [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://www.youtube.com/watch?v=-FBNpOhhg_Q

15. Принцип роботи автомобільної фарбувальної камери [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://tweko.com.ua/princip-roboti-farbuvalnoi-kameri/>

16. Проект вентиляції фарбувальної камери [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://tweko.com.ua/proekt-ventilyacziyi-farbuvalnoyi-kamery/>

17. Як правильно організувати вентиляцію фарбувальної камери [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://zazbruchem.te.ua/news/yak-pravyl-no-orhanizuvaty-ventilyatsiiu-farbuval-noi-kamery_328245.html

18. Проекування вентиляції в фарбувальній камері: практичні нюанси та теоретичні аспекти. [Електронний ресурс].- Режим доступу: https://turbovent.com.ua/ua/a474021-proektirovanie-ventilyatsii-pokrasochnoj.html?srsId=AfmBOoq-fbyb4lnxxBbSxwQnAUCZ-vC_8Q-3516b8Ms-HqEGoQ1YXvAj

19. NXP Pressure Sensor Low Pressure Sensor. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://uk.rs-online.com/web/p/pneumatic-pressure-sensors/7191080>

20. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer DS18B20. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.analog.com/en/products/ds18b20.html>

21. ADS1115 ACTIVE 16-bit, 860-SPS, 4-channel, delta-sigma ADC with PGA, oscillator, VREF, comparator and I2C. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.ti.com/product/ADS1115>

22. Відцентровий вентилятор 330 Вт, 110 В/220 В, 2800 об/хв. [Електронний ресурс].- Режим доступу: <https://www.ato.com/330w-centrifugal-fan>

					ДП.АКІТ.10658653.00.00.000ПЗ	Арк.
						60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		