

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

на тему **"РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО
КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ В ОБ'ЄКТІ УКРИТТЯ
ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ"**

Спеціальність: 174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка"

Гарант освітньої програми

К.Т.Н., доц.
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Керівник кваліфікаційної бакалаврської роботи

К.Т.Н., доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

Виконав

(підпис)

Саушкін А.Р.
(П.І.Б.)

КИЇВ – 2026

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНІ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
автоматики та робототехнічних систем
ім. акад. І.І. Мартиненка
(назва кафедри)

К.Т.Н., доц. _____ О.О. Опришко
(підпис) (ПІБ)

" ____ " _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи студенту

Саушкіну Андрію Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальність: 174 - "Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка"

1. Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи: "Розроблення системи автоматичного керування вентиляцією в об'єкті укриття цивільного захисту",

затверджена наказом ректора НУБіП України від "18" 11 2025 р. № 2056"С"

2. Термін подання завершеної роботи на кафедру "30" травня 2026 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної бакалаврської роботи:

3.1. Завдання кафедри на виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи.

3.2. Нормативні документи по проектуванню об'єктів автоматизації.

3.3. Наукова література з тематики кваліфікаційної бакалаврської роботи.

4. Перелік питань, які необхідно розробити:

4.1 Технологічна характеристика об'єкта керування.

4.2 Побудова та дослідження математичної моделі об'єкта керування.

4.3 Реалізація алгоритму керування об'єктом.

4.4 Електротехнічна частина.

4.5 Техніко-економічне обґрунтування.

5. Перелік графічних документів:

5.1 Функціональна схема автоматизації.

5.2 Електрична принципова схема.

Дата видачі завдання "21" листопада 2025 року

**Керівник кваліфікаційної
бакалаврської роботи**

(підпис)

Дудник А.О.
(П.І.Б.)

**Завдання прийняв до
виконання**

(підпис)

Саушкін А.Р.
(П.І.Б.)

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	5
ANNOTATION	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ	8
1.1. Загальна характеристика об'єкта керування	8
1.2. Опис технологічного процесу вентиляції.....	9
1.3. Інформаційний аналіз об'єкта керування	11
1.4. Функціональна схема автоматизації	13
РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ.....	17
2.1. Побудова математичної моделі об'єкта керування	17
РОЗДІЛ 3. РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ	22
3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму	22
3.2. Вибір технічних засобів	24
3.2.1. Вибір сприймаючого елемента.....	25
3.2.2. Вибір виконавчого пристрою	27
3.3. Реалізація алгоритму керування.....	29
3.3.1. Визначення періоду дискретизації.....	30
3.3.2. Налаштування ПІД-регулятора	30
3.3.3. Дослідження системи	33
3.4. Розробка SCADA-системи диспетчерського керування.....	34
РОЗДІЛ 4. ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА	40
4.1. Вибір пускозахисної апаратури, проводів та кабелів.....	40
4.2. Розробка електричної принципової схеми	42
4.3. Розробка схеми з'єднань	44
4.4. Розробка схеми підключень.....	45
4.5. Розробка загального вигляду щита керування.....	46
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБґРУНТУВАННЯ.....	50
5.1. Мета впровадження	50
5.2. Аналіз існуючого рішення	50
5.3. Розрахунок витрат при використанні попередньої версії програми	51
5.4. Капітальні витрати на впровадження системи	52

5.5. Витрати при автоматичному керуванні.....	53
5.6. Економічний ефект від впровадження.....	54
ВИСНОВКИ.....	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
Додаток А	
Додаток Б	
Додаток В	
Додаток Г	

АНОТАЦІЯ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі розглянуто розроблення системи автоматизації вентиляції в об'єктах укриття цивільного захисту. Проаналізовано основні чинники впливу на мікроклімат підвальних приміщень, зокрема тепловиділення та зміну концентрації шкідливих домішок у повітрі, а також сучасні методи автоматичного регулювання температурного режиму. Описано апаратно-програмну реалізацію системи на основі програмованого логічного контролера ПЛК110 із використанням SCADA-системи TRACE MODE для візуалізації та диспетчеризації процесу.

Проведено вдосконалення алгоритму керування, розроблено математичну модель об'єкта та обґрунтовано економічну доцільність впровадження запропонованої системи.

ANNOTATION

This bachelor's qualification thesis presents the development of a ventilation automation system in civil protection shelter facilities. The study analyzes the main factors affecting the microclimate of basement premises, including heat generation and changes in the concentration of harmful impurities in the air, as well as modern methods of automatic temperature control. The hardware and software implementation of the system is described using the PLC110 programmable logic controller and the TRACE MODE SCADA system for process visualization and dispatching. The control algorithm has been improved, a mathematical model of the object was developed, and the economic feasibility of implementing the proposed system was substantiated.

ВСТУП

У сучасних умовах важливого значення набуває забезпечення безпечних умов перебування людей у захисних спорудах цивільного захисту [10, 13]. Одним із основних факторів, що впливають на безпеку та комфорт перебування людей в укриттях, є підтримання нормативних параметрів повітряного середовища [8, 9]. Під час тривалого перебування людей у закритому приміщенні відбувається підвищення температури повітря, вологості та концентрації вуглекислого газу, що негативно впливає на самопочуття людей та може призводити до погіршення умов перебування в укритті. У зв'язку з цим виникає необхідність застосування ефективних систем вентиляції та автоматичного керування їх роботою.

Система вентиляції укриття повинна забезпечувати безперервну подачу свіжого повітря, видалення нагрітого та забрудненого повітря, підтримання необхідного температурного режиму та стабільну роботу обладнання у штатних і аварійних режимах. Використання автоматизованих систем керування дозволяє забезпечити необхідні параметри мікроклімату, підвищити енергоефективність вентиляційного обладнання та зменшити вплив людського фактора на процес керування [11, 15].

Особливого значення набуває використання мікропроцесорних засобів автоматизації, які дають можливість реалізувати сучасні алгоритми керування вентиляційними системами, забезпечити контроль параметрів повітряного середовища та автоматично реагувати на зміну умов роботи об'єкта. Одним із найбільш поширених методів автоматичного регулювання технологічних процесів є використання ПД-регуляторів, які забезпечують необхідну точність, швидкодію та стійкість систем автоматичного керування [2, 5, 6].

Об'єктом дослідження у даній бакалаврській кваліфікаційній роботі є система вентиляції укриття цивільного захисту розмірами 20×10 м та висотою 3 м, розрахованого на перебування 20 осіб. У роботі розглядається система припливно-витяжної вентиляції з основними та резервними вентиляторами,

автоматизованим керуванням та контролем параметрів повітряного середовища.

Предметом дослідження є процес автоматичного регулювання температури повітря в укритті шляхом зміни продуктивності вентиляційної системи.

Метою бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка системи автоматизації вентиляції укриття цивільного захисту для підтримання заданого температурного режиму та підвищення ефективності роботи вентиляційного обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- виконати технологічну характеристику об'єкта керування;
- провести інформаційний аналіз системи вентиляції;
- розробити функціональну схему автоматизації;
- побудувати математичну модель об'єкта керування;
- обґрунтувати вибір алгоритму автоматичного керування;
- виконати моделювання системи автоматичного регулювання;
- дослідити показники якості та стійкості системи;
- підібрати технічні засоби автоматизації;
- виконати техніко-економічне обґрунтування розробленої системи

У роботі використано методи математичного моделювання, теорії автоматичного керування, аналізу динамічних систем та комп'ютерного моделювання. Побудова структури кваліфікаційної роботи та зміст основних розділів виконані відповідно до методичних рекомендацій [1] щодо підготовки бакалаврських кваліфікаційних робіт.

Практична цінність роботи полягає у можливості використання запропонованої системи автоматизації для забезпечення стабільного температурного режиму в укриттях цивільного захисту, підвищення ефективності роботи вентиляційного обладнання та покращення умов перебування людей у приміщенні.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

У даному розділі наведено технологічну характеристику об'єкта керування, виконано опис технологічного процесу вентиляції укриття цивільного захисту, проведено інформаційний аналіз об'єкта та розглянуто функціональну схему автоматизації системи вентиляції [10]. Основну увагу приділено аналізу температурного режиму приміщення як основного параметра, що підлягає автоматичному регулюванню.

1.1. Загальна характеристика об'єкта керування

Одним із важливих елементів забезпечення нормальних умов перебування людей у захисних спорудах цивільного захисту є система вентиляції. Її основним призначенням є підтримання необхідних параметрів повітряного середовища в приміщенні шляхом організації безперервного повітрообміну. Під час перебування людей у закритому приміщенні відбувається підвищення температури повітря, збільшення вологості та погіршення загального стану мікроклімату, що потребує застосування ефективних вентиляційних систем.

Об'єктом керування у даній роботі є укриття цивільного захисту, яке являє собою підвальне приміщення прямокутної форми розмірами 20×10 м та висотою 3 м. Загальна площа приміщення становить 200 м^2 , а внутрішній об'єм – 600 м^3 . Розрахункова місткість укриття складає 20 осіб [10,13].

Для забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в укритті використовується система припливно-витяжної вентиляції. Принцип її роботи полягає у подачі свіжого зовнішнього повітря до приміщення та одночасному видаленні відпрацьованого повітря через витяжну систему. Такий спосіб вентиляції дозволяє підтримувати допустимі параметри температури та забезпечувати необхідний повітрообмін у приміщенні.

Під час роботи системи вентиляції на температурний режим приміщення впливають різні фактори, основними з яких є температура зовнішнього

повітря, кількість людей у приміщенні, теплонадходження від людей та обладнання, а також інтенсивність повітрообміну. У процесі перебування людей в укритті відбувається виділення теплоти, внаслідок чого температура внутрішнього повітря поступово підвищується. Для підтримання комфортних умов перебування людей необхідно забезпечити стабільний температурний режим шляхом регулювання продуктивності вентиляційної системи.

Система вентиляції укриття працює у режимі чистої вентиляції, за якого зовнішнє повітря після очищення подається до приміщення, а нагріте повітря видаляється через витяжні канали. Для забезпечення надійності роботи вентиляційної системи передбачено використання основного та резервного обладнання. Це дозволяє забезпечити безперервність роботи системи у разі виникнення несправностей або відмов окремих елементів.

З технологічної точки зору система вентиляції є складним об'єктом керування, у якому відбуваються процеси тепло- та масообміну. Основним параметром, що характеризує тепловий стан приміщення, є температура внутрішнього повітря. Саме температура у даній роботі приймається як основна регульована величина, оскільки вона безпосередньо впливає на умови перебування людей у захисній споруді.

Таким чином, система вентиляції укриття цивільного захисту є важливим інженерним об'єктом, ефективність роботи якого визначається здатністю підтримувати необхідні параметри мікроклімату в умовах змінних зовнішніх та внутрішніх впливів. Автоматизація процесу вентиляції дозволяє забезпечити стабільність температурного режиму, підвищити надійність роботи обладнання та покращити умови перебування людей у приміщенні.

1.2. Опис технологічного процесу вентиляції

Технологічний процес вентиляції укриття цивільного захисту полягає у забезпеченні безперервного повітрообміну в приміщенні з метою підтримання необхідних параметрів мікроклімату. Основним завданням системи вентиляції

є подача свіжого повітря до приміщення та видалення нагрітого і забрудненого повітря назовні [11].

У процесі перебування людей в укритті відбувається виділення теплоти та вологи, що призводить до зміни параметрів внутрішнього повітря. За відсутності достатнього повітрообміну температура повітря у приміщенні поступово підвищується, що негативно впливає на комфорт перебування людей. Для підтримання необхідного температурного режиму використовується система припливно-витяжної вентиляції.

Принцип роботи системи полягає у подачі зовнішнього повітря через припливні канали до приміщення укриття. Після надходження до приміщення свіже повітря змішується з внутрішнім повітрям, сприймає надлишкову теплоту та забезпечує охолодження приміщення. Відпрацьоване нагріте повітря видаляється через витяжні канали за допомогою витяжної вентиляції.

Інтенсивність повітрообміну залежить від режиму роботи вентиляційного обладнання та параметрів внутрішнього повітря. Основним фактором, який впливає на зміну температури у приміщенні, є теплонадходження від людей, а також температура зовнішнього повітря. У теплий період року температура зовнішнього повітря може перевищувати допустимі значення температури в укритті, що ускладнює процес підтримання необхідного мікроклімату. У таких умовах особливого значення набуває автоматичне регулювання роботи вентиляційної системи.

Для забезпечення надійної роботи системи вентиляції передбачено використання основного та резервного вентиляційного обладнання. У штатному режимі працюють основні вентилятори, які забезпечують необхідний повітрообмін у приміщенні. У разі виникнення несправності або відмови основного обладнання в роботу вводяться резервні вентилятори, що дозволяє забезпечити безперервне функціонування системи вентиляції.

У процесі роботи вентиляційної системи відбуваються процеси тепло- та масообміну між внутрішнім і зовнішнім повітрям. Температура повітря у приміщенні змінюється залежно від кількості людей, інтенсивності вентиляції,

температури зовнішнього повітря та теплових втрат через огорожувальні конструкції приміщення. Для забезпечення стабільного температурного режиму необхідно здійснювати автоматичне регулювання продуктивності системи вентиляції.

У даній роботі як основний параметр автоматичного регулювання прийнято температуру внутрішнього повітря. Регулювання температури здійснюється шляхом зміни продуктивності вентиляційної системи залежно від теплового стану приміщення. Такий підхід дозволяє підтримувати необхідні умови перебування людей в укритті та забезпечує ефективну роботу системи вентиляції у різних режимах експлуатації.

1.3. Інформаційний аналіз об'єкта керування

Інформаційний аналіз об'єкта керування виконується з метою визначення основних параметрів технологічного процесу, виявлення керувальних і збурювальних впливів, а також вибору регульованої величини для подальшого дослідження системи автоматичного керування.

Об'єктом керування у даній роботі є система вентиляції укриття цивільного захисту, основним завданням якої є підтримання необхідних параметрів мікроклімату в приміщенні. У процесі роботи вентиляційної системи на стан повітряного середовища впливають як зовнішні, так і внутрішні фактори.

До основних вхідних параметрів системи належать:

- температура зовнішнього повітря;
- продуктивність припливно-витяжної вентиляції;
- кількість людей у приміщенні;
- теплонадходження від людей та обладнання.

Основними вихідними параметрами системи є:

- температура внутрішнього повітря;
- вологість повітря;
- концентрація вуглекислого газу;

- загальний стан мікроклімату приміщення.

Під час роботи системи вентиляції на об'єкт керування діють різноманітні збурення. Найбільший вплив на температурний режим приміщення мають зміна температури зовнішнього повітря, зміна кількості людей у приміщенні та теплонадходження всередині укриття. Усі ці фактори призводять до зміни температури внутрішнього повітря та потребують компенсації за рахунок зміни режиму роботи вентиляційної системи.

Для забезпечення ефективної роботи системи вентиляції необхідно реалізувати автоматичне регулювання параметрів мікроклімату. У даній роботі основною регульованою величиною прийнято температуру внутрішнього повітря, оскільки саме вона найбільше впливає на комфорт перебування людей у приміщенні та характеризує тепловий стан об'єкта.

Керувальним впливом у системі є зміна продуктивності вентиляції. Зі збільшенням інтенсивності повітрообміну температура внутрішнього повітря знижується, а зі зменшенням продуктивності вентиляції – підвищується. Таким чином, регулювання температури здійснюється шляхом зміни режиму роботи вентиляційного обладнання.

Для оцінювання роботи системи автоматичного керування необхідно визначити критерій ефективності функціонування об'єкта. У даній роботі критерієм ефективності є підтримання температури внутрішнього повітря на заданому рівні з мінімальним відхиленням від встановленого значення. Математично це можна подати у вигляді:

$$\Delta t = |t_{\text{вн}} - t_{\text{зад}}| \rightarrow \min \quad (1.1)$$

де

$t_{\text{вн}}$ – фактична температура повітря у приміщенні;

$t_{\text{зад}}$ – задане значення температури.

Основні параметри об'єкта керування наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Параметр	Позначення	Характеристика
Температура внутрішнього повітря	$t_{\text{вн}}$	Регульована величина
Температура зовнішнього повітря	$t_{\text{зовн}}$	Збурювальний вплив
Продуктивність вентиляції	Q	Керувальний вплив
Кількість людей у приміщенні	N	Внутрішнє збурення
Теплонадходження	$Q_{\text{т}}$	Збурювальний вплив

Проведений інформаційний аналіз показав, що система вентиляції укриття є багатопараметричним об'єктом керування, на який впливають різноманітні зовнішні та внутрішні фактори. Для подальшого математичного дослідження доцільно виділити температурний контур керування, оскільки температура є основним параметром, що визначає комфортність умов перебування людей у приміщенні та найбільш повно характеризує тепловий стан об'єкта [4, 6].

1.4. Функціональна схема автоматизації

Для забезпечення автоматичного керування системою вентиляції укриття цивільного захисту розроблено функціональну схему автоматизації, яка забезпечує контроль параметрів повітряного середовища, керування роботою вентиляційного обладнання та підвищення надійності функціонування системи [7, 16].

Функціональна схема автоматизації системи вентиляції укриття цивільного захисту наведена на рисунку 1.1.

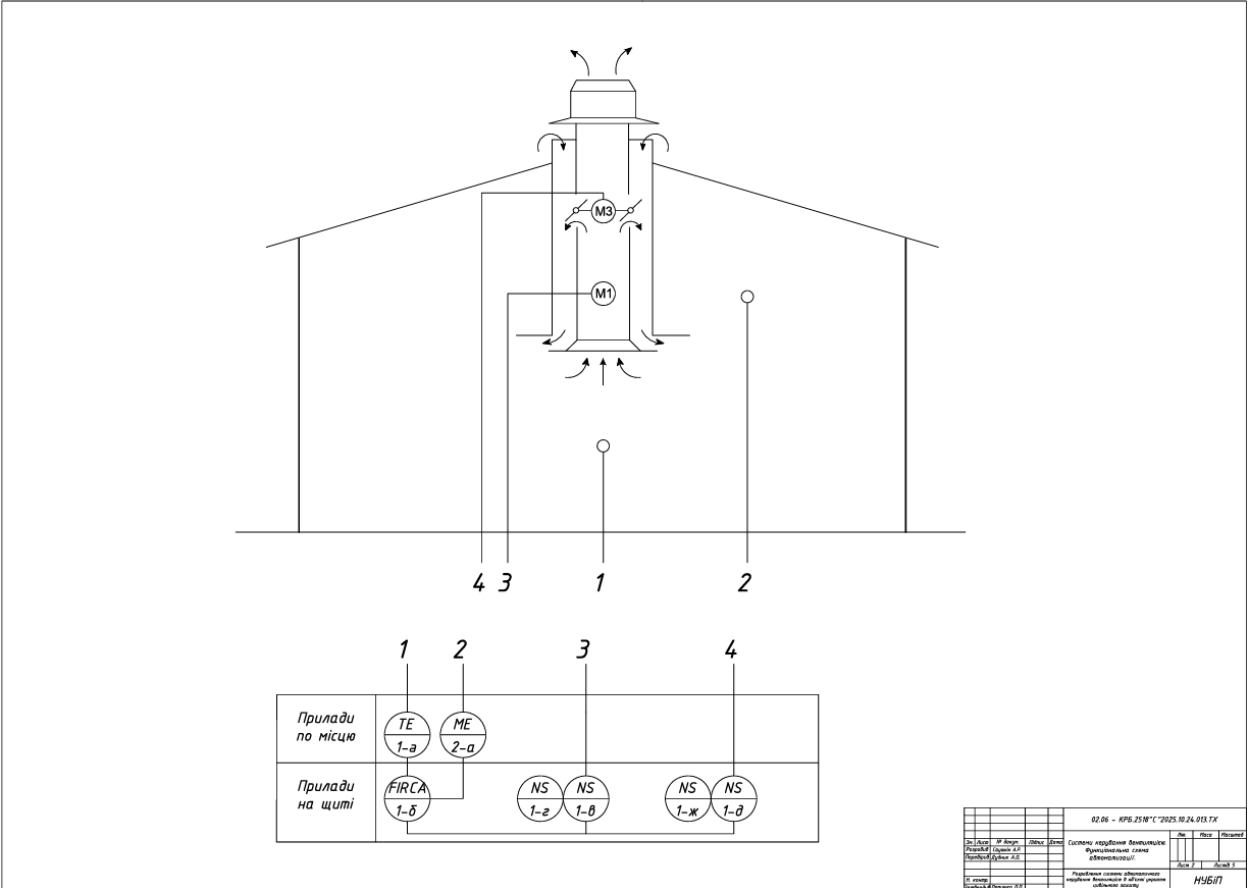


Рис. 1.1 Функціональна схема автоматизації системи вентиляції укриття цивільного захисту

На функціональній схемі автоматизації зображено припливну та витяжну частини системи вентиляції, вимірювальні контури, контури керування, а також виконавчі механізми системи.

Припливна система вентиляції призначена для подачі свіжого повітря до приміщення укриття. У її складі передбачено основний вентилятор М1 та резервний вентилятор М2. Видалення нагрітого та відпрацьованого повітря здійснюється витяжною системою, до складу якої входять основний вентилятор М3 та резервний вентилятор М4.

Для забезпечення надійності роботи системи вентиляції передбачено резервування вентиляційного обладнання. У штатному режимі працюють основні вентилятори, які забезпечують необхідний повітрообмін у приміщенні. У разі виникнення несправності або відмови основного

вентилятора система забезпечує перехід на резервний агрегат, що дозволяє підтримувати безперервну роботу вентиляційної системи.

Керування потоками повітря у вентиляційних каналах здійснюється за допомогою заслінок з електроприводами YA1–YA4. Заслінки забезпечують відкривання або перекривання відповідних каналів залежно від режиму роботи системи вентиляції.

Контроль параметрів повітряного середовища здійснюється за допомогою датчиків якості повітря QE, встановлених у приміщенні укриття. Датчики формують сигнали про стан повітряного середовища та передають їх до мікроЕОМ для подальшої обробки.

Для контролю роботи вентиляційної системи та наявності повітряного потоку у вентиляційних каналах використовуються датчики витрати повітря FF. Сигнали від датчиків надходять до вторинних приладів FY, які забезпечують обробку інформації та передачу сигналів до системи керування.

Керування роботою електродвигунів вентиляторів здійснюється за допомогою магнітних пускачів КМ. Для місцевого керування та перемикання режимів роботи системи використовуються ключі керування KS.

Основним елементом системи автоматизації є мікроЕОМ, яка виконує функції збору, обробки та аналізу інформації, що надходить від датчиків системи. На основі отриманих сигналів мікроЕОМ формує керувальні впливи на виконавчі механізми вентиляційної системи та забезпечує реалізацію алгоритму роботи системи вентиляції.

У штатному режимі роботи система забезпечує подачу свіжого повітря до приміщення укриття та видалення нагрітого повітря через витяжні канали. Робота вентиляторів здійснюється відповідно до встановленого режиму роботи вентиляційної системи.

У разі виникнення аварійної ситуації, пов'язаної з відмовою одного з основних вентиляторів, система формує сигнал аварії та забезпечує введення в роботу резервного обладнання. Це дозволяє підтримувати працездатність

системи вентиляції та забезпечувати необхідні параметри мікроклімату у приміщенні.

На функціональній схемі автоматизації також передбачено вимірювальні контури та контури керування. Вимірювальні контури забезпечують отримання інформації про параметри роботи системи, а контури керування реалізують передачу команд від мікроЕОМ до виконавчих механізмів вентиляційної системи.

Основною регульованою величиною у даній роботі є температура внутрішнього повітря приміщення. Регулювання температури здійснюється шляхом зміни режиму роботи вентиляційної системи залежно від стану повітряного середовища та умов роботи об'єкта.

Запропонована функціональна схема автоматизації забезпечує автоматичний контроль параметрів повітряного середовища, керування роботою вентиляційного обладнання, резервування основних елементів системи та підтримання необхідного режиму роботи вентиляції укриття цивільного захисту.

РОЗДІЛ 2

ПОБУДОВА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

Для дослідження системи автоматичного керування вентиляцією укриття цивільного захисту необхідно побудувати математичну модель об'єкта керування. Математична модель дозволяє описати динамічні властивості об'єкта, визначити характер зміни температури повітря у приміщенні та дослідити реакцію системи на зміну керувальних і збурювальних впливів.

2.1 Побудова математичної моделі об'єкта керування

Складемо тепловий баланс для приміщення укриття цивільного захисту з припливно-витяжною вентиляцією [2, 5].

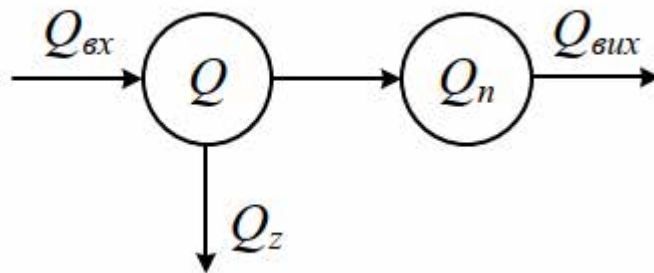


Рис. 2.1. Тепловий баланс при охолодженні повітря в укритті

Математична модель температурного режиму будується на основі теплового балансу, після чого виконується розрахунок у середовищі Mathcad.

У приміщенні укриття відбувається теплообмін між припливним повітрям, внутрішнім повітрям та тепловиділеннями від людей. Основною регульованою величиною є температура повітря в укритті.

У статичному режимі тепловий баланс має вигляд:

$$Q_{вх} + Q_{л} - Q_{вих} = 0 \quad (2.1)$$

де:

Q_{ex} – кількість теплоти, що надходить у приміщення з припливним повітрям;

$Q_{вих}$ – кількість теплоти, що видається з приміщення витяжним повітрям;

Q_l – кількість теплоти, що виділяється людьми.

У динамічному режимі тепловий баланс запишемо у вигляді:

$$\frac{dQ_n}{d\tau} = Q_{ex} + Q_l - Q_{вих} \quad (2.2)$$

де:

Q_n – кількість теплоти, що міститься у повітрі приміщення;

τ – час, с.

Враховуючи, що:

$$Q_n = V_n * \rho_n * C_p * t_3 \quad (2.3)$$

$$Q_{ex} = V_w * \rho_n * C_p * t_1 \quad (2.4)$$

$$Q_{вих} = V_w * \rho_n * C_p * t_3 \quad (2.5)$$

$$Q_l = n * q_l \quad (2.6)$$

де:

V_n – об'єм повітря у приміщенні укриття, m^3 ;

V_w – витрата вентиляційного повітря, m^3/c ;

ρ_n – густина повітря, kg/m^3 ;

C_p – питома теплоємність повітря, Дж/(кг*°C);

t_1 – температура припливного повітря, °C;

t_3 – температура повітря в укритті, °C;

n – кількість людей у приміщенні;

q_l – тепловиділення однієї людини, Вт.

Підставивши рівняння (2.3)–(2.6) у рівняння (2.2), отримаємо диференціальне рівняння зміни температури повітря в укрітті:

$$\frac{dt}{d\tau} = \frac{V_w}{V_n} * (t_1 - t_3) + \frac{n * q_l}{V_n * \rho_n * c_p} \quad (2.7)$$

Рівняння (2.7) є математичною моделлю температурного режиму укріття як об'єкта керування.

Для моделі приймемо, що теплофізичні параметри повітря не залежать від температури в межах похибки розрахунку.

$$C_p = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\rho_n = 1.234 \text{ кг}/\text{м}^3$$

Характеристики укріття:

$$V_n = 600 \text{ м}^3$$

$$V_k = 15 \text{ м}^3$$

$$V_w = 1.5 \text{ м}^3/\text{с}$$

де:

V_k – об'єм повітря у вентиляційних каналах.

Постійна часу об'єкта керування по каналу регулювання температури визначається як відношення об'єму приміщення до продуктивності вентиляції:

$$T_{OK} = \frac{V_n}{V_w} \quad (2.8)$$

Після підстановки значень:

$$T_{OK} = \frac{600}{1.5} = 400 \text{ с}$$

Час транспортного запізнення визначимо як відношення об'єму вентиляційних каналів до продуктивності вентиляції:

$$\tau_{OK} = \frac{V_k}{V_w} \quad (2.9)$$

Після підстановки числових значень:

$$\tau_{OK} = \frac{15}{1.5} = 10 \text{ с}$$

Таким чином, об'єкт керування має інерційні властивості та транспортне запізнення, що необхідно враховувати при подальшому виборі регулятора.

За результатами розрахунку будується крива розгону об'єкта керування, яка характеризує зміну температури повітря у приміщенні при роботі вентиляційної системи.

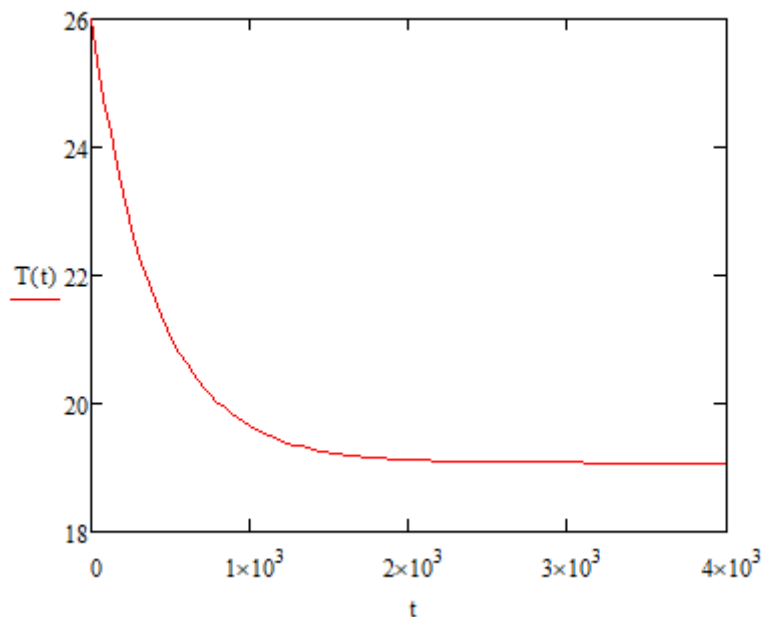


Рис. 2.2. Крива розгону об'єкта керування по каналу регулювання температури

Отримана крива розгону характеризує динамічні властивості об'єкта керування та дозволяє оцінити характер зміни температури повітря в укрітті при зміні режиму роботи вентиляційної системи. Аналіз кривої показує, що об'єкт має виражені інерційні властивості, а зміна температури відбувається поступово з наявністю транспортного запізнення.

Для подальшого синтезу системи автоматичного керування, вибору типу регулятора та дослідження стійкості системи необхідно визначити передатну функцію об'єкта керування. Передатна функція дозволяє математично описати взаємозв'язок між вхідною та вихідною величинами системи, а також врахувати інерційність і транспортне запізнення об'єкта.

$$W(s) = \frac{19}{400s+1} * e^{-10s}$$

У даній роботі об'єкт керування розглядається по каналу «продуктивність вентиляції – температура повітря в укритті», оскільки зміна режиму роботи вентиляторів безпосередньо впливає на температурний режим приміщення. Зі збільшенням продуктивності вентиляції температура повітря в укритті знижується, а зі зменшенням – підвищується.

Для визначення передатної функції використаємо параметри об'єкта, отримані в результаті математичного моделювання.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ

3.1. Вибір та обґрунтування алгоритму

У практиці автоматичного регулювання виробничих і цивільних об'єктів особливе значення має правильний вибір регуляторів і розрахунок їх оптимальних параметрів налагодження. Ці завдання вирішують на стадії проєктування САР і уточнюють у процесі налагодження регуляторів безпосередньо на працюючому об'єкті.

Зазначені завдання пов'язані зі статикою і динамікою об'єктів регулювання та базуються на методиці, виробленій на основі теоретичних досліджень і перевірень у практиці налагодження різних САР. Цілі, що реалізуються в процесі вибору регуляторів і розрахунку їх оптимальних параметрів, зводяться до такого:

САР і регулятори, що входять до її складу, повинні відповідати технологічним та експлуатаційним вимогам об'єкта укриття цивільного захисту і режимам роботи вентиляційної системи.

Система повинна бути стійкою при найбільш характерних збуреннях – стрибкоподібній зміні температури зовнішнього повітря та зміні кількості людей у приміщенні.

Повинна бути забезпечена потрібна якість процесу регулювання в динамічному і статичному станах системи, включаючи динамічну точність при неперервній зміні збурення, мінімальну статичну похибку та швидке відновлення заданого температурного режиму.

Для забезпечення раціонального вибору регулятора важливо правильно оцінити технологічні й експлуатаційні вимоги, що висуваються до системи керування вентиляцією укриття. З технологічних умов потрібно підтримувати температуру внутрішнього повітря з відхиленням не більше ± 2 С від заданого значення.

Оскільки характер експлуатаційних збурень не є закономірним, стан рівноваги регульованої системи є неперервно змінним і характеризується

середнім відхиленням регульованої величини за певний проміжок часу. Основним збуренням є стрибкоподібна зміна температури зовнішнього повітря ($\Delta t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), яка є типовою для умов експлуатації укріття в перехідні пори року.

Для оцінки вибору типу регулятора визначається динамічний коефіцієнт регулювання R_d , який являє собою відношення максимально допустимого відхилення регульованої величини X_1 до добутку коефіцієнта передачі об'єкта $K_{уст}$ та величини збурення $y_{збур}$:

$$R_d = \frac{X_1}{K_{уст} * y_{збур}},$$

де $X_1 = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимально допустиме відхилення температури повітря в укрітті; $K_{уст} = 0.72$ – коефіцієнт передачі об'єкта керування; $y_{збур} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – величина стрибкоподібного збурення по температурі зовнішнього повітря.

$$R_d = \frac{2}{0.72 * 5} = \frac{2}{3.6} \approx 0.56.$$

Отримане значення $R_d = 0.56$ порівнюється з даними таблиці 3.1, у якій наведено мінімально досяжні значення динамічного коефіцієнта регулювання для різних типів регуляторів.

Таблиця 3.1. Динамічний коефіцієнт регулювання

Тип регулятора	Аперіодичний	З 20% перерегулюванням	$\int x^2 dt$
П	2.9	1.4	-
ПІ	1.4	1.3	0.9
ПІД	1.3	1.1	0.8

З таблиці 3.1 видно, що П-регулятор забезпечує мінімальний $R_d = 1.4$, ПІ-регулятор – $R_d = 0.9$, тоді як розраховане значення $R_d = 0.56$ є меншим за всі наведені значення для П та ПІ регуляторів. Найменше значення динамічного коефіцієнта регулювання досягається при використанні ПІД-регулятора з критерієм $\int x^2 dt$ [2, 5, 6].

Таким чином, для забезпечення необхідної якості регулювання температури повітря в укритті цивільного захисту обирається ПІД-регулятор, який забезпечує: нульову статичну похибку (за рахунок інтегральної складової); прискорену реакцію на збурення (за рахунок диференціальної складової); необхідне значення динамічного коефіцієнта регулювання при заданих параметрах об'єкта.

3.2. Вибір технічних засобів

Функціональна схема САР – це схема, на якій зображено функціональні елементи системи та зв'язки між ними (рис. 3.1). Елементи на функціональній схемі позначаються у вигляді прямокутників, всередині яких скорочено пишуть назву елемента. Зв'язки між елементами показують лініями, а їх напрямки – стрілками.

На функціональній схемі основної системи автоматичного керування вентиляцією укриття об'єктом керування (ОК) є приміщення укриття цивільного захисту. Вихідним параметром, що контролюється, є температура внутрішнього повітря $t_{вн}$. Первинним перетворювачем (СЕ) є датчик температури. Порівнюючим елементом виступає (ПЕ), вихідним сигналом якого є напруга управління U_y , що надходить до виконавчого пристрою (ВП) – вентилятора з електроприводом.

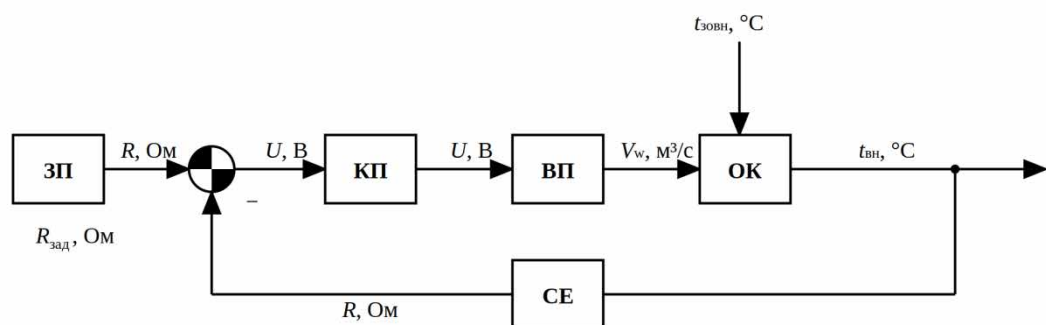


Рис. 3.1. Функціональна схема САР температури повітря в укритті цивільного захисту, де

ЗП – задаючий пристрій;

ПЕ – порівнюючий елемент;

ВП – виконавчий пристрій (вентилятор з електродвигуном);

ОК – об’єкт керування (приміщення укриття);

СЕ – сприймаючий елемент (датчик температури);

U, V – напруга на двигуні вентилятора;

$t_{вн}$, °C – температура внутрішнього повітря в укритті.

Датчик (СЕ) – термоперетворювач опору. Вихідна величина – R, Ом (опір).

3.2.1. Вибір сприймаючого елементу (датчик температури)

Сприймаючий елемент (датчик температури) призначений для безперервного вимірювання температури повітря в укритті цивільного захисту та перетворення її у нормований електричний сигнал, придатний для обробки програмованим логічним контролером. До датчика висуваються вимоги: діапазон вимірюваних температур повинен охоплювати робочий діапазон приміщення укриття (+5 ... +30 °C); похибка вимірювання не більше $\pm 0,5$ °C; постійна часу датчика значно менша за постійну часу об’єкта керування [18].

Цим вимогам відповідає термоперетворювач опору *ОВЕН ДТС125Л-РТ100.В3.60* – платиновий датчик з номінальною статичною характеристикою Pt100, призначений для вимірювання температури повітря у системах вентиляції (табл. 3.2, рис. 3.2).

Таблиця 3.2

Технічні характеристики ДТС125Л-РТ100.В3.60

Параметр	Значення
Виробник	ОВЕН
Номінальна статична характеристика	Pt100
Діапазон вимірювання, °C	від –60 до +85

Клас допуску	В
Схема підключення	трипровідна
Довжина монтажної частини, мм	60
Ступінь захисту	IP65
Постійна часу, с	30



Рис. 3.2. Термоперетворювач опору ОВЕН ДТС125Л-РТ100.В3.60

Передатна функція датчика як інерційної ланки першого порядку має вигляд:

$$W_{CE}(s) = \frac{K_{CE}}{T_{CE}s + 1} \quad (3.1)$$

де K_{CE} – коефіцієнт передачі датчика; T_{CE} – постійна часу датчика, с.

Коефіцієнт передачі визначається відношенням зміни опору до зміни температури і для платиного термоперетворювача Pt100 у робочому діапазоні становить $K_{CE}=0,39\text{Ом}/^{\circ}\text{C}$. З урахуванням постійної часу $T_{CE}=30\text{с}$ передатна функція датчика:

$$W_{CE}(s) = \frac{0,39}{30s + 1}$$

3.2.2. Вибір виконавчого пристрою

Виходячи з розрахункових витрат вентиляційного повітря $V_w = 1,79 \text{ м}^3/\text{с}$ (визначених у розділі 2), обираємо каналний прямокутний вентилятор *ВЕНТС ВКПФ 4Д 700×400* виробництва українського підприємства ТОВ «Вентиляційні системи» (м. Київ) – рис. 3.3.

Особливістю серії ВКПФ є застосування трифазних асинхронних електродвигунів із зовнішнім ротором, у яких ротор обертається разом із робочим колесом вентилятора. Двигун повністю інтегрований у корпус вентилятора, тому окремий вибір електродвигуна не потрібен – це забезпечує компактність, надійність та низький рівень шуму [19].



Рис. 3.3. Канальний вентилятор ВЕНТС ВКПФ 4Д 700×400

Таблиця 3.3

Технічні характеристики вентилятора ВЕНТС ВКПФ 4Д 700×400

Параметр	Значення
Виробник	ВЕНТС (Україна)
Переріз каналу, мм	700×400
Продуктивність, м³/год (м³/с)	6450 (1,79)
Тип двигуна	асинхронний із зовнішнім ротором
Споживана потужність, кВт	3,63
Номінальний струм, А	8,0
Частота обертання, об/хв	1320
Напруга живлення, В	400 (3 фази)
Ступінь захисту	IP54

Для резервування встановлюється чотири вентилятори: М1 – припливний основний; М2 – припливний резервний; М3 – витяжний основний; М4 – витяжний резервний.

Номінальний струм двигуна вентилятора визначається за формулою:

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3} * U_H * \eta_H * \cos\varphi} \quad (3.2)$$

де $P_H = 3630$ Вт – споживана потужність; $U_H = 400$ В – лінійна напруга; $\eta_H = 0,80$ – ККД; $\cos\varphi = 0,82$ – коефіцієнт потужності.

Підставляючи числові значення:

$$I_H = \frac{3630}{1,732 * 400 * 0,80 * 0,82} = 8,0 \text{ А}$$

Пусковий струм двигуна:

$$I_{\Pi} = k_{\Pi} * I_H = 6,0 * 8,0 = 48 \text{ А} \quad (3.3)$$

Передатна функція вентилятора як інерційної ланки першого порядку з електромеханічною постійною часу $T_{БП}=0,063\text{с}$ та коефіцієнтом передачі $K_{БП}=3,51$ має вигляд [3]:

$$W_{БП}(s) = \frac{3,51}{0,063s + 1}$$

3.3. Реалізація алгоритму керування

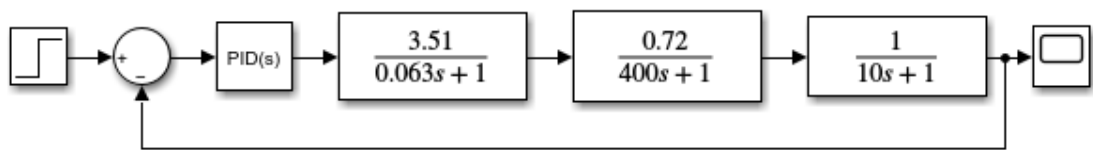


Рис. 3.5. Структурно-алгоритмічна схема САР

Параметри об'єкта керування: $K_{OK} = 0,72$; $T_{OK} = 400\text{ с}$; $\tau_{OK} = 10\text{ с}$.

Транспортне запізнення об'єкта керування апроксимується інерційною ланкою першого порядку з постійною часу $\tau = 10\text{ с}$, що є стандартним наближенням і дозволяє отримати алгебраїчну передатну функцію.

Визначення передатних функцій

а) Розімкнутої системи ($f = 0$):

$$\begin{aligned} W_{\text{роз}}(s) &= \frac{0,39}{30s + 1} * \frac{7,84}{0,047s + 1} * \frac{0,72}{(400s + 1)(10s + 1)} = \\ &= \frac{2,2}{5640 * s^4 + 120766,1 * s^3 + 16320,68 * s^2 + 440,047 * s + 1} \end{aligned}$$

б) Передатна функція замкнутої системи за керуванням ($f = 0$):

$$\begin{aligned} W_{\text{зам}}(s) &= \frac{W_{\text{роз}}(s)}{1 + W_{\text{роз}}(s)} \\ &= \frac{2,2}{5640 * s^4 + 120766,1 * s^3 + 16320,68 * s^2 + 440,047 * s + 3,2} \end{aligned}$$

3.3.1. Визначення періоду дискретизації

Коли ми проектуємо цифрову систему керування, виникає питання, які потрібно накладати обмеження на частоту квантування. Якщо збільшити частоту квантування, точність керування цифровою системою збільшується, при цьому зростає завантаження мікропроцесора. Якщо зменшити частоту квантування, втрачається важлива інформація про сигнал, це може призвести до неможливості відтворення вихідного сигналу за дискретними вибірками.

Найменша частота квантування має бути не меншою за $2\omega_c$, де за ω_c приймається найбільша суттєва частота у спектрі неперервного сигналу [2].

Передатна функція неперервної частини замкненої системи має вигляд:

$$W_{\text{зам.н.ч.}}(s) = \frac{2,2}{5640 * s^4 + 120766,1 * s^3 + 16320,68 * s^2 + 440,047 * s + 3,2}$$

Амплітудно-частотну характеристику неперервної частини замкненої системи при нульовій частоті $A(0)$:

$$A(0) = \frac{2,2}{3,2} = 0,688$$

Права частина рівняння:

$$A(0) * \theta = 0,688 * 0,01 = 0,00688$$

Найбільша суттєва частота:

$$\omega_c = 0,127 \text{ рад/с}$$

Максимально допустимий період квантування, що забезпечує максимальну похибку $\theta = 1\%$:

$$T_{\text{ц}} = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{3,14}{0,127} = 24,8 \text{ с}$$

3.3.2. Налаштування ПІД-регулятора

Передатна функція незмінної частини системи (об'єкт керування разом з виконавчим пристроєм та датчиком, з урахуванням апроксимації

транспортного запізнення інерційною ланкою) має чотири постійні часу: $T_{OK} = 400$ с (об'єкт), $T_{CE} = 30$ с (датчик), $\tau = 10$ с (запізнення) та $T_{ВП} = 0,063$ с (виконавчий пристрій).

Параметри ПІД-регулятора визначено методом підбору з подальшою перевіркою імітаційним моделюванням так, щоб забезпечити аперіодичний перехідний процес з перерегулюванням не більше 20 % (вимога, обґрунтована у п. 3.1). Отримано такі коефіцієнти регулятора [5, 24]:

$$K_p = 1,20; K_i = 0,0040; K_d = 25,0$$

Передатна функція ПІД-регулятора має вигляд:

$$W_{\text{per}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d * s = 1,20 + \frac{0,0040}{s} + 25,0 * s \quad (3.4)$$

Імітаційну модель аналогової системи керування, побудовану у середовищі MATLAB Simulink, наведено на рис.3.6 [24].

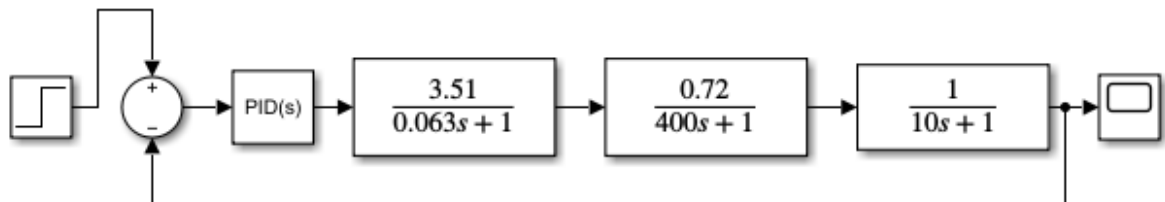


Рис. 3.6. Імітаційна модель аналогової системи керування

Перехідну характеристику системи при відпрацюванні східчастої зміни завдання (з 20°C до 22°C) наведено на рис.3.7.

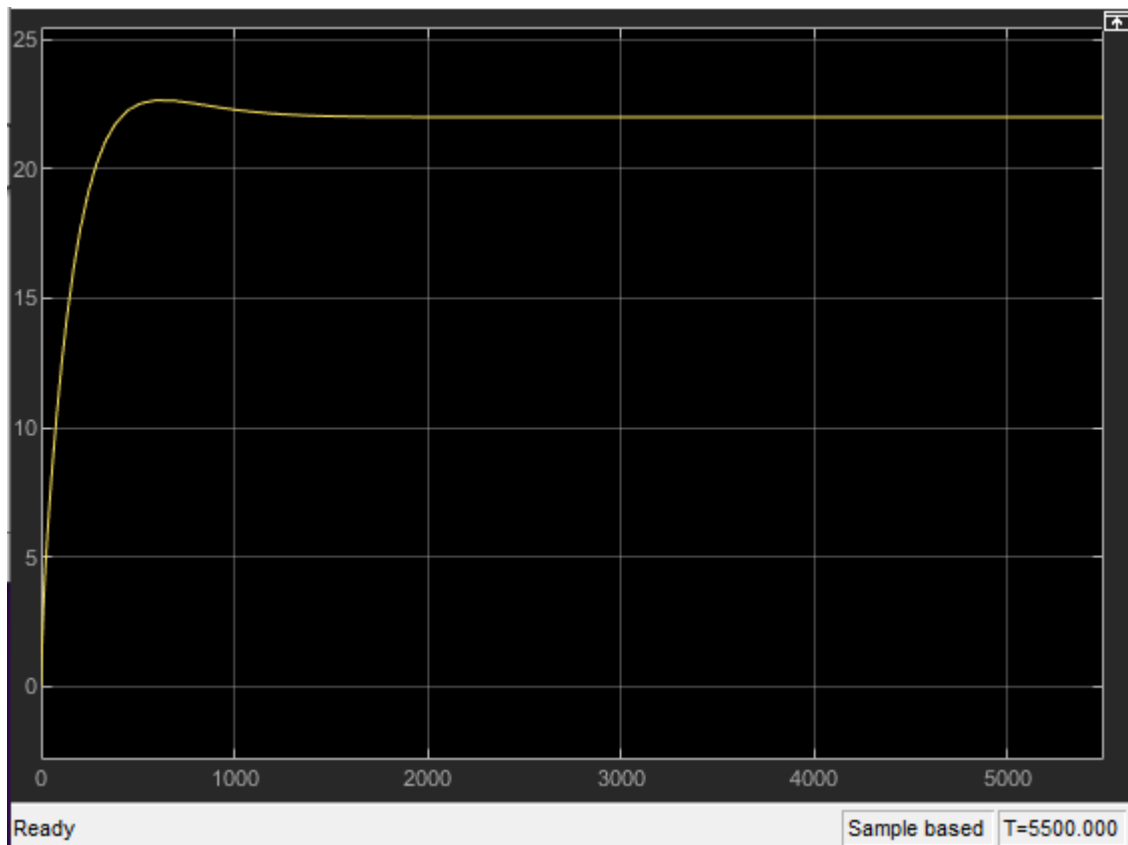


Рис. 3.7. Перехідна характеристика системи з ПІД-регулятором

Показники якості скоректованої системи, отримані за результатами імітаційного моделювання:

- статична похибка $\delta = 0 \%$ (забезпечується інтегральною складовою регулятора);
- час регулювання $t_p \approx 643 \text{ с}$ ($\approx 11 \text{ хв}$);
- перерегулювання $\sigma \approx 6,7 \%$;
- коливальність $n = 1$.

Перерегулювання $\sigma \approx 6,7 \%$ не перевищує допустимого значення 20% , а тривалий час регулювання ($\approx 11 \text{ хв}$) є природним для теплового об'єкта з великою постійною часу $T_{OK} = 400 \text{ с}$. Перехідний процес монотонний, без коливань, що свідчить про якісне налаштування регулятора.

3.3.3. Дослідження системи

Для реалізації регулятора на програмованому логічному контролері аналоговий ПД-закон перетворюється у дискретну форму. Дискретна передатна функція цифрового ПД-регулятора [16, 17]:

$$W_{\text{per}}(z) = K_p + \frac{K_I * T * (z + 1)}{2(z - 1)} + \frac{K_d * (z - 1)}{T * z} \quad (3.5)$$

де T – період дискретизації. Згідно з результатами підрозділу 3.3.1, робочий період дискретизації:

$$T = \frac{T_{\text{ц}}}{10} = \frac{24,8}{10} = 2,48 \text{ с}$$

Імітаційну модель цифрової системи з дискретним регулятором, квантувачем (АЦП) та екстраполятором нульового порядку (ЦАП) наведено на рис. 3.8.

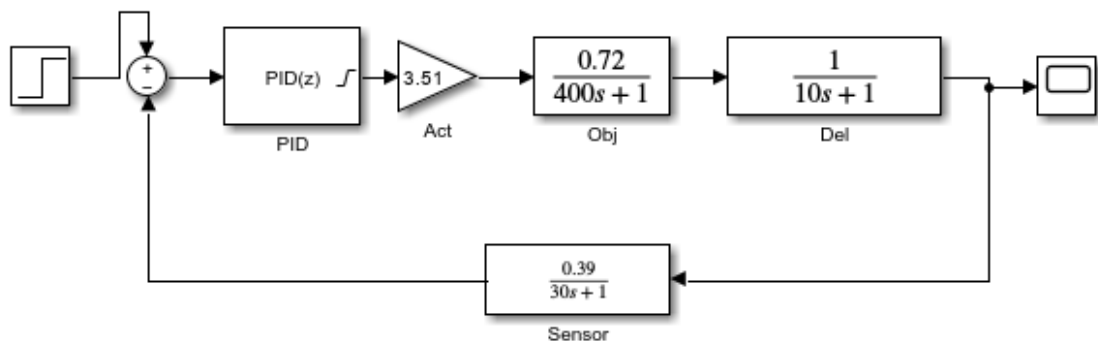


Рис. 3.8. Імітаційна модель цифрової системи керування

Порівняння перехідних характеристик аналогової та цифрової систем наведено на рис.3.9.

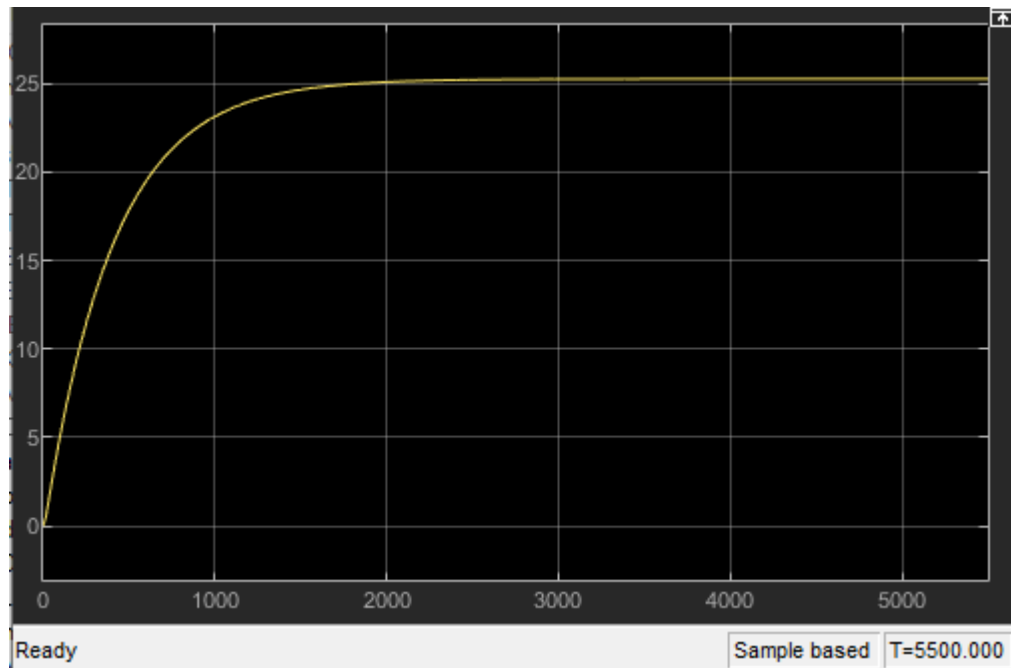


Рис. 3.9. Перехідна характеристика цифрової системи керування

Показники якості цифрової системи:

- статична похибка $\delta = 0 \%$;
- час регулювання $t_p \approx 580$ с;
- перерегулювання $\sigma \approx 5,7 \%$;
- коливальність $n = 1$.

Цифрова реалізація з періодом дискретизації $T = 2,48$ с забезпечує показники якості, близькі до аналогової системи. Незначна відмінність (менше перерегулювання та дещо коротший час регулювання) пояснюється фільтрувальною дією квантування за рівнем та часом. Отримані результати підтверджують доцільність реалізації регулятора на базі ПЛК ОВЕН ПЛК110 з періодом скан-циклу не більше 2,5 с [17, 25].

3.4. Розробка SCADA-системи диспетчерського керування

Для забезпечення можливості візуалізації роботи системи автоматичного керування вентиляцією укриття цивільного захисту,

оперативного контролю параметрів повітряного середовища та керування виконавчими механізмами з робочого місця оператора у даній кваліфікаційній бакалаврській роботі розроблено SCADA-систему на базі програмного комплексу TRACE MODE 6 (виробник – компанія AdAstra Research Group) [21, 22].

Призначення та функції SCADA-системи. SCADA-система (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерське керування та збір даних) являє собою комплекс програмних засобів верхнього рівня автоматизованої системи керування технологічними процесами, який забезпечує взаємодію між оператором та об'єктом керування через програмований логічний контролер. У розробленій системі SCADA TRACE MODE виконує такі основні функції:

- безперервний збір даних від програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК110 щодо поточних значень технологічних параметрів (температура повітря в укритті та припливному повітроводі, концентрація вуглекислого газу, стан вентиляторів, положення заслінок);
- візуалізація технологічного процесу у вигляді мнемосхеми системи вентиляції з анімованим відображенням стану обладнання;
- дистанційне керування виконавчими механізмами (вмикання та вимикання вентиляторів, керування заслінками, перемикання між основним та резервним обладнанням);
- задавання уставок ПІД-регулятора та режимів роботи системи з робочого місця оператора;
- реєстрація трендів зміни технологічних параметрів у часі та збереження їх в архіві бази даних;
- формування сигналізації про аварійні події та відхилення параметрів від допустимих значень;
- ведення журналу подій з фіксацією дій оператора та автоматичних спрацьовувань захистів;
- формування звітів про роботу системи за заданий період.

Обґрунтування вибору програмного комплексу. Серед сучасних SCADA-систем, доступних на українському ринку, для реалізації диспетчерського керування обрано TRACE MODE 6, що зумовлено такими чинниками: повна сумісність із серією контролерів ОВЕН ПЛК110 на рівні штатних драйверів обміну; україномовний інтерфейс та технічна документація; інтегроване середовище розробки, яке дозволяє створювати програму ПЛК і додаток SCADA в межах єдиного проєкту; підтримка протоколу Modbus RTU/TCP для зв'язку з ПЛК; широкий набір готових графічних об'єктів технологічного обладнання (двигуни, заслінки, трубопроводи, датчики) у бібліотеці компонентів; наявність безкоштовної базової версії TRACE MODE Base з обмеженням до 128 точок вводу-виводу, що повністю покриває потреби розробленої системи (фактично використовується 42 точки).

Архітектура SCADA-системи. Розроблена SCADA-система має дворівневу клієнт-серверну архітектуру. Нижній рівень утворює програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК110, який виконує алгоритм ПД-регулювання, опитує датчики та формує керувальні впливи на магнітні пускачі та електроприводи заслінок. Верхній рівень – комп'ютер оператора зі встановленим програмним забезпеченням TRACE MODE 6, на якому реалізовано монітор реального часу (MRT) та операторський інтерфейс. Зв'язок між рівнями здійснюється за протоколом Modbus RTU через інтерфейс RS-485 (для базової конфігурації) або Modbus TCP через мережу Ethernet 100 Мбіт/с (для розширеної конфігурації з можливістю віддаленого доступу).

Структура каналів SCADA-системи. У TRACE MODE 6 інформаційна взаємодія між ПЛК та SCADA реалізується через систему каналів – програмних об'єктів, кожен з яких прив'язаний до конкретного регістра або біта пам'яті ПЛК. У розробленій системі організовано 42 канали, які за призначенням поділяються на чотири групи (табл. 3.4) [23].

Таблиця 3.4

Структура каналів SCADA-системи

Тип каналу	К-сть	Призначення
FLOAT IN (аналогові входи)	8	Температура повітря (2 шт.), концентрація CO ₂ (2 шт.), уставки ПІД-регулятора (Kp, Ki, Kd, tзад)
HEX IN (дискретні входи)	16	Стан вентиляторів M1–M4 (робота, аварія), положення заслінок YA1–YA4, спрацювання захистів
HEX OUT (дискретні виходи)	12	Команди пуску/зупинки M1–M4, керування заслінками, режим роботи (ручний/авто)
FLOAT OUT (аналогові виходи)	6	Передача уставок до ПЛК, поточне значення регульованої величини

Структура мнемосхем оператора. Інтерфейс оператора реалізовано у вигляді трирівневої системи мнемосхем, перемикання між якими здійснюється за допомогою навігаційного меню у верхній частині екрана:

- *головна мнемосхема* містить узагальнене зображення системи припливно-витяжної вентиляції укриття з відображенням приміщення, повітроводів, чотирьох вентиляторів (M1–M4), заслінок (YA1–YA4), датчиків температури та якості повітря. Анімація мнемосхеми забезпечує наочне відображення поточного режиму роботи: працюючий вентилятор позначається обертанням лопатей та зеленим індикатором, у режимі очікування – статичним зображенням і сірим індикатором, при аварії – червоним миготливим індикатором та звуковим сигналом;

- *мнемосхема трендів* забезпечує побудову графіків зміни технологічних параметрів у часі. Реалізовано окремі тренди для температури повітря в укритті, концентрації CO₂, продуктивності вентиляторів. Глибина перегляду – від 5 хвилин до 7 діб, з можливістю масштабування та експорту даних у форматі CSV;

– *мнемосхема журналу* подій відображає хронологічний перелік подій системи: ввімкнення та вимкнення обладнання, спрацювання захистів, дії оператора, аварійні повідомлення. Кожен запис містить позначку часу, тип події, об'єкт, до якого подія відноситься, та коментар.

Загальний вигляд головної мнемосхеми SCADA-системи наведено на рис. 3.10.

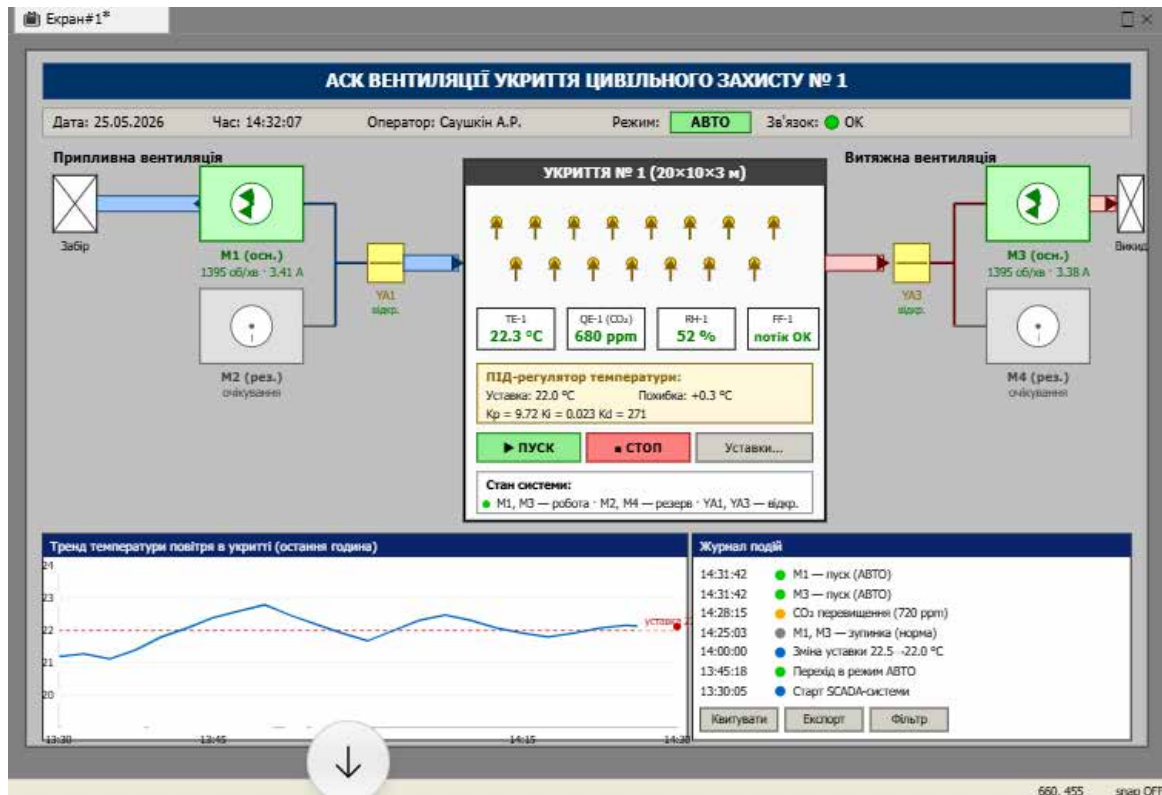


Рис. 3.10. Головна мнемосхема SCADA-системи диспетчерського керування вентиляцією укриття

Система сигналізації. У SCADA-системі реалізовано трирівневу систему сигналізації з кольоровим та звуковим оповіщенням оператора:

– *попередження* (жовтий колір, без звуку) – відхилення параметра від уставки на 5–10%, наприклад, температура в укритті піднялася до +25 °С при уставці +22 °С;

– *аварія* (червоний колір, переривчастий звуковий сигнал) – відмова обладнання, спрацювання теплового захисту двигуна, обрив зв'язку з датчиком, концентрація CO₂ вища за гранично допустиму;

– *критична аварія* (червоне миготіння, безперервний звук) – повна непрацездатність системи вентиляції, потребує негайного втручання оператора.

Кожне аварійне повідомлення квітується оператором натисканням кнопки на екрані, що фіксується у журналі подій із зазначенням часу та облікового запису оператора.

Архівування та звіти. Усі значення технологічних параметрів зберігаються в архіві бази даних TRACE MODE з періодичністю запису 5 с (для швидкоплинних процесів) та 1 хв (для повільних). Глибина архіву – 1 рік. На основі архівних даних автоматично формуються змінні, добові та місячні звіти, які експортуються у формати PDF та XLSX і за необхідності друкуються або передаються електронною поштою.

Розроблена SCADA-система TRACE MODE 6 забезпечує повноцінне диспетчерське керування системою вентиляції укриття цивільного захисту, реалізує всі необхідні функції візуалізації, керування, сигналізації та архівування і повністю інтегрована з нижнім рівнем системи автоматизації на базі ПЛК ОВЕН ПЛК110.

РОЗДІЛ 4 ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

4.1. Вибір пускозахисної апаратури, проводів та кабелів

Електропривод системи побудований на чотирьох каналних вентиляторах ВЕНТС ВКПФ 4Д 700×400 (М1, М2 – припливні; М3, М4 – витяжні), кожен з яких оснащений вбудованим трифазним асинхронним електродвигуном із зовнішнім ротором потужністю 3,63 кВт (параметри визначено у підрозділі 3.2.2) [12, 14].

Як розраховано раніше, номінальний струм двигуна $I_n = 8,0$ А, пусковий струм $I_n = 48$ А.

Вибір автоматичного вимикача. Умови вибору:

$$I_{н.авт} \geq I_{н.дв}; I_{спр} \geq 1,25 * I_n \quad (4.1)$$

Розрахункові значення струмів спрацьовування:

$$I_{спр} \geq 1,25 * 48 = 60 \text{ А}; I_{н.розч} \geq 1,25 * 8,0 = 10 \text{ А}$$

За результатами розрахунків обираємо автоматичний вимикач *Schneider Electric Acti9 iC60N C10* (номінальний струм 10 А, характеристика С, струм миттєвого спрацьовування 50–100 А, 3 полюси, гранична вимикальна здатність 6 кА). Перевірка: $10 \text{ А} \geq 10 \text{ А}$; $50\text{--}100 \text{ А} \geq 60 \text{ А}$ – умови виконуються [26].

Вибір магнітного пускача. Умови вибору (категорія застосування АС-3 – керування асинхронним двигуном):

$$I_{н.КМ} \geq I_{н.дв}; U_{н.КМ} \geq U_{н.дв}; АС - 3 \quad (4.2)$$

Обираємо магнітний пускач *Schneider Electric LC1D12M7* (номінальний струм у режимі АС-3 – 12 А, керована потужність – 5,5 кВт, напруга котушки – 220 В). Умова $I_{н.КМ} = 12 \text{ А} \geq 8,0 \text{ А}$ виконується із запасом [27].

Вибір теплового реле. Уставка спрацьовування у діапазоні номінального струму двигуна:

$$I_{спр} = (1,0 \dots 1,15) * I_{н.дв} = 8,0 \dots 9,2 \text{ А} \quad (4.3)$$

Обираємо теплове реле *Schneider Electric LRD16* (діапазон 9–13 А, сумісне з LC1D12M7), уставку встановлюємо рівною 9,0 А.

Вибір силового кабелю. Умова за нагрівом:

$$I_{\text{доп}} \geq \frac{I_{\text{н.дв}}}{K_{\text{попр}}} = \frac{8,0}{0,95} = 8,42 \text{ А} \quad (4.4)$$

Обираємо кабель ВВГнг-LS 4×2,5 мм² (виробник Одескабель, Україна; допустимий тривалий струм 27 А ≥ 8,42 А). Перевірка за втратою напруги на лінії довжиною 25 м:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} * I_{\text{н}} * L * (r_0 * \cos\varphi + x_0 * \sin\varphi)}{U_{\text{н}}} * 100\% = 0,53\% \quad (4.5)$$

Втрата напруги 0,53 % значно менша за нормативні 5 % (ПУЕ), отже переріз обрано правильно [14].

Для кіл керування використовується кабель КВВГ 4×1,0 мм² (Інтеркабель, Україна), для підключення датчика ДТС125Л за трипровідною схемою – екранований КВВГЕ 3×0,75 мм² (ЗЗЦМ, Україна) [28].

Зведену специфікацію наведено у табл.4.2.

Таблиця 4.2

Специфікація електрообладнання системи керування

Поз.	Найменування та тип	К-сть
QF1-QF4	Автомат Schneider Electric iC60N C10, 3P, 10 А	4
QF5	Автомат Schneider Electric iC60N C2, 1P, 2 А	1
KM1-KM4	Пускач Schneider Electric LC1D12M7, 12 А	4
KK1-KK4	Реле теплове Schneider Electric LRD16, 9-13 А	4
—	Кабель ВВГнг-LS 4×2,5 мм ² (Одескабель)	120 м
—	Кабель КВВГ 4×1,0 мм ² (Інтеркабель)	80 м
—	Кабель КВВГЕ 3×0,75 мм ² (ЗЗЦМ)	40 м

4.2. Розробка електричної принципової схеми

Електрична принципова схема системи автоматичного керування вентиляцією укриття цивільного захисту відображає всі електричні зв'язки між елементами системи, послідовність роботи апаратури та принцип реалізації функцій захисту, керування і сигналізації. Схема розроблена відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009 «Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів» та умовних графічних позначень за ДСТУ Б А.2.4-4:2009.

Електрична принципова схема системи складається з двох частин: силової та схеми керування.

Силова частина схеми забезпечує живлення електродвигунів вентиляторів від трифазної мережі змінного струму 380/220 В, 50 Гц. Живлення подається через головний автоматичний вимикач QF0 (40 А, 3-полюсний), який встановлений на вводі щита керування і виконує функцію загального захисту та комутації. Від головного автомата відходять чотири паралельні фідери, кожен з яких призначений для живлення одного електродвигуна вентилятора:

- фідер 1: QF1 → KM1 → KK1 → M1 (припливний основний вентилятор);
- фідер 2: QF2 → KM2 → KK2 → M2 (припливний резервний вентилятор);
- фідер 3: QF3 → KM3 → KK3 → M3 (витяжний основний вентилятор);
- фідер 4: QF4 → KM4 → KK4 → M4 (витяжний резервний вентилятор).

Автоматичні вимикачі QF1–QF4 забезпечують захист кожного двигуна від струмів короткого замикання та можливість локального вимкнення фідера для проведення регламентних робіт. Магнітні пускачі KM1–KM4 здійснюють комутацію силових кіл за командами системи керування. Теплові реле KK1–KK4 контролюють струм у кожній фазі двигуна та забезпечують захист від

тривалих перевантажень шляхом розмикання своїх допоміжних контактів у колі котушки відповідного магнітного пускача.

Схема керування реалізована на напрузі ~ 220 В, 50 Гц (живлення котушок магнітних пускачів) та $U=24$ В постійного струму (живлення дискретних входів/виходів ПЛК і сигнальної арматури). Джерелом стабілізованої напруги 24 В є імпульсний блок живлення типу Schneider Electric ABL8RPS24050 (вихідна потужність 120 Вт, струм 5 А).

Центральним керувальним пристроєм системи є програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК110-30.04.К-М (вибір якого обґрунтований у підрозділі 3.2). Дискретні виходи ПЛК (DO1–DO4, тип «сухий контакт») підключені до проміжних електромеханічних реле KV1–KV4 типу Finder 40.52, контакти яких комутують котушки магнітних пускачів KM1–KM4. Таке рішення забезпечує гальванічну розв'язку між колами 24 В постійного струму (ПЛК) та 220 В змінного струму (котушки пускачів), а також підвищує комутаційний ресурс системи.

Кожне коло керування магнітним пускачем виконане за класичною схемою з самопідхопленням і містить такі елементи: нормально замкнений контакт кнопки «Стоп», паралельне з'єднання нормально розімкненого контакту кнопки «Пуск» та допоміжного контакту магнітного пускача (контакт самопідхоплення), нормально замкнений контакт теплового реле, котушка магнітного пускача. У такій схемі натискання кнопки «Пуск» подає напругу на котушку пускача, який своїм допоміжним контактом блокує (шунтує) кнопку «Пуск» і утримує себе у ввімкненому стані до моменту натискання кнопки «Стоп» або спрацьовування теплового реле.

Режими роботи системи. На лицьовій панелі щита керування встановлений перемикач режимів роботи SA1 з трьома положеннями: «Ручний», «0» (Вимкнено), «Автоматичний». У ручному режимі керування електродвигунами здійснюється безпосередньо за допомогою кнопок «Пуск» та «Стоп», встановлених на лицьовій панелі щита (SB1–SB8). В автоматичному режимі керування здійснюється виключно від ПЛК згідно з

реалізованим у ньому алгоритмом ПДД-регулювання температури повітря у приміщенні укриття. Резервування забезпечується автоматичним перемиканням системи на резервний вентилятор у разі спрацювання теплового захисту основного двигуна (програмно реалізовано в ПЛК).

Сигналізація. На лицьовій панелі щита встановлені сигнальні лампи (HL1–HL12): червоні – «Аварія» для кожного двигуна; зелені – «Робота» для кожного двигуна; жовті – «Готовність» системи та «Живлення». Сигнал «Аварія» формується при спрацюванні теплового реле або відсутності повітряного потоку у вентиляційному каналі (за сигналом від датчика витрати FF). Для звукової сигналізації аварійних режимів встановлений звуковий сигналізатор HA1 з кнопкою квітування SB9.

4.3. Розробка схеми з'єднань

Схема з'єднань щита керування виконана згідно з ДСТУ Б А.2.4-3:2009 і відображає електричні зв'язки між апаратами, встановленими у межах одного конструктивного виробу – щита керування Ш1. Схема призначена для виконання монтажних робіт та подальшого обслуговування системи.

Апаратура встановлюється на DIN-рейках 35 мм всередині металевого шафи-щита Schneider Electric Spacial S3D розміром 600×800×250 мм, ступінь захисту IP55. Шафа має одинарні двері з вікном для огляду сигнальної арматури та замок із циліндровим механізмом.

Внутрішнє компонування апаратури щита виконано з урахуванням принципу функціонального групування та забезпечення раціональної довжини монтажних проводів:

- *верхня DIN-рейка (A1):* головний автоматичний вимикач QF0, групові автоматичні вимикачі QF1–QF5, клеми вводу живлення;
- *середня DIN-рейка (A2):* магнітні пускачі KM1–KM4 з тепловими реле KK1–KK4, проміжні реле KV1–KV4, блок живлення G1;

– *нижня DIN-рейка (A3)*: програмований логічний контролер A4 (ПЛК), модулі введення-виведення;

– *нижня клемна рейка (XT1)*: клеми підключення зовнішніх кіл (силові кабелі двигунів, кабелі датчиків, кабелі кнопових постів).

Всі внутрішні з'єднання щита виконуються одножильним мідним монтажним проводом ПВ-1 у поліхлорвініловій ізоляції різного кольору відповідно до функціонального призначення кіл: чорний – силові кола фази L1, коричневий – фази L2, сірий – фази L3, синій – нейтральний провідник N, жовто-зелений – захисне заземлення PE, червоний – «+24 В» постійного струму, синій – «0 В» постійного струму, білий – проміжні кола керування ~220 В.

Переріз монтажних проводів обирається за струмом відповідного кола: для силових кіл фаз – 2,5 мм²; для кіл керування ~220 В – 1,0 мм²; для кіл сигналізації =24 В – 0,75 мм². Всі провідники з обох кінців маркуються нумерованими кабельними бирками, що відповідають позначенням клем у схемі. Прокладання проводів виконується у пластикових кабельних каналах перфорованого типу шириною 40 мм.

4.4. Розробка схеми підключень

Схема підключень визначає підключення зовнішніх кіл до клемної рейки XT1 щита керування та показує способи прокладання і марки кабельних ліній між щитом керування та обладнанням, встановленим за межами щита (електродвигунами вентиляторів, датчиками, заслінками, кноповими постами місцевого керування).

На клемній рейці XT1 виділено такі функціональні групи клем:

– *група клем 1...12* – підключення силових кабелів електродвигунів вентиляторів M1–M4 (фази L1, L2, L3 та провідник захисного заземлення PE для кожного двигуна);

– *група клем 13...20* – підключення силових кабелів електроприводів заслінок YA1–YA4 (фаза та нейтраль для двопозиційних електроприводів типу Belimo SM230A);

– група клем 21...28 – підключення кабелів від датчиків температури ДТС125 (за чотирипровідною схемою для виключення впливу опору сполучних проводів) – два датчики: один у приміщенні укриття, один – у припливному повітроводі;

– група клем 29...34 – підключення датчиків якості повітря QE (по CO₂, виходи 4–20 мА) та датчиків витрати повітря FF (дискретні виходи);

– група клем 35...44 – підключення кабелів від кнопкових постів місцевого керування біля кожного вентилятора (по два дискретні сигнали – «Пуск» і «Стоп»);

– група клем 45...48 – підключення живлення 380/220 В, 50 Гц від мережі будівлі (L1, L2, L3, N, PE).

Прокладання зовнішніх кабельних ліній виконується у захищених трасах – металевих лотках, гофрованих гнучких трубах, металорукавах – відповідно до вимог ПУЕ та ДБН В.2.5-23:2010 «Проектування електрообладнання житлових і громадських будинків». Розділення кабельних трас на силові та контрольні є обов'язковим: відстань між паралельно прокладеними силовими (220/380 В) та контрольними (24 В, аналогові сигнали) кабелями повинна становити не менше 100 мм або вони мають бути розділені металевою перегородкою [3, 20].

Захисне заземлення системи виконується мідним провідником перерізом 6 мм² (жовто-зелений), який з'єднує шину РЕ щита керування з основною шиною заземлення будівлі. Корпуси усіх електродвигунів, шафи щита та металеві оболонки кабелів підключаються до шини РЕ щита окремими провідниками.

4.5. Розробка загального вигляду щита керування

Креслення загального вигляду щита керування ШІ виконане відповідно до ДСТУ Б А.2.4-3:2009 і містить вигляд щита з відкритими дверима (для відображення внутрішнього компонування апаратури) та вигляд лицьової панелі (для відображення органів керування та засобів сигналізації).

Конструктивне виконання. Щит керування виконаний на базі металевої шафи Schneider Electric Spacial S3D з такими характеристиками: габаритні розміри (Ш×В×Г) – 600×800×250 мм; матеріал – листова сталь товщиною 1,5 мм з порошковим полімерним покриттям; колір – світло-сірий RAL 7035; ступінь захисту – IP55 (захист від пилу та водяних струменів); кріплення – настінне (підвісне), з можливістю встановлення на висоті 1,5 м від рівня підлоги; кліматичне виконання – УХЛ4 (приміщення, що опалюється).

Внутрішнє компонування (вигляд з відкритими дверима) показано на кресленні з позначенням позицій усіх встановлених апаратів. Апаратура розміщена на трьох горизонтальних DIN-рейках з кроком 200 мм. Верхня частина шафи відведена для апаратів захисту та комутації (автоматичні вимикачі), середня – для виконавчої апаратури кіл керування (магнітні пускачі, реле, блок живлення), нижня – для ПЛК. Клемна рейка XT1 розміщена у нижній частині шафи, що забезпечує зручність підключення зовнішніх кабелів, які вводяться у шафу через сальникові ущільнення PG21 з нижньої сторони.

Лицьова панель щита (виконана на дверях шафи) містить:

- *сигнальні лампи* (тип XB7EV04MP, діаметр 22 мм, світлодіодні, напруга 24 В): HL1, HL3, HL5, HL7 – зелені «Робота» для двигунів М1–М4; HL2, HL4, HL6, HL8 – червоні «Аварія» для двигунів М1–М4; HL9 – жовта «Живлення»; HL10 – зелена «Готовність системи»; HL11 – жовта «Ручний режим»; HL12 – зелена «Автоматичний режим»;

- *перемикач режимів роботи* SA1 (тип XB7ND33, 3-позиційний, з фіксацією): «Ручний» – «0» – «Автоматичний»;

- *кнопки керування* (тип XB7EA, діаметр 22 мм): SB1, SB3, SB5, SB7 – зелені «Пуск» для двигунів М1–М4; SB2, SB4, SB6, SB8 – червоні «Стоп» для двигунів М1–М4; SB9 – чорна «Квитування звукової сигналізації»; SB10 – грибоподібна аварійна кнопка «Аварійний стоп» з фіксацією та поверненням повертом за годинниковою стрілкою;

- *звуковий сигналізатор* HA1 (тип XVS72BMW, рівень звуку 75 дБ);

– сенсорна панель оператора ОВЕН СП310 (діагональ 4,3", кольоровий TFT-дисплей, інтерфейс RS-485 Modbus RTU для зв'язку з ПЛК) – призначена для відображення поточних значень параметрів (температури, стану обладнання) та задавання уставок ПІД-регулятора.

Розташування органів керування та сигналізації на лицьовій панелі виконане з урахуванням ергономічних вимог: сенсорна панель розміщена у верхній частині на висоті очей оператора, перемикач режимів та аварійна кнопка – у центральній частині для швидкого доступу, кнопки керування двигунами та сигнальні лампи згруповані за фідерами (горизонтальні рядки відповідають кожному з чотирьох вентиляторів).

Внутрішня компоновка та лицьова панель щита керування ШІ1 наведені на рис. 4.1 та рис. 4.2 відповідно.

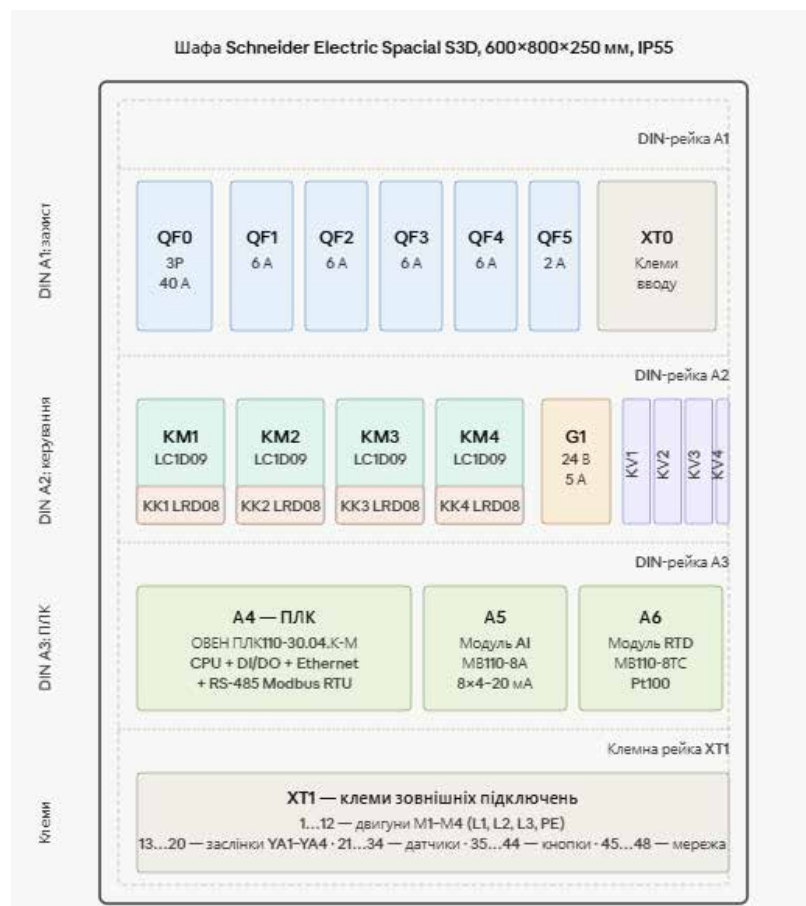


Рис. 4.1. Внутрішнє компонування щита керування (вид з відкритими дверима)

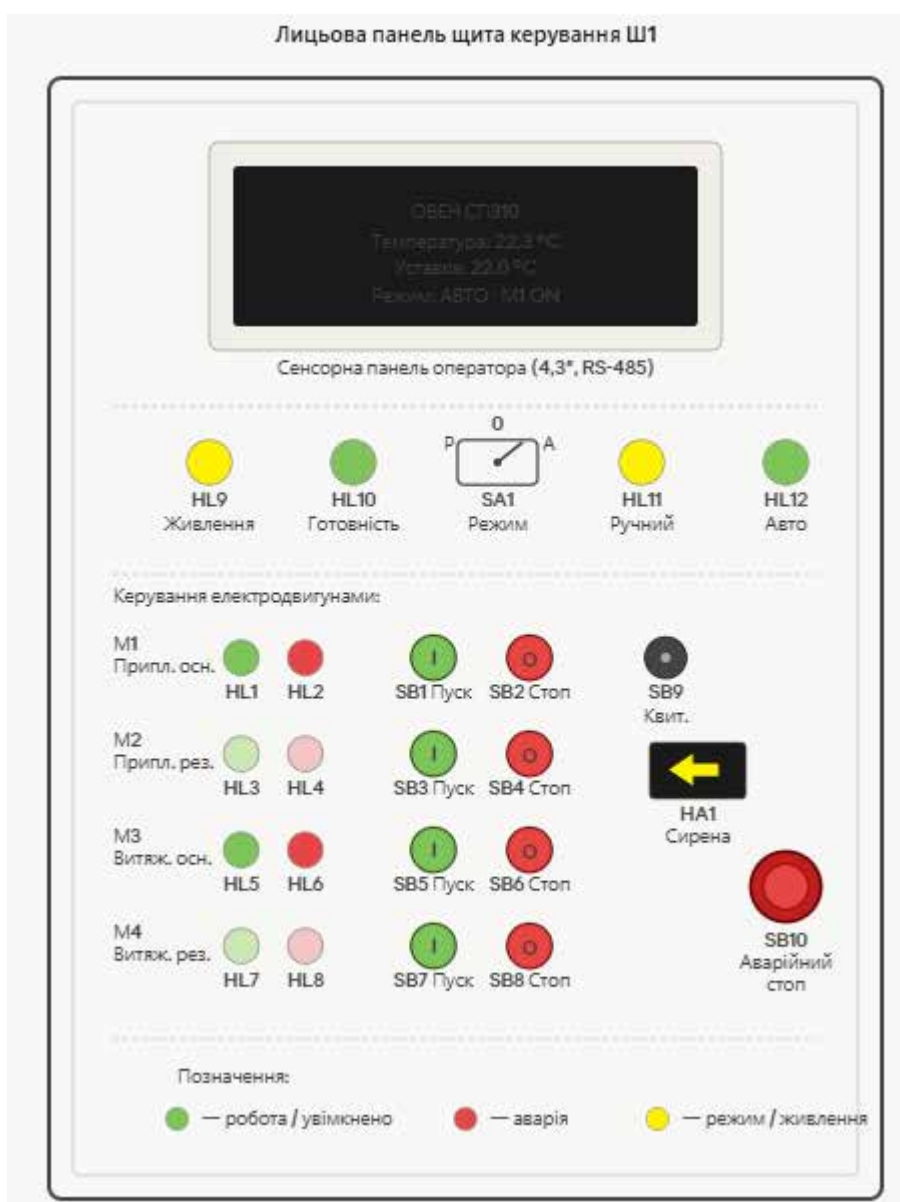


Рис. 4.2. Загальний вигляд лицьової панелі щита керування

РОЗДІЛ 5

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

5.1. Мета впровадження

Метою впровадження автоматичної системи керування вентиляцією в об'єкті укриття цивільного захисту є забезпечення стабільного мікроклімату при мінімальних експлуатаційних витратах. Сучасне рішення на основі мікроконтролерного цифрового ПД-регулятора покликане замінити застарілу систему ручного керування, яка вимагає постійної присутності оператора та має низьку точність підтримання заданих параметрів повітря [1, 9].

Впровадження запропонованої системи дозволяє вирішити такі основні завдання:

- підтримання заданого значення температури повітря у приміщенні укриття з відхиленням не більше ± 2 °С;
- автоматичне керування вентиляційною установкою без участі оператора;
- зменшення витрат електроенергії за рахунок оптимізації режимів роботи вентилятора;
- зменшення фонду оплати праці шляхом скорочення робочих місць операторів;
- підвищення надійності та безпеки експлуатації укриття.

Економічна доцільність впровадження визначається порівнянням сумарних витрат при ручному (попередньому) керуванні та при автоматичному керуванні із застосуванням розробленої САР.

5.2. Аналіз існуючого рішення

Існуючий варіант керування вентиляцією в укриттях цивільного захисту базується на ручному управлінні вентилятором. Контроль температури повітря здійснюється оператором за показаннями стрілкового термометра,

після чого оператор вручну вмикає або вимикає вентиляційну установку через пускач [9].

До недоліків такого рішення можна віднести:

- необхідність цілодобової присутності кваліфікованого оператора;
- значна затримка реакції на зміну температури через інерційність ручного керування;
- неоптимальне використання вентиляційного обладнання – вентилятор працює тривалий час навіть тоді, коли потреба у вентиляції є мінімальною;
- підвищене споживання електроенергії;
- людський фактор – можливі помилки оператора, які впливають на якість мікроклімату.

Запропоноване удосконалене рішення на основі цифрової САР з ПІД-регулятором усуває зазначені недоліки за рахунок повної автоматизації процесу керування та оптимізації режимів роботи виконавчого обладнання.

5.3. Розрахунок витрат при використанні попередньої версії програми

До річних експлуатаційних витрат при ручному керуванні належать: заробітна плата оператора, витрати на електроенергію, амортизаційні відрахування та витрати на обслуговування обладнання.

Річний фонд оплати праці оператора з урахуванням єдиного соціального внеску:

$$З_{оп} = O_{міс} * 12 * (1 + K_{есв}) = 8000 * 12 * 1,22 = 117\,120 \text{ грн} \quad (5.1)$$

де $O_{міс} = 8000$ грн – місячна заробітна плата; $K_{есв} = 0,22$ – коефіцієнт єдиного соціального внеску.

Річні витрати на електроенергію при ручному керуванні (вентилятор працює на повну потужність близько 16 год/добу через неоптимальне ручне регулювання):

$$В_{ел.стар} = P_v * t_{стар} * Ц = 3,63 * 5840 * 4,32 = 91\,580,54 \text{ грн} \quad (5.2)$$

де $P_v = 3,63$ кВт – споживана потужність вентилятора; $t_{стар} = 5840$ год/рік – річний час роботи; $\Pi = 4,32$ грн/(кВт*год) – тариф для небутових споживачів.

Амортизаційні відрахування на вентиляційне обладнання:

$$A_{стар} = K_{обл} * H_a = 65\,000 * 0,15 = 9750 \text{ грн} \quad (5.3)$$

де $K_{обл} = 65\,000$ грн – вартість вентиляційного обладнання; $H_a = 0,15$ – норма амортизації.

Витрати на обслуговування приймаємо $B_{обсл} = 3000$ грн/рік. Сумарні річні витрати при ручному керуванні наведено у табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Річні експлуатаційні витрати при ручному керуванні

№	Стаття витрат	Сума, грн
1	Заробітна плата оператора (з ЄСВ)	117 120,00
2	Витрати на електроенергію	91 580,54
3	Амортизаційні відрахування	9 750,00
4	Обслуговування обладнання	3 000,00
	Всього	221 450,54

Отже, сумарні річні витрати при ручному керуванні становлять $B_{стар} = 221\,450,54$ грн.

5.4. Капітальні витрати на впровадження системи

Капітальні витрати на впровадження автоматичної системи керування включають вартість контрольно-вимірювальних приладів, керувального та комутаційного обладнання, кабельної продукції, розробки програмного забезпечення, монтажу та навчання персоналу (табл.5.2).

Таблиця 5.2

Капітальні витрати на впровадження САК

№	Найменування	Сума, грн
1	Датчик температури ДТС125Л-РТ100.В3.60, 2 шт	3 900,00
2	Датчик якості повітря (CO ₂), 2 шт	8 400,00
3	ПЛК ОВЕН ПЛК110-24.30.К-М	18 500,00
4	Панель оператора ОВЕН СП310	6 800,00
5	Пускачі LC1D12M7 + реле LRD16, 4 компл.	8 400,00
6	Автоматичні вимикачі Acti9 iC60N, компл.	3 200,00
7	Блок живлення 24 В + проміжні реле	2 400,00
8	Шафа керування Spacial S3D + монтаж	7 500,00
9	Кабельна продукція та матеріали	5 800,00
10	Розробка ПЗ ПЛК та SCADA	15 000,00
11	Монтажні та пусконаладжувальні роботи	9 500,00
12	Навчання персоналу	2 500,00
	Всього капітальних витрат	91 900,00

Загальна сума капітальних витрат складає $K_{\text{кан}} = 91\,900$ грн.

5.5. Витрати при автоматичному керуванні

При автоматичному керуванні потреба у постійній присутності оператора відсутня – достатньо періодичного контролю, що оцінюється у 10% від ставки оператора:

$$Z_{\text{нагл}} = Z_{\text{оп}} * 0,1 = 117\,120 * 0,1 = 11\,712 \text{ грн} \quad (5.4)$$

Витрати на електроенергію при автоматичному керуванні (завдяки оптимальному регулюванню вентилятор працює близько 10 год/добу):

$$B_{\text{ел.нов}} = P_{\text{в}} * t_{\text{нов}} * \text{Ц} = 3,63 * 3650 * 4,32 = 57\,237,84 \text{ грн} \quad (5.5)$$

де $t_{\text{нов}} = 3650$ год/рік – річний час роботи при автоматичному керуванні.

Амортизаційні відрахування на впроваджену систему:

$$A_{\text{нов}} = K_{\text{кап}} * N_{\text{а}} = 91\,900 * 0,15 = 13\,785 \text{ грн} \quad (5.6)$$

Витрати на обслуговування автоматизованої системи $B_{\text{обсл}} = 4500$ грн/рік. Сумарні річні витрати наведено у табл. 5.3.

Таблиця 5.3

Річні експлуатаційні витрати при автоматичному керуванні

№	Стаття витрат	Сума, грн
1	Періодичний нагляд персоналу	11 712,00
2	Витрати на електроенергію	57 237,84
3	Амортизаційні відрахування на САК	13 785,00
4	Обслуговування системи	4 500,00
	Всього	87 234,84

Сумарні річні витрати при автоматичному керуванні становлять $B_{\text{нов}} = 87\,234,84$ грн.

5.6. Економічний ефект від впровадження

Річний економічний ефект – різниця річних витрат при існуючому та автоматичному керуванні:

$$E = B_{\text{стар}} - B_{\text{нов}} = 221\,450,54 - 87\,234,84 = 134\,215,70 \text{ грн} \quad (5.7)$$

Термін окупності капітальних вкладень:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{кап}}}{E} = \frac{91\,900}{134\,215,70} = 0,68 \text{ року} \quad (5.8)$$

Розрахунковий коефіцієнт економічної ефективності:

$$E_p = \frac{1}{T_{\text{ок}}} = \frac{1}{0,68} = 1,46 \quad (5.9)$$

Отриманий коефіцієнт ефективності $E_p = 1,46$ значно перевищує нормативний $E_n = 0,15$, що підтверджує економічну доцільність впровадження. Чистий економічний ефект за 5 років експлуатації:

$$E_5 = E * 5 - K_{\text{кап}} = 134\,215,70 * 5 - 91\,900 = 579\,178,52 \text{ грн} \quad (5.10)$$

Підсумкові техніко-економічні показники наведено у табл. 5.4.

Таблиця 5.4

Зведені техніко-економічні показники

№	Показник	Значення
1	Капітальні витрати, грн	91 900,00
2	Річні витрати при ручному керуванні, грн	221 450,54
3	Річні витрати при автоматичному керуванні, грн	87 234,84
4	Річний економічний ефект, грн	134 215,70
5	Термін окупності, років	0,68
6	Коефіцієнт ефективності	1,46
7	Чистий ефект за 5 років, грн	579 178,52

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній бакалаврській роботі розроблено систему автоматичного керування вентиляцією в об'єкті укриття цивільного захисту. У ході виконання роботи вирішено такі основні завдання:

1. Проведено аналіз технологічного процесу вентилявання приміщення укриття цивільного захисту як об'єкта автоматизації. Встановлено, що ключовим параметром, який потребує підтримання у заданих межах, є температура внутрішнього повітря; основними збуреннями виступають зміна температури зовнішнього повітря та зміна кількості людей у приміщенні.

2. Побудовано математичну модель об'єкта керування у вигляді інерційної ланки першого порядку з транспортним запізненням з параметрами: коефіцієнт передачі $K = 0,72$; постійна часу $T = 400$ с; час запізнення $\tau = 10$ с. Для подальшого аналізу транспортне запізнення апроксимовано додатковою інерційною ланкою першого порядку.

3. На основі розрахунку динамічного коефіцієнта регулювання $R_d = 0,56$ та порівняння з табличними значеннями для типових законів регулювання обґрунтовано вибір ПД-регулятора, який забезпечує нульову статичну похибку, прискорену реакцію на збурення та необхідну точність регулювання температури в межах ± 2 °C від заданого значення.

4. Здійснено вибір технічних засобів автоматизації: датчик температури – термоперетворювач опору ОВЕН ДТС125Л-РТ100.В3.60 (характеристика Pt100, трипровідна схема, постійна часу $T_{CE} = 30$ с); виконавчий пристрій – канальний вентилятор ВЕНТС ВКПФ 4Д 700×400 (Україна) продуктивністю 6450 м³/год з вбудованим асинхронним електродвигуном потужністю 3,63 кВт.

5. Розраховано параметри ПД-регулятора з перевіркою імітаційним моделюванням: $K_p = 1,20$; $K_i = 0,0040$; $K_d = 25,0$. Визначено передатні функції розімкнутої та замкнутої системи.

6. Визначено максимально допустимий період квантування цифрового регулятора $T_{\text{ц}} = 24,8$ с, що забезпечує максимальну похибку відтворення сигналу 1%. Робочий період дискретизації прийнято $T = 2,48$ с.

7. У середовищі MATLAB Simulink побудовано імітаційні моделі аналогової та цифрової систем керування. Отримано показники якості: статична похибка $\delta = 0$ %; час регулювання $t_p \approx 643$ с; перерегулювання $\sigma \approx 6,7$ %; коливальність $n = 1$. Показники задовольняють технологічні вимоги, оскільки перерегулювання не перевищує допустимого значення 20 %.

8. Виконано техніко-економічне обґрунтування. Капітальні витрати становлять 91 900 грн, річний економічний ефект – 134 215,70 грн, термін окупності – 0,68 року (близько 8 місяців), коефіцієнт ефективності $E_p = 1,46$. Чистий економічний ефект за 5 років – 579 178,52 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Лисенко В. П., Дудник А. О., Мірошник В. О., Руденський А. А., Заєць Н. А. Основні методи та методики підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра : навчальний посібник. Київ : Компринт, 2023. 303 с.
2. Головінський Б. Л., Шуруб Ю. В., Лисенко В. П. Теорія автоматичного управління : навчальний посібник. Київ : Видавничий центр НУБіП України, 2012. 240 с.
3. Лавріненко Ю. М., Марченко О. С., Савченко П. І., Синявський О. Ю., Войтюк Д. Г., Лисенко В. П. Електропривод : підручник / за ред. Ю. М. Лавріненка. Київ : Видавництво «Ліра-К», 2009. 504 с.
4. Лисенко В. П., Заєць Н. А., Штепа В. М., Дудник А. О., Болбот І. М. Інтелектуальні системи керування біотехнічними об'єктами : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2018. 357 с.
5. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. Київ : Либідь, 2007. 656 с.
6. Ладанюк А. П., Архангельська К. С., Власенко Л. О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами : навчальний посібник. Київ : НУХТ, 2014. 274 с.
7. Ладанюк А. П., Трегуб В. Г., Ельперін І. В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2001. 224 с.
8. Кафедра автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І. І. Мартиненка : офіційний сайт. URL: <https://nubip.edu.ua/node/1376> (дата звернення: 15.05.2026).
9. Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Київ : НУБіП України, 2023. URL: <https://nubip.edu.ua/node/128489> (дата звернення: 10.05.2026).

10. ДБН В.2.2-5:2023. Захисні споруди цивільного захисту : державні будівельні норми України. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2023. 62 с.
11. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування : державні будівельні норми України. Київ : Мінрегіон України, 2013. 149 с.
12. ДБН В.2.5-23:2010. Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 168 с.
13. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. Відомості Верховної Ради України. 2013. № 34–35. Ст. 458. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17> (дата звернення: 12.05.2026).
14. Правила улаштування електроустановок. 5-те вид., перероб. і доп. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.
15. ДСТУ 9077:2021. Засоби очищення повітря захисних споруд цивільного захисту. Загальні технічні вимоги. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2021. 14 с.
16. ДСТУ EN 61131-3:2017. Контролери програмовані. Частина 3. Мови програмування (EN 61131-3:2013, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 192 с.
17. Контролер програмований логічний ОВЕН ПЛК110 [M02] : керівництво з експлуатації. ОВЕН, 2024. 84 с.
18. Термоперетворювач опору ДТС125 : керівництво з експлуатації. ОВЕН, 2023. 28 с. URL: <https://owen.ua> (дата звернення: 18.05.2026).
19. Канальні вентилятори для прямокутних каналів серії ВКП : технічний каталог. ВЕНТС Україна, 2024. URL: <https://vents.ua/series/vkp-ec/> (дата звернення: 20.05.2026).
20. Електродвигуни асинхронні загального призначення серії АИР : технічний каталог. URL: <https://elprom.com.ua> (дата звернення: 20.05.2026).
21. TRACE MODE 6 : документація користувача. AdAstra Research Group, 2023.

22. Підключення ОВЕН ПЛК110 до SCADA TRACE MODE через драйвер : навчальний відеоматеріал. AdAstra Research Group.
23. Modbus Application Protocol Specification V1.1b3 : technical document. Modbus Organization, 2012. 50 p. URL: https://modbus.org/docs/Modbus_Application_Protocol_V1_1b3.pdf (дата звернення: 22.05.2026).
24. MATLAB & Simulink User's Guide : technical documentation. The MathWorks, Inc., 2023. URL: <https://www.mathworks.com/help/> (дата звернення: 21.05.2026).
25. CODESYS V2.3. Programming System User Manual : technical documentation. 3S-Smart Software Solutions GmbH, 2020. URL: <https://www.codesys.com> (дата звернення: 22.05.2026).
26. Modular Devices Catalogue – Acti9 : technical catalogue. Schneider Electric, 2023. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 19.05.2026).
27. Каталог апаратів керування електродвигунами серії TeSys : технічний каталог. Schneider Electric, 2023. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 19.05.2026).
28. Загальнопромислові шафи Spacial S3D : технічний каталог. Schneider Electric, 2024. URL: <https://www.se.com> (дата звернення: 19.05.2026).