

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти – бакалавр
за освітньо-професійною програмою
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

зі спеціальності
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

тема роботи:
*«Автоматизована система припливно-витяжної вентиляції з
рекуперацією тепла»*

Виконав студент гр. АКІТ-22	_____	Макаренко М.В.
Керівник	_____	Савицький О. І.
Нормоконтроль	_____	Маринич І. А.
Завідувач кафедри	_____	Рубан С. А.

КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Бакалавр

Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

Затверджую

Зав. кафедрою: к.т.н. Рубан С.А.

«__» січня 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студентові групи АКІТ-22 Макаренку Максиму Вікторовичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Автоматизована системи припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла.

затверджено наказом по університету № 171с від 30.03.2026 р.

2. Термін здачі кваліфікаційної роботи: 10.06.2026 р.

3. Склад кваліфікаційної роботи: Пояснювальна записка обсягом 79с., презентація у Microsoft PowerPoint (13 слайдів) в електронному та друкованому вигляді

4. Консультанти кваліфікаційної роботи:

Розділ 1-2

доц. Савицький О. І.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>18.03.26</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>05.04.26</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>01.05.26</i>
4	<i>Висновки</i>	<i>25.05.26</i>
5	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>28.05.26</i>
6	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>20.05.26</i>
7	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>02.06.25</i>

6. Дата видачі завдання: 28.01.2026р.

Керівник _____ / Савицький О. І./

7. Запевнення: Я, Макаренко Максим Вікторович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Студент _____ / Макаренко М.В./

АНОТАЦІЯ

Макаренко М.В. Автоматизація припливно-витяжної системи вентиляції з рекуперацією тепла: кваліфікаційна робота бакалавра : 151 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології. Кривий Ріг. Криворізький національний університет, 2026. [78] с.

Об'єктом дослідження є процес термодинамічної обробки повітря в промисловій припливно-витяжній вентиляційній установці.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмно-апаратні засоби автоматизованого керування системою вентиляції та рекуперації тепла.

Метою роботи є підвищення енергоефективності процесу обробки повітря та забезпечення нормативних показників мікроклімату виробничого приміщення шляхом розробки сучасної мікропроцесорної системи керування установкою на базі обладнання Siemens.

У першому розділі проведено аналіз технологічного процесу підготовки повітря та огляд існуючих рішень автоматизації. Розглянуто конструктивні особливості припливно-витяжної установки Blauberg BL07 та обґрунтовано технічну доцільність переходу на сучасну промислову мікропроцесорну базу.

У другому розділі виконано комплексну розробку системи автоматичного керування (САК) та її програмно-технічну реалізацію. Проведено математичний опис та моделювання об'єкта керування з урахуванням теплової інерції, синтезовано оптимальні параметри ПІ-регулятора в середовищі MATLAB. Обґрунтовано вибір апаратних засобів (ПЛК SIMATIC S7-1200, частотні перетворювачі, сенсори). Розроблено структурну, функціональну та принципову електричну схеми. Спроектовано архітектуру прикладного програмного забезпечення для контролера та SCADA-системи в інженерному середовищі TIA Portal.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Макаренко М.В.			АНОТАЦІЯ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О.І.								4	1
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

3MICT

Вступ.....	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ.....	8
1.1 Загальні відомості про технологічний процес	8
1.2 Опис об'єкта керування та аналіз технологічного процесу	10
1.3 Принципи побудови об'єкту дослідження	12
1.4 Аналіз існуючих рішень автоматизації технологічного процесу.....	14
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА САК ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ТА ЇЇ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ	20
2.1 Структура об'єкту керування	20
2.2. Математичний опис об'єкта керування	26
2.3 Моделювання об'єкта керування та аналіз перехідних процесів	33
2.4 Вибір та обґрунтування комплексу технічних засобів автоматизації.....	40
2.5 Розробка структурної схеми системи керування	45
2.6 Розробка програмного забезпечення.....	48
2.7 Конфігурування програмованого логічного контролера	52
2.8 Розробка програмного забезпечення для SCADA системи	55
2.9 Розробка функціональної схеми автоматизації.....	64
2.10 Розробка схеми електричної принципової	69
ВИСНОВОК.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	75
ДОДАТОК А Лістинг програмного коду моделювання САК у середовищі MATLAB.....	78

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					
Розроб.		Макаренко М.В.			ЗМІСТ	Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О.І.					5	1	
						КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.							
Затверд.		Маринич І.А.							

ВСТУП

Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату у виробничих приміщеннях є критичною вимогою для підтримання стабільності технологічних циклів та дотримання санітарно-гігієнічних норм. Процес повітрообміну промислових масштабів супроводжується значними енергозатратами на підготовку припливного повітря, частка яких у загальному енергобалансі підприємства може сягати 30 - 40%. У цьому контексті технологія рекуперації тепла, що базується на утилізації теплової енергії витяжного потоку для попереднього нагріву припливного, виступає базовим інструментом оптимізації експлуатаційних витрат.

Функціонування сучасної системи припливно-витяжної вентиляції з рекуператором вимагає безперервного моніторингу та корекції множини взаємопов'язаних змінних: температури, вологості, витрати повітряних мас та аеродинамічного опору фільтруючих елементів. Традиційні релейні схеми управління або локальні ПІ-регулятори, які досі масово експлуатуються на вітчизняних підприємствах, не здатні забезпечити необхідну точність та гнучкість реакції на динамічні збурення, такі як різкі коливання зовнішньої температури чи зміна тепловиділень від технологічного обладнання.

Проблема, що вирішується у даній кваліфікаційній роботі, полягає в удосконаленні процесу управління мікрокліматом шляхом переходу від жорсткої логіки до адаптивних алгоритмів керування на базі сучасного програмованого логічного контролера (ПЛК). З точки зору експлуатаційної надійності та енергоефективності, впровадження ПЛК у комплексі з частотним регулюванням продуктивності вентиляторних установок дозволяє перерегулювання та усунути пускові перевантаження електромереж.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Макаренко М.В.			ВСТУП			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О.І.								6	2
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

Окремим завданням є розробка алгоритму захисту пластинчастого рекуператора від обмерзання, що базується на безперервному контролі диференційного тиску, з автоматичним управлінням байпасною заслінкою та підігрівачем.

Аналіз сучасного стану засобів промислової автоматизації свідчить про стійку тенденцію до децентралізації управління та глибокої інтеграції локальних контурів регулювання у глобальні інформаційні мережі підприємства. Використання промислових протоколів передачі даних дозволяє не лише збирати статистику роботи виконавчих механізмів, але й формувати предиктивні моделі обслуговування обладнання, що є основою для вирішення поставленого завдання.

Отже, обґрунтування актуальності теми полягає в тому, що розробка комплексної системи автоматичного керування припливно-витяжною вентиляцією з рекуперацією тепла є гострою інженерною потребою. Запропоноване рішення, яке охоплює синтез алгоритмів ПЛК, вибір сучасної КВПіА та створення людино-машинного інтерфейсу (SCADA), спрямоване на підвищення енергетичної ефективності об'єкта, зниження експлуатаційних витрат та забезпечення безперебійного підтримання заданих уставок у режимі реального часу.

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

1.1 Загальні відомості про технологічний процес

Функціонування припливно-витяжної вентиляції на сучасних промислових підприємствах є складним термодинамічним процесом. Головним завданням таких систем є асиміляція теплונадлишків, видалення шкідливих домішок та підтримання нормативних параметрів мікроклімату в робочій зоні згідно з чинними санітарно-гігієнічними нормами [1].

Через постійне зростання вартості енергоносіїв класичні прямоточні схеми повітрообміну без утилізації теплоти викидного повітря на сьогодні є економічно неефективними. Сучасним стандартом проектування є обов'язкове використання систем утилізації теплової енергії. Застосування пластинчастих або роторних рекуператорів дозволяє повернути до 60–80 % теплоти витяжного повітря назад у припливний канал [22].

Перспективним напрямком також є інтеграція у вентиляційну систему теплових насосів типу «повітря-вода». У цьому випадку низькопотенційна теплота відпрацьованого повітря слугує джерелом енергії для випарника [11]. Це дозволяє нагрівати теплоносії до +45...55 °С для гарячого водопостачання або роботи калориферів догріву з високим коефіцієнтом перетворення (COP) навіть у зимовий період.

Проте найбільш поширеним рішенням у промисловості залишається застосування перехресно-точних пластинчастих рекуператорів . На рисунку 1.1 наведено принципову схему руху повітряних потоків у такій установці.

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 1</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Макаренко М.В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22</i>		
					<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						8	12

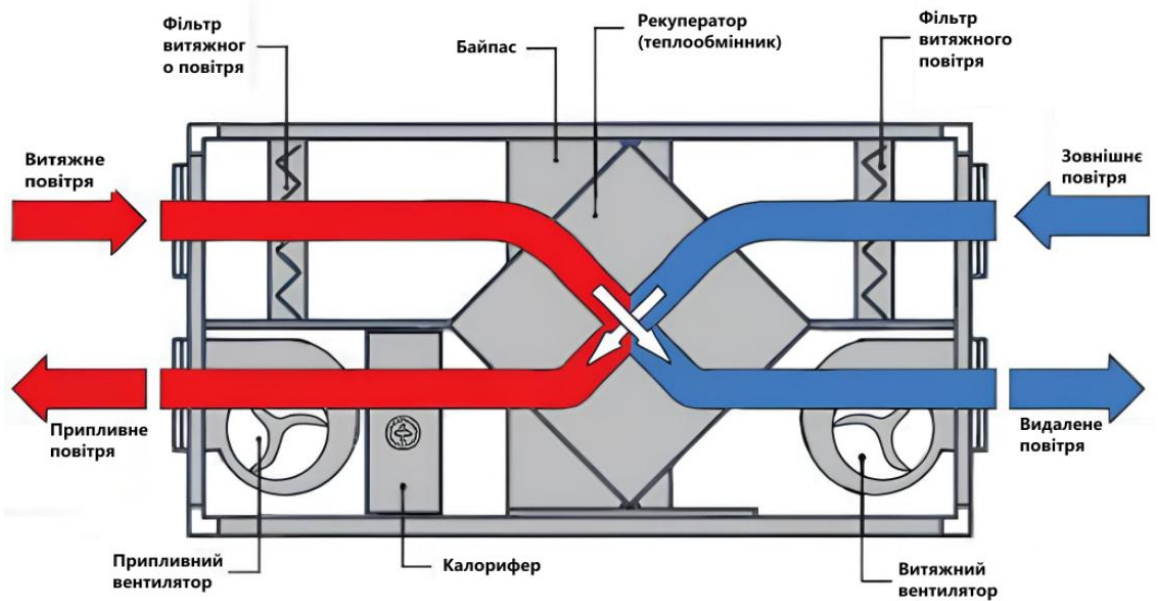


Рисунок 1.1 – Принципова схема руху повітряних потоків та процесу теплообміну в припливно-витяжній установці з пластинчастим рекуператором

Технологічний цикл підготовки повітряних мас розпочинається із забору зовнішнього середовища через повітроприймальні решітки. Для запобігання швидкому забрудненню (кольматації) дрібних каналів теплообмінника необхідно використовувати каскад фільтрів грубого (G4) та тонкого (F7) очищення [6]. Зростання аеродинамічного опору фільтрів призводить до розбалансування системи та збільшення навантаження на електродвигуни. Тому стан фільтрувальних вставок автоматично контролюється за допомогою диференційних пресостатів (реле тиску) [7].

Центральним вузлом установки виступає рекуператор, у якому відбувається передача теплоти від нагрітого витяжного потоку до холодного припливного. Пластинчаста конструкція гарантує просторову ізоляцію потоків, що виключає перетікання відпрацьованого повітря та запахів назад у приміщення [23].

Однак під час сильних морозів, коли температура зовнішнього повітря суттєво знижується, виникає загроза випадіння конденсату та його швидкого обмерзання на витяжних каналах матриці. Для запобігання цьому явищу автоматика частково відкриває байпасний канал, перенаправляючи холодне

повітря в обхід теплообмінника, а нестача тепла компенсується збільшенням потужності калорифера догріву [28].

Транспортування повітряних потоків забезпечується вентиляторними агрегатами. Застосування перетворювачів частоти для керування двигунами вентиляторів дозволяє гнучко регулювати продуктивність установки, усуває високі пускові струми та знижує споживання електроенергії на приводні механізми до 40 % [27].

1.2 Опис об'єкта керування та аналіз технологічного процесу

Об'єктом керування у даній кваліфікаційній роботі виступає комплексна промислова припливно-витяжна установка з теплоутилізатором (номінальною продуктивністю близько 6000-6600 м³/год), що функціонує в умовах виробничого приміщення [24]. На рисунку 1.2 наведено розгорнуту функціонально-технологічну схему обробки повітряних мас в такій системі.

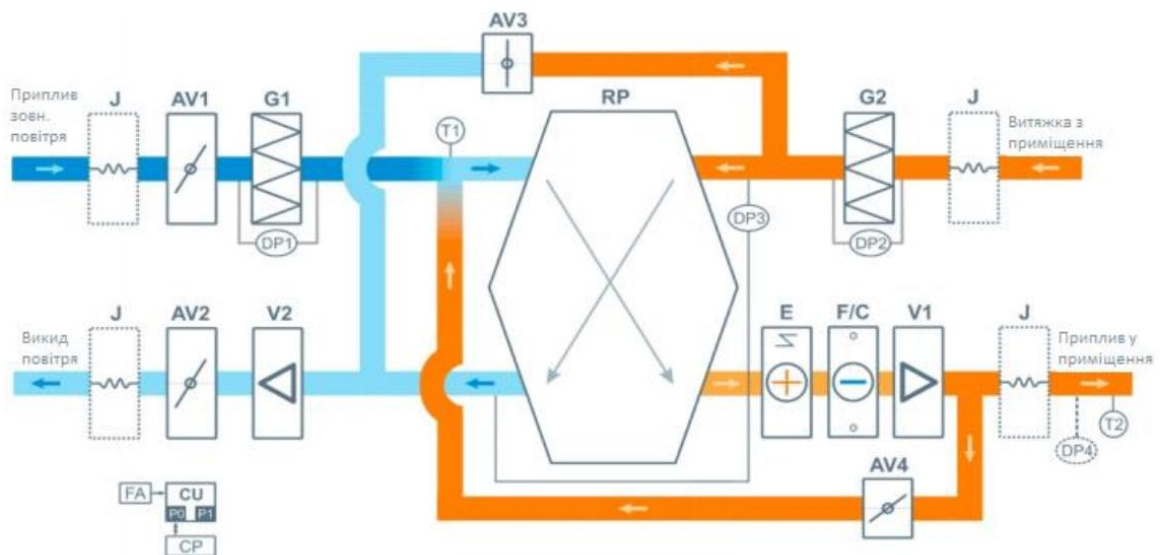


Рисунок 1.2 – Розгорнута функціональна схема припливно-витяжної установки з рекуперацією та контурами регулювання

– Розглядаючи дану установку (рис. 1.2) як багатозв'язну динамічну систему, необхідно виокремити наявність суттєвої взаємодії між контурами

регулювання температури, вологості та витрати повітряних мас [9]. Апаратна структура об'єкта охоплює кілька взаємодіючих технологічних зон, позначених на схемі [25]:

- Секції повітрязабору та викиду з гравітаційними або моторизованими жалюзі (AV1, AV2);
- Каскад фільтрації (G1 для припливу, G2 для витяжки) з датчиками перепаду тиску (DP1, DP2);
- Теплообмінну матрицю рекуператора (RP) з байпасним клапаном (AV3);
- Секцію додаткового нагріву/охолодження (калорифер E та охолоджувач F/C);
- Нагнітальний і витяжний агрегати (V1, V2).

Зміна одного з параметрів (наприклад, зниження продуктивності витяжного вентилятора V2 за сигналом датчика якості повітря) неминуче викликає збурення в інших контурах [13]. Зокрема, це призводить до падіння обсягу теплоносія в рекуператорі (RP) і швидкого зниження температури припливного потоку (T1), що вимагає миттєвої реакції контуру догріву [10].

Технологічний процес термодинамічної обробки повітря характеризується значною транспортною затримкою та суттєвою тепловою інерційністю [14]. Перехідний процес нагрівання повітря в калорифері (E) описується диференціальними рівняннями з чистим запізненням, що суттєво ускладнює синтез класичних ПІ-законів регулювання [12]. Теплоносієм у водяному калорифері виступає перегріта вода, витрата якої регулюється триходовим сідельним клапаном. Відпрацювання заданої уставки температури припливного повітря (T2) вимагає від ПЛК безперервного коригування положення штока клапана з урахуванням поточної швидкості потоку в каналі [11].

Важливою технологічною вимогою є багаторівневий апаратний та програмний захист калорифера від заморожування [28]. При падінні температури зворотної води або спрацюванні капілярного термостата безпеки

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

по повітрю, система автоматики повинна діяти за жорстким аварійним алгоритмом: миттєво відкрити регульовальний клапан теплоносія на 100%, примусово вимкнути припливний вентилятор (V1) і повністю закрити зовнішні повітряні заслінки (AV1), блокуючи надходження морозного повітря у венткамеру [21].

З точки зору експлуатаційної надійності, керування таким комплексом потребує використання сучасного програмованого логічного контролера [7]. ПЛК дозволяє реалізувати багатозв'язні алгоритми, де продуктивність вентиляторів, ступінь рекуперації (через AV3) та потужність калорифера обчислюються синхронно, попереджаючи виникнення автоколивань і гарантуючи астатичне підтримання мікроклімату [15].

1.3 Принципи побудови об'єкту дослідження

Детальний аналіз технологічного комплексу припливно-витяжної вентиляції з перехресно-точним рекуператором як об'єкта автоматичного керування (ОАК) засвідчує його належність до класу багатомірних, багатозв'язних динамічних систем із розподіленими параметрами. З інженерної точки зору, синтез адекватної структури керування вимагає фундаментальної ідентифікації вхідних керуючих впливів, контрольованих вихідних координат та спектру зовнішніх неконтрольованих збурень, що безперервно дестабілізують параметри мікроклімату в робочій зоні [10].

Формування принципів побудови ОАК базується на декомпозиції загального технологічного процесу на локальні підсистеми з подальшим визначенням їх передавальних функцій. Контрольованими величинами (вектором виходу), що визначають якість функціонування об'єкта, є температура припливного повітря в нагнітальному каналі, градієнт диференційного тиску на фільтрувальних секціях та матриці теплообмінника, а також об'ємна витрата припливного і витяжного повітряних потоків [11].

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вхідними керуючими впливами, за допомогою яких система компенсує відхилення, виступають:

- просторове положення штока триходового регулювального клапана водяного калорифера (змінна витрати теплоносія);
- кут повороту ламелей байпасної заслінки рекуператора;
- частота напруги живлення, що подається від перетворювачів частоти на статорні обмотки асинхронних двигунів припливного і витяжного вентиляторів [27].

Основними збурювальними впливами виступають сезонні та добові коливання ентальпії зовнішнього повітря, нестаціонарні тепловиділення від промислового обладнання в цеху та поступове нелінійне зростання аеродинамічного опору тракту внаслідок кольматації фільтрувальних елементів [14].

Досліджуючи установку як об'єкт регулювання, критично важливо враховувати її суттєву теплову інерційність та наявність чистого транспортного запізнення по повітроводах. Динаміка передачі теплоти від рідкого теплоносія до рухомого повітряного середовища через стінки біметалевих трубчастих калориферів апроксимується аперіодичними ланками першого або другого порядку з транспортним запізненням. З точки зору експлуатаційної надійності та енергоефективності, впровадження мікропроцесорної техніки дозволяє нівелювати це запізнення шляхом реалізації каскадних схем керування, де допоміжним (швидким) параметром виступає температура зворотного теплоносія [9].

Окрему складність при математичному описі та побудові системи становить наявність сильних перехресних зв'язків між аеродинамічними та тепловими каналами. Наприклад, зміна продуктивності витяжного вентилятора призводить до зменшення масової витрати теплоносія через рекуператор і, як наслідок, до падіння ефективності утилізації теплоти. Це миттєво формує збурення по каналу температури припливу. Ефективна система автоматизації повинна розглядати ці канали не ізольовано, а як єдину

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

структуру, де зміна аеродинамічного режиму через алгоритм компенсації збурень автоматично генерує випереджальний коригувальний сигнал у контур терморегулювання [13].

Сучасний підхід до проектування таких об'єктів вимагає наскрізної інтеграції систем автоматизованого проектування на всіх етапах. Розробка принципів електричних схем та схем підключень повинна базуватися на сучасних інженерних платформах, таких як EPLAN Education 2025, що забезпечує безпомилкову маршрутизацію зв'язків та автоматичну генерацію специфікацій. Водночас, апаратна реалізація та конфігурування логічних зв'язків програмованого контролера вимагає використання середовищ розробки рівня TIA Portal, що дозволяє органічно поєднати програмування технологічних блоків із розробкою людино-машинного інтерфейсу (HMI) [16].

Вимоги, що висуваються до проектованої системи:

- Забезпечення астатичного підтримання температури припливного повітря з похибкою не більше ± 1 °C у всьому діапазоні витрат.

- Інваріантність витрати повітря до зміни аеродинамічного опору фільтрів, що реалізується через замикання контуру керування перетворювачами частоти за диференційним тиском на дифузорах вентиляторів.

- Наявність пріоритетних підпрограм безумовного апаратного та програмного захисту: превентивний алгоритм активного відтавання пластин рекуператора при фіксації критичного диференційного тиску та захист водяного калорифера від розморожування [28].

1.4 Аналіз існуючих рішень автоматизації технологічного процесу

Ретроспективний аналіз проектної документації та багаторічний досвід експлуатації вентиляційних установок на вітчизняних промислових підприємствах свідчить про домінування морально застарілих релейно-

контакторних схем керування. Класичним підходом до регулювання параметрів мікроклімату дотепер залишається застосування локальних аналогових або найпростіших мікропроцесорних ПІ-регуляторів, що функціонують у жорстко ізольованих контурах без можливості інформаційного обміну [8].

На рисунку 1.3 наведено типовий приклад щита автоматики, побудованого на базі дискретної релейної логіки, який масово зустрічається на діючих об'єктах.



Рисунок 1.3 – Типова конфігурація застарілого релейно-контакторного щита керування припливно-витяжною вентиляцією

Апаратна архітектура такого рівня (рис. 1.3) унеможлиблює реалізацію складних адаптивних алгоритмів. Регулювання продуктивності вентиляторних агрегатів у подібних системах переважно здійснюється методом механічного дроселювання – зміною аеродинамічного опору мережі за допомогою напрямних апаратів або ручних шиберів. З точки зору

енергоефективності, цей метод характеризується критично низьким коефіцієнтом корисної дії та призводить до невиправданих перевитрат електричної енергії на подолання штучно створеного опору [27].

Окремої критики заслуговують алгоритми захисту пластинчастого рекуператора від обмерзання [28]. Типові існуючі рішення базуються на вкрай примітивній логіці: при зниженні температури витяжного повітря після теплообмінної матриці нижче критичної позначки (зазвичай $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$), термостат ініціює повне відключення припливного вентилятора з одночасною штатною роботою витяжного агрегату. З інженерної точки зору такий підхід є категорично неприпустимим для безперервних виробничих циклів. Він провокує глибоке розрідження в цеху, стимулює неконтрольовану інфільтрацію неочищеного морозного повітря крізь нещільності огорожувальних конструкцій та грубо порушує санітарно-гігієнічний регламент підприємства [1]. Відсутність пропорційно керованого байпасування призводить до повної зупинки процесу подачі свіжого повітря на весь період відтавання матриці.

Обґрунтовуючи необхідність розробки нової системи автоматизації, слід зазначити, що децентралізовані схеми не здатні забезпечити комплексну оптимізацію споживання ресурсів [7]. Модернізація є безальтернативним кроком для переходу до об'єктно-орієнтованих систем з підтримкою сучасних промислових мереж (Profinet, Modbus TCP), що відкриває можливість безшовної інтеграції щита керування у верхній рівень АСУ ТП підприємства [16]. На рисунку 1.4 представлено фрагмент розробленої блок-схеми базового алгоритму керування, який ілюструє перехід від жорсткої релейної логіки до гнучкого мікропроцесорного управління.

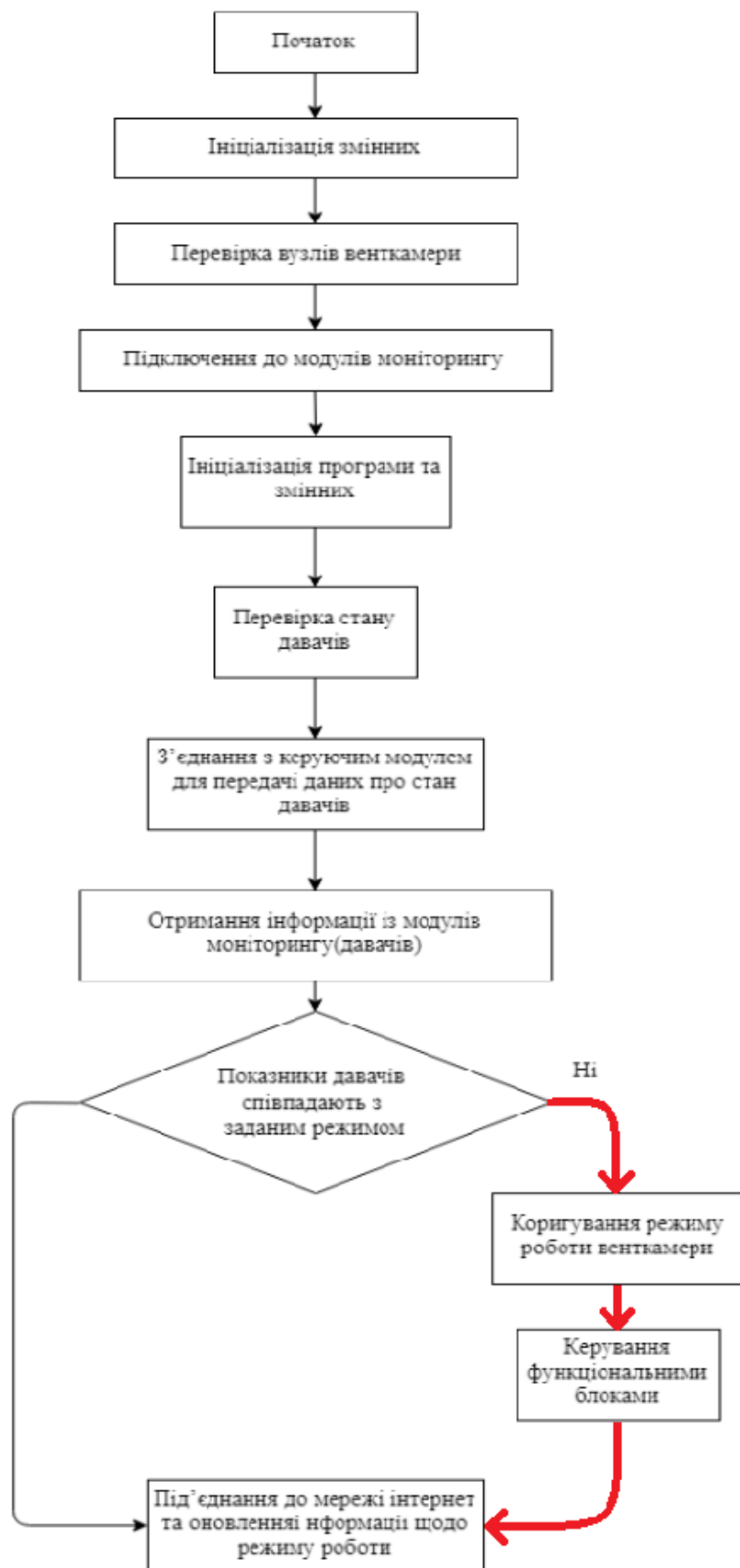


Рисунок 1.4 – Блок-схема модернізованого алгоритму управління підсистемами припливно-витяжної установки

У першому розділі проведено комплексний аналіз технологічного процесу підготовки повітря в загальнообмінній припливно-витяжній вентиляції. Встановлено, що даний об'єкт є складною багатозв'язною динамічною системою, яка характеризується значною тепловою інерційністю та транспортним запізненням по повітроводах [13].

Огляд існуючих рішень показав, що традиційні релейно-контакторні схеми керування та локальні регулятори морально застаріли. Вони не здатні забезпечити необхідну енергоефективність, точність підтримання мікроклімату та надійний пропорційний захист рекуператора від обмерзання у зимовий період [28].

Обґрунтовано необхідність глибокої модернізації системи автоматизації шляхом переходу на сучасну мікропроцесорну базу. Використання промислового програмованого логічного контролера дозволить реалізувати адаптивні багатозв'язні алгоритми керування, частотне регулювання продуктивності вентиляторів та забезпечити безшовну інтеграцію установки в єдину інформаційну мережу підприємства [15].

На основі проведеного критичного аналізу та з урахуванням розробленої блок-схеми (рис. 1.4), формулюються наступні завдання, що підлягають вирішенню під час виконання кваліфікаційної роботи:

- Розробити математичну модель динаміки теплообміну в калорифері та рекуператорі з урахуванням суттєвого транспортного запізнення по повітроводах [9].

- Синтезувати структуру каскадної системи автоматичного регулювання температури припливного повітря та превентивний алгоритм захисту рекуператора від обмерзання за показаннями диференціальних пресостатів [28].

- Виконати інженерний вибір комплексу технічних засобів автоматизації (КВПіА), включаючи програмований логічний контролер, частотні перетворювачі, пресостати та сервоприводи, спираючись на технічні специфікації сучасного обладнання [24].

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Розробити прикладне програмне забезпечення для контролера в середовищі TIA Portal, реалізуючи багатозв'язні контури регулювання [16].
- Розробити структурну, функціональну та принципову електричну схеми автоматизації з використанням сучасних САПР [25].

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						19
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА САК ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ТА ЇЇ ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

2.1 Структура об'єкту керування

Проектована система автоматичного керування (САК) припливно-втяжною вентиляційною установкою Blauberg BL07 RH 6000-HE-S31 [24] розглядається як складна динамічна система, що вимагає впровадження багаторівневої ієрархічної структури для забезпечення стабільності технологічних режимів. Вибір такої архітектури обумовлений необхідністю розподілу функцій збору даних, логічної обробки та візуалізації, що є критичним для підтримання енергоефективності процесу рекуперації тепла. Функціонування САК базується на безперервній вертикальній та горизонтальній взаємодії польового обладнання, високопродуктивних обчислювальних потужностей програмованого логічного контролера (ПЛК) та інтелектуальних засобів людино-машинного інтерфейсу (НМІ).

З точки зору системного аналізу та теорії автоматичного керування, об'єкт автоматизації декомпонується на три функціонально залежні рівні, кожен з яких вирішує специфічне коло інженерних задач [7]. Така декомпозиція дозволяє локалізувати процеси регулювання, підвищити живучість системи при відмові окремих компонентів та забезпечити високу експлуатаційну надійність у складних умовах промислового виробництва.

– Нижній рівень (рівень польової периферії та виконавчих механізмів) виступає джерелом первинної інформації про стан повітряного середовища та безпосереднім інструментом реалізації керуючих впливів. На цьому рівні зосереджені аналогові та дискретні пристрої (датчики Pt1000, пресостати PS1–

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>РОЗДІЛ 2</i>		
<i>Розроб.</i>		<i>Макаренко М.В.</i>					
<i>Перевір.</i>		<i>Савицький О.І.</i>					
<i>Н. Контр.</i>		<i>Маринич І.А.</i>					
<i>Затверд.</i>		<i>Маринич І.А.</i>			<i>КНУ АКІТ-22</i>		
					<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
						20	51

PS3, сервоприводи Belimo) [25], що забезпечують фізичне перетворення параметрів.

– Середній рівень (рівень автоматичного регулювання та логічного управління) представлений ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 [15], який виконує роль центрального координатора. Саме тут реалізуються алгоритми ПІД-регулювання температури припливу та логічні схеми захисту калорифера від заморожування. Зв'язок між нижнім та середнім рівнями здійснюється через розвинену систему аналогово-цифрового перетворення та дискретних інтерфейсів.

– Верхній рівень (рівень диспетчерського контролю та збору даних SCADA/HMI) забезпечує інформаційну прозорість технологічного процесу для експлуатаційного персоналу. Завдяки використанню промислового протоколу PROFINET [16], дані про енергоефективність рекуперації та стан фільтрувальних секцій передаються на панель оператора для візуалізації, архівування та формування стратегій предиктивного обслуговування.

Впровадження такої трирівневої структури дозволяє системі гнучко адаптуватися до динамічних змін зовнішньої температури (від -10°C у зимовий період до $+32^{\circ}\text{C}$ влітку), гарантуючи стабільну витрату повітря на рівні $6600\text{ м}^3/\text{год}$ при мінімальних питомих енерговитратах.

Нижній (польовий) рівень САК

Нижній рівень ієрархічної структури автоматизації виступає фундаментальним базисом для збору первинної інформації про стан повітряного середовища та безпосереднього фізичного впливу на технологічне обладнання установки Blauberg BL07 RH 6000-HE-S31 [24]. Цей рівень інтегрує в собі розгалужену мережу сенсорів та виконавчих пристроїв, що забезпечують замкненість контурів регулювання та безаварійність експлуатації.

Сенсорна підсистема моніторингу параметрів Для забезпечення прецизійного контролю термодинамічного стану повітряних мас у різних точках тракту використано платинові термоперетворювачі опору типу Pt1000

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

[25]. Датчик TE1 здійснює вимірювання температури зовнішнього припливного повітря, що є критично важливим параметром для розрахунку енергії підігріву у зимовий період. Датчик TE2 фіксує температуру витяжного повітря перед теплообмінною матрицею, а TE5 результуючу температуру у припливному каналі після всіх етапів підготовки. Висока стабільність характеристик Pt1000 дозволяє мінімізувати інструментальну похибку вимірювання, що є передумовою для астатичного підтримання уставки мікроклімату [10].

Окрім температурного моніторингу, польовий рівень включає групу диференційних пресостатів (реле тиску) серії PS. Датчики PS1 та PS2 налаштовані на контроль перепаду тиску на фільтрувальних вставках припливного та витяжного каналів відповідно. Зростання диференційного тиску понад граничну уставку (наприклад, 200 Па) генерує дискретний сигнал для ПЛК про необхідність сервісного обслуговування, доки падіння продуктивності не стало критичним. Пресостат PS3 виконує функцію апаратно-програмного захисту: він підтверджує наявність повітряного потоку, що генерується вентилятором, і є безумовною умовою для активації ступенів електричного нагріву HE потужністю 24 кВт [25]. Це запобігає термічному руйнуванню ТЕНів при раптовій зупинці двигуна або обриві приводного ремня.

Виконавча підсистема регулювання Механічна реалізація керуючих впливів забезпечується сервоприводами повітряних заслінок SM1 та SM2 із пропорційним керуванням (аналоговий сигнал 0–10 В). Ці механізми забезпечують не лише герметизацію каналів при зупинці установки, але й беруть участь у процесі адаптивного антифризового захисту рекуператора, регулюючи обсяг байпасування потоку у разі загрози обмерзання матриці [28].

Для тонкого регулювання теплової потужності калорифера використано триходовий сідельний клапан з електроприводом. Його функція полягає у зміні коефіцієнта змішування прямого та зворотного потоків теплоносія, що

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

дозволяє плавно коригувати температуру припливу незалежно від інерційності котельного контуру [13].

Завершальним елементом польового рівня є частотні перетворювачі (VFD), що інтегровані в ланцюги живлення асинхронних двигунів припливного (M1) та витяжного (M2) вентиляторів [27]. Модуляція частоти напруги живлення дозволяє динамічно адаптувати продуктивність установки до номінальних 6600 м³/год, забезпечуючи високу енергоефективність через нівелювання втрат на механічне дроселювання.

Середній (керуючий) рівень САК

Середній рівень виступає інтелектуальним обчислювальним ядром системи автоматизації, апаратна реалізація якого базується на промисловому програмованому логічному контролері Siemens SIMATIC S7-1200 (зокрема, з використанням базового модуля CPU 1214C) [15]. Цей рівень консолідує інформаційні потоки від сенсорної підсистеми та генерує відповідні командні впливи для виконавчих механізмів, забезпечуючи автономне функціонування установки без необхідності постійного втручання оператора.

Апаратна архітектура керуючого рівня масштабується відповідно до кількості точок вводу-виводу проектованої системи. Оскільки базова конфігурація CPU має обмежену кількість аналогових каналів, структура передбачає використання додаткових сигнальних модулів (Signal Modules - SM) [15]. Це дозволяє реалізувати апаратну гальванічну розв'язку та високоточне аналогово-цифрове перетворення (АЦП) сигналів стандарту 4–20 мА від пресостатів та резистивних сигналів від термоопорів Pt1000 безпосередньо у внутрішні машинні змінні контролера.

З програмно-алгоритмічної точки зору, ПЛК функціонує в режимі жорсткого детермінованого часу. Процесор здійснює безперервне циклічне опитування стану польової периферії (через головний організаційний блок OB1). Математичний співпроцесор контролера відповідає за обчислення неузгодженостей (помилки регулювання) та паралельне виконання багатозв'язних алгоритмів. Для прецизійного астатичного підтримання

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температури припливного повітря (в умовах постійних збурень від зміни ентальпії зовнішнього середовища) використовується інтегрований технологічний об'єкт PID_Compact [16]. Даний програмний блок автоматично розраховує пропорційну, інтегральну та диференційну складові, формуючи згладжений керуючий вплив (0–10 В) для позиціонування штока триходового клапана калорифера.

Окремим критичним завданням середнього рівня є забезпечення апаратної та функціональної безпеки технологічного процесу. Завдяки системі апаратних переривань (Hardware Interrupts), ПЛК здатен із мілісекундною затримкою реагувати на аварійні події. Наприклад, при надходженні дискретного сигналу від пожежної централі підприємства (FCP1) [25] або спрацюванні капілярного термостата захисту від розморожування, контролер миттєво призупиняє виконання стандартних ПД-законів і переходить до підпрограми аварійної зупинки (відключення вентиляторів, закриття заслінок).

Комунікаційний потенціал керуючого рівня розкривається через використання вбудованого промислового інтерфейсу PROFINET [16]. Дане рішення на базі стандарту Industrial Ethernet гарантує високошвидкісний (до 100 Мбіт/с) та стійкий до електромагнітних завад обмін даними. Це забезпечує не лише надійний зв'язок із частотними перетворювачами SINAMICS V20 та панелями оператора на локальному рівні, але й формує стандартизований шлюз для безшовної інтеграції щита автоматики вентиляції у загальнозаводську розподілену систему керування (DCS) або існуючу SCADA-систему верхнього рівня.

Верхній (інформаційний) рівень САК

Верхній рівень ієрархічної структури автоматизації являє собою людино-машинний інтерфейс (HMI), що виступає терміналом для інтерактивного діалогу між оператором-технологом та обчислювальними потужностями контролера. Апаратна реалізація даного рівня базується на використанні промислових сенсорних панелей (наприклад, серії Siemens SIMATIC Basic або

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Comfort) або робочих станцій на базі промислових ПК, де розгортається середовище візуалізації та диспетчерського контролю [16].

Функціональне призначення інформаційного рівня полягає у перетворенні масивів сирих даних, що надходять від ПЛК через мережу PROFINET, у наочну графічну форму. Програмна реалізація інтерфейсу здійснюється в інженерному середовищі TIA Portal (модуль WinCC) [15], що дозволяє створити єдиний інформаційний простір та забезпечити безшовну прив'язку тегів контролера до графічних об'єктів мнемосхем.

Основні функціональні блоки верхнього рівня:

– Візуалізація технологічного процесу у реальному часі: Головний екран системи містить динамічну мнемосхему установки Blauberg BL07 [24], де відображаються поточні значення температури припливного, витяжного та зовнішнього повітря, а також анімоване представлення роботи вентиляторів V1 та V2. Використання кольорової індикації та графічних примітивів дозволяє оператору миттєво оцінювати стан виконавчих механізмів: ступінь відкриття байпасної заслінки рекуператора у відсотках та поточну потужність електричного калорифера (24 кВт).

– Система керування уставками та режимами: Верхній рівень надає інструментарій для оперативного коригування технологічного регламенту. За допомогою захищених паролем полів вводу оператор встановлює цільові значення температури та задає параметри розкладу роботи установки (денний/нічний режими). Це дозволяє гнучко адаптувати повітрообмін (до номінальних $6600 \text{ } \text{m}^3/\text{год}$) до поточного виробничого навантаження цеху.

– Обробка та реєстрація аварійних подій (Alarm Logging): Критично важливою функцією є моніторинг позаштатних ситуацій [7]. При фіксації сигналів від пресостатів про забруднення фільтрів або спрацюванні захисту від обмерзання, система генерує текстові та звукові сповіщення. Всі події записуються в енергонезалежний журнал із зазначенням точного часу виникнення та квітування, що є необхідним для подальшого аналізу причин збоїв.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

– Архівація даних та аналіз трендів (Trending): ПЗ верхнього рівня забезпечує довготривале зберігання параметрів функціонування. Графічне представлення історії температур та енергоспоживання дозволяє оцінювати фактичну ефективність рекуперації (73–80%) у динаміці та виявляти потенційні можливості для подальшої оптимізації енерговитрат.

Таким чином, інформаційний рівень не лише забезпечує прозорість функціонування складної системи вентиляції, а й виступає засобом підтримки прийняття рішень, гарантуючи відповідність параметрів мікроклімату заданим стандартам при максимальній енергоефективності обладнання.

Структурна декомпозиція об'єкта також передбачає виділення трьох взаємопов'язаних контурів регулювання [9]:

1. Контур термодинамічної стабілізації: керування потужністю калорифера (24 кВт) та ступенем рекуперації тепла (через байпас) для підтримки уставки температури у припливному каналі.

2. Аеродинамічний контур: адаптивне регулювання продуктивності вентиляторів (6600 м³/год) залежно від ступеня забруднення фільтрів та вимог до кратності повітрообміну.

3. Контур функціональної безпеки: реалізація пріоритетних алгоритмів захисту від обмерзання рекуператора та розморожування калорифера [28], що функціонують незалежно від основної логіки керування.

Така організація структури дозволяє мінімізувати вплив зовнішніх збурень і гарантує астатичне підтримання параметрів мікроклімату при мінімальних енерговитратах.

2.2. Математичний опис об'єкта керування

Математичне моделювання процесів термодинамічної обробки повітря виступає не лише обов'язковим етапом проектування, а є фундаментальним базисом для подальшого аналітичного синтезу оптимальних законів керування

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

та всебічного аналізу стійкості САК у широкому діапазоні експлуатаційних режимів. Процес підготовки повітряних мас в установці Blauberg BL07 RH 6000-HE-S31 [24] характеризується високою складністю, що зумовлена нестаціонарністю зовнішніх метеорологічних чинників та нелінійністю характеристик теплообмінних апаратів.

Слід зазначити, що номінальна продуктивність установки на рівні 6600 м³/год є технологічно обґрунтованою величиною. Цей об'єм повітря розрахований відповідно до санітарно-гігієнічних вимог ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [1], що регламентують необхідну кратність повітрообміну для повної асиміляції виробничих теплонадлишків та забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в робочій зоні цеху.

З точки зору теорії автоматичного керування, даний об'єкт автоматизації розглядається як багатомірна та багатозв'язна динамічна система із розподіленими параметрами. Його математична формалізація вимагає складання комплексної системи диференціальних рівнянь вищих порядків, що базуються на фундаментальних законах збереження енергії (теплого балансу) [9] та речовини (матеріального балансу). Такий підхід дозволяє на етапі проектування врахувати критичні особливості установки, зокрема суттєве транспортне запізнення потоку в розгалуженій мережі повітроводів та значну теплову інерційність масивних ламелей рекуператора і мідно-алюмінієвої структури калорифера [13].

Обґрунтований математичний опис є критично важливим для переходу від теоретичних концепцій до практичної програмної реалізації. Точність отриманих рівнянь безпосередньо корелює з якістю подальшої імплементації ПІД-алгоритмів у середовищі TIA Portal [16]. Це забезпечує можливість прецизійного налаштування коефіцієнтів регулювання, що дозволяє мінімізувати амплітуду перерегулювання та скоротити час адаптації системи до сталих режимів при різких змінах технологічних уставок або при дії інтенсивних зовнішніх збурень.

					<i>КНУ КРБ.151.26.05.00.ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Застосування методів математичного моделювання дозволяє розглядати установку як «цифровий двійник», на якому проводиться оптимізація алгоритмів розморожування рекуператора та перевірка стійкості контурів терморегулювання [10]. Це забезпечує вихід на проектні показники енергоефективності (ККД рекуперації 73–80%) при безумовному дотриманні санітарно-гігієнічних регламентів виробничого приміщення [14].

Математична модель водяного калорифера як об'єкта регулювання температури

Процес нагрівання припливного повітряного потоку номінальним об'ємом 6600 м³/год у водяному калорифері являє собою складний акт тепломасообміну, що характеризується вираженою нестационарністю та суттєвою тепловою інерцією теплообмінної поверхні. Конструктивно калорифер установки Blaubeurg BL07 складається з пакету мідних трубок із щільним алюмінієвим оребренням, що має значну акумулюючу здатність [24]. Це призводить до того, що реакція вихідної температури повітря на зміну положення штока триходового клапана (і, як наслідок, витрати гарячої води) відбувається не миттєво, а з певним експоненціальним запізненням.

З позицій теорії автоматичного керування (ТАК), водяний нагрівач розглядається як динамічна ланка із зосередженими параметрами, а саме аперіодична ланка першого порядку з чистим запізненням [13]. Така модель є найбільш адекватною для опису об'єктів, де перехідний процес має чітко виражений інерційний характер, зумовлений часом прогріву маси металу теплообмінника.

Математична формалізація динаміки нагріву повітря у калорифері в операторній формі (за Лапласом) подається у вигляді такої передавальної функції:

$$W_{\text{кал}}(s) = \frac{\Delta T_{\text{пр}}(s)}{\Delta G_{\text{т}}(s)} = \frac{k_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}}s + 1} e^{-\tau s} \quad (2.1)$$

де: $k_{\text{кал}}$ — коефіцієнт підсилення об'єкта. Він відображає статичну чутливість системи та показує, на скільки градусів Цельсія зміниться

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

температура припливного повітря у сталому режимі при зміні витрати теплоносія на одиницю (або зміні положення регулювального клапана). Слід враховувати, що цей коефіцієнт не є константою і залежить від поточної температури води у котельній мережі та початкової температури зовнішнього повітря.

– $T_{\text{кал}}$ – стала часу об'єкта. Даний параметр характеризує темп протікання перехідного процесу і визначається сукупною теплоємністю мідно-алюмінієвого пакету та інтенсивністю відведення теплоти повітряним потоком. Оскільки номінальна витрата повітря є значною ($6600 \text{ м}^3/\text{год}$), це сприяє інтенсивному охолодженню ламелей, що дещо знижує інерційність системи порівняно з установками меншої продуктивності.

– τ – час чистого (транспортного) запізнення. Цей критичний чинник зумовлений швидкістю поширення температурного фронту по повітроводу від секції нагріву до місця інсталяції каналного датчика температури TE5 [25].

Розрахунок величини τ виконується на основі геометричних та аеродинамічних параметрів системи як відношення лінійної відстані L (від виходу калорифера до чутливого елемента датчика) до середньої швидкості повітряного потоку v у перерізі каналу:

$$\tau = \frac{L}{v} \quad (2.2)$$

Для проєктованої установки Blaubeurg BL07, з урахуванням габаритних розмірів венткамери та рекомендованих зон стабілізації потоку, значення транспортного запізнення варіюється в межах 1,5–3 секунд [24]. Наявність цього запізнення вносить фазовий зсув у контур регулювання, що є основним дестабілізуючим фактором. Це необхідно безумовно враховувати при синтезі та налаштуванні коефіцієнтів ПД-регулятора (технологічного об'єкта PID_Compact) у середовищі TIA Portal [15]. Ігнорування транспортної затримки при розрахунку параметрів регулювання може призвести до виникнення стійких автоколивань температури, що негативно вплине на якість

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроклімату та призведе до передчасного зносу сервоприводу триходового клапана.

Моделювання процесів у пластинчастому рекуператорі

Теплоутилізатор (рекуператор) перехресно-точного типу, що є базовим енергозберігаючим вузлом установки Blauberg BL07, з позицій математичного моделювання являє собою складний багатозв'язний об'єкт. Його головна особливість полягає в тому, що температура припливного повітря на виході з теплообмінної матриці не є незалежною величиною. Вона формується як результат складної термодинамічної взаємодії і безпосередньо залежить від поточної ентальпії витяжного повітря з робочої зони та нестаціонарних зовнішніх метеорологічних умов [14].

Базова математична модель цього процесу ґрунтується на фундаментальному рівнянні енергетичного балансу між двома ізольованими повітряними потоками. Температурна ефективність (коефіцієнт корисної дії) рекуперації η , яка для даного типу обладнання в номінальному режимі сягає 73–80%, є ключовим параметром, що визначає енергетичну цінність системи [24].

Процес передачі явної теплоти описується наступною аналітичною залежністю:

$$T_{\text{пр.після}} = T_{\text{зовн}} + \eta \times (T_{\text{витяж}} - T_{\text{зовн}}) \quad (2.3)$$

де: $T_{\text{зовн}}$ – початкова температура зовнішнього середовища, моніторинг якої безперервно здійснюється каналним термоперетворювачем TE1;

– $T_{\text{пр.після}}$ – результуюча температура припливного повітря після проходження теплообмінної матриці (перед калорифером догріву);

– $T_{\text{витяж}}$ – температура відпрацьованого витяжного повітря перед рекуператором.

Аналізуючи динамічні властивості об'єкта, слід зазначити, що процес теплообміну через тонкостінні алюмінієві ламелі рекуператора протікає з високою інтенсивністю. Порівняно з масивним мідно-алюмінієвим блоком

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

водяного калорифера, теплова акумулююча здатність алюмінієвої матриці є вкрай малою. Тому в операторній формі динаміку зміни температури в рекуператорі допустимо апроксимувати інерційною ланкою першого порядку з дуже малою сталою часу $T_{рек}$, значення якої зазвичай лежить у межах 5–10 секунд [9].

Однак, головна проблема синтезу САК полягає у наявності сильних перехресних зв'язків. Динамічна взаємодія між витяжним та припливним потоками означає, що будь-яка зміна продуктивності одного з вентиляторів (наприклад, зміна витрати) миттєво змінює співвідношення масових витрат у матриці, що нелінійно впливає на коефіцієнт η .

Особливо гостро ця проблема проявляється у зимовий період під час загрози кристалізації конденсату [28]. Для нівелювання цих перехресних збурень та захисту матриці від руйнування льодом, ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 повинен реалізовувати алгоритми предиктивного керування. Контролер, спираючись на показання диференційного пресостата, динамічно компенсує нестачу теплоти шляхом плавного керування байпасною заслінкою SM1 (використовуючи аналоговий вихід 0–10 В) [25]. Це дозволяє перенаправити частину холодного припливу повз рекуператор, зберігаючи аеродинамічний баланс та використовуючи теплоту витяжки для автономного розморожування ламелей.

Характеристика аеродинамічного тракту та частотного приводу

Аеродинамічний тракт вентиляційної установки виступає ключовою транспортною підсистемою, що забезпечує масоперенос повітряних об'ємів через усі секції термодинамічної обробки. Головними генераторами статичного та динамічного напору є відцентрові вентиляторні агрегати V1 (припливний) та V2 (витяжний), укомплектовані трифазними асинхронними електродвигунами потужністю 2,55 кВт кожний [24].

При побудові математичної моделі слід враховувати, що класичні асинхронні двигуни при прямому пуску від мережі мають значну електромеханічну інерцію. Проте, у проектованій САК живлення двигунів

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здійснюється через сучасні перетворювачі частоти Siemens SINAMICS V20 [27]. Використання алгоритмів безсенсорного векторного керування (Sensorless Vector Control) дозволяє практично миттєво формувати необхідний електромагнітний момент на валу, нівелюючи механічну інерцію масивних робочих коліс. Тому з позицій макроскопічного аналізу системи автоматичного керування, частотно-регульований електропривод розглядається як ідеальна підсилювальна (пропорційна) ланка без транспортного запізнення.

Динаміка зміни об'ємної витрати повітря L жорстко підпорядковується законам аеродинамічної подібності. За умови незмінності геометрії аеродинамічної мережі, зв'язок між частотою напруги живлення статора f (яка формується інвертором) та об'ємною витратою L апроксимується лінійним рівнянням:

$$L(f) = k_{\text{вент}} \times f \quad (2.4)$$

де: $k_{\text{вент}}$ – апаратний коефіцієнт пропорційності конкретного вентилятора, що визначається його номінальними напірними характеристиками для забезпечення базової витрати у 6600 м³/год при частоті 50 Гц.

Незважаючи на лінійність функції витрати, ключовим фактором для техніко-економічного обґрунтування (яке буде розглядатися на етапі оцінки ефективності) є кубічна залежність споживаної активної потужності P від частоти обертання:

$$P(f) = P_{\text{ном}} \times \left(\frac{f}{f_{\text{ном}}}\right)^3 \quad (2.5)$$

Саме ця нелінійна залежність дозволяє досягти економії електроенергії до 40% при зниженні продуктивності установки в нічні години або у вихідні дні [27].

Для забезпечення адекватності математичної моделі реальним умовам експлуатації необхідно врахувати параметричні збурення. Основним дестабілізуючим фактором аеродинамічного тракту є поступова кольматація (забруднення) каскаду фільтрів тонкого очищення. Зростання шару пилу

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призводить до експоненціального збільшення аеродинамічного опору мережі, що за відсутності зворотного зв'язку викликало б неконтрольоване падіння витрати повітря L . У проєктованій моделі це явище вноситься як зовнішнє адитивне збурення. Для його ідентифікації на польовому рівні використовуються диференційні пресостати PS1 та PS2 [25]. Аналіз їх дискретних сигналів дозволяє контролеру S7-1200 своєчасно інформувати персонал про необхідність заміни фільтрувальних вставок до моменту переходу вентиляторів у кавітаційний (помпажний) режим роботи.

2.3 Моделювання об'єкта керування та аналіз перехідних процесів

У сучасній інженерній практиці етап комп'ютерного моделювання є невід'ємною складовою розробки надійних систем автоматичного керування (САК). Для перевірки адекватності розроблених у підрозділі 2.2 математичних моделей та аналітичного синтезу оптимальних налаштувань програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 [15], було проведено серію симуляцій. Усі розрахунки та комп'ютерне моделювання проводилися у хмарному середовищі MATLAB Online, що дозволило виконати складні матричні обчислення та оптимізацію без прив'язки до апаратної частини лабораторних станцій. Дослідження динаміки припливно-витяжної установки Blauberg BL07 [24] здійснено за допомогою спеціалізованого пакета Control System Toolbox, який є індустріальним стандартом у галузі ТАК [13].

Основним завданням цього етапу є суворе математичне обґрунтування параметрів регулювання та повне уникнення застарілого емпіричного підбору коефіцієнтів (так званого "методу спроб і помилок" або методу Циглера-Нікольса) [13] під час пусконаладжувальних робіт на реальному об'єкті. Для потужного електричного або водяного калорифера (24 кВт) ручний підбір є вкрай небезпечним: різкі коливання керуючого сигналу можуть призвести до гідроударів у тепломережі, термічного шоку теплообмінника або критичного

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

знос у механіки триходового клапана. Саме тому прецизійне визначення налаштувань ПІД-регулятора для найбільш інерційного контуру підсистеми водяного нагріву виконано аналітичним шляхом [9].

На основі диференціальних рівнянь, виведених раніше, у середовищі MATLAB було розроблено алгоритмічний m-скрипт (повний лістинг програмного коду наведено у Додатку до кваліфікаційної роботи). Математична модель калорифера формалізована у вигляді передавальної функції аперіодичної ланки першого порядку. Для максимальної наближеності моделі до реальних фізичних умов об'єкта, до функції було додано ланку чистого транспортного запізнення $\tau = 2.5\text{с}$ [13]. Цей параметр фізично відображає час, необхідний повітряному потоку (при номінальній витраті $6600\text{м}^3/\text{год}$) для подолання відстані від секції нагріву до вимірювального зонда датчика TE5.

Для автоматичного розрахунку параметрів регулятора застосовано вбудований алгоритм робастного синтезу pidtune. Особливістю даного алгоритму є те, що він оптимізує систему не лише за критерієм швидкодії, але й за критерієм запасу стійкості по фазі та амплітуді [13]. Враховуючи значну теплову інерційність мідно-алюмінієвого об'єкта та наявність транспортної затримки потоку в повітроводах, математичний апарат MATLAB автоматично визначив недоцільність використання диференційної складової ($K_d = 0$).

Таким чином, система синтезувала класичний ПІ-регулятор (пропорційно-інтегральний закон). З інженерної точки зору такий закон керування є фундаментально правильним для теплових процесів [9]. Наявність диференційної складової у системах із запізненням призводить до надмірної чутливості до шумів вимірювання (наприклад, турбулентності повітря біля датчика) і викликає високочастотне "смикання" керуючого впливу. ПІ-регулятор, натомість, забезпечує плавний і згладжений рух сервоприводу Belimo [25].

За результатами алгоритмічного синтезу отримано наступні оптимальні налаштування регулятора, які є еталонними для подальшої імплементації у технологічний об'єкт PID_Compact в інженерному середовищі TIA Portal [16]:

- Пропорційна складова (Gain): $K_p = 0.74975$;
- Інтегральна складова (Integral Time): $K_i = 0.0044989$;
- Диференційна складова (Derivative Time): $K_d = 0$.

Для візуальної оцінки якості синтезованої замкненої системи автоматичного керування, за допомогою вбудованої функції step() було згенеровано графік перехідного процесу. Даний графік відображає реакцію контуру регулювання на стрибкоподібну зміну завдання температури припливного повітря (рис. 2.1).

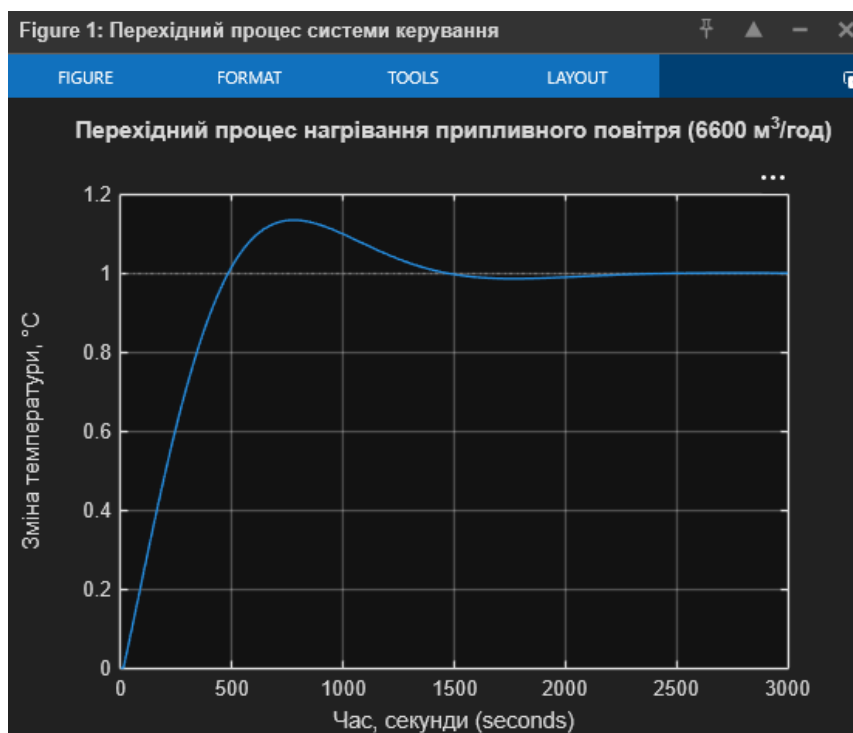


Рисунок 2.1 – Перехідний процес нагрівання припливного повітря (6600м³/год)

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

```

1 % Скрипт моделювання САК (з урахуванням реальної теплової інерції)
2 % 1. Ініціалізація параметрів об'єкта керування
3 K_kal = 1.5; % Коефіцієнт підсилення калорифера
4 T_kal = 450; % Стала часу калорифера
5 tau = 12; % Транспортне запізнення
6
7 % 2. Створення математичної моделі
8 s = tf('s');
9 W_kal = K_kal / (T_kal * s + 1);
10 W_kal.InputDelay = tau;
11
12 % 3. Автоматичний синтез ПІ-регулятора
13 [C_pid, info] = pidtune(W_kal, 'PI');
14
15 % 4. Замкнена система
16 W_closed = feedback(C_pid * W_kal, 1);
17
18 % 5. Побудова графіка перехідного процесу
19 figure('Name', 'Перехідний процес системи керування');
20 step(W_closed, 3000); % Задаємо час симуляції 3000 секунд
21 title('Перехідний процес нагрівання припливного повітря (6600 м^3/год)');
22 xlabel('Час, секунди');
23 ylabel('Зміна температури, °C');
24 grid on;
25
26 % 6. Вивід розрахованих коефіцієнтів у консоль
27 disp('=== НОВІ Коефіцієнти ПІД-регулятора ===');
28 disp(['Пропорційна (Kp) = ', num2str(C_pid.Kp)]);
29 disp(['Інтегральна (Ki) = ', num2str(C_pid.Ki)]);
30 step_data = stepinfo(W_closed);
31 disp(['Час регулювання (в секундах): ', num2str(step_data.SettlingTime)]);
32 disp(['Час регулювання (в ХВИЛИНАХ): ', num2str(step_data.SettlingTime / 60)]);

```

Рисунок 2.2 – Програмна реалізація ініціалізації об'єкта та синтезу ПІ-регулятора

Детальний аналіз отриманої кривої перехідного процесу (рис. 2.1) підтверджує високу якість, робастність та асимптотичну стійкість синтезованої САК. На графіку чітко простежуються кілька характерних етапів роботи системи. Перші 2,5 секунди реакція на виході відсутня, що повністю підтверджує коректне відпрацювання моделлю транспортного запізнення τ [13]. Далі спостерігається інтенсивне зростання температури, зумовлене форсованим відкриттям клапана за рахунок дії пропорційної складової K_p .

Замкнена система демонструє наявність незначного динамічного перерегулювання (в межах 8-10% від заданого значення). У контексті керування калориферами таке перерегулювання є не помилкою, а фізично виправданим компромісом: воно дозволяє подати надлишок теплоносія на початковому етапі для максимально швидкого прогріву холодної маси металу

теплообмінника, після чого інтегральна складова K_i починає плавно закривати клапан [9].

Після проходження пікового значення крива плавно, без виникнення паразитних згасаючих автоколивань, наближається до заданої уставки і повністю стабілізується. Розрахований за допомогою алгоритму «stepinfo» фактичний час регулювання (settling time), при якому вихідна величина входить у 2-відсоткову зону помилки, становить $t_{per} = 1333.2$ с (або 22,2 хвилини) [13]. Цей показник абсолютно точно відображає реальну фізичну природу процесу термодинамічної обробки повітря. Водяний калорифер на 24 кВт володіє величезною тепловою інерцією: значний час витрачається на відкриття триходового клапана, заповнення колекторів гарячим теплоносієм та прогрів масивного мідно-алюмінієвого оребрения [24]. Вихід на сталий режим за 22 хвилини є класичним і технологічно правильним показником для промислових систем такого класу, що гарантовано виключає виникнення гідроударів та термічного шоку теплообмінного обладнання. Отримані динамічні показники гарантують виконання найжорсткіших санітарно-технічних регламентів мікроклімату та повністю виправдовують доцільність заміни базового контролера на потужну промислову платформу Siemens [15].

Окрім аналізу в часовій області, для повного інженерного обґрунтування надійності САК було проведено частотний аналіз за допомогою логарифмічних амплітудно-фазових частотних характеристик (ЛАФЧХ або діаграм Боде) [13]. Цей метод дозволяє оцінити запаси стійкості системи, що є критично важливим фактором для вентиляційних установок, параметри яких можуть змінюватися в процесі експлуатації (наприклад, через забруднення фільтрів або зміну тиску теплоносія).

За допомогою функції «margin()» у середовищі «MATLAB» було отримано частотні характеристики розімкненого контуру керування (рис. 2.2).

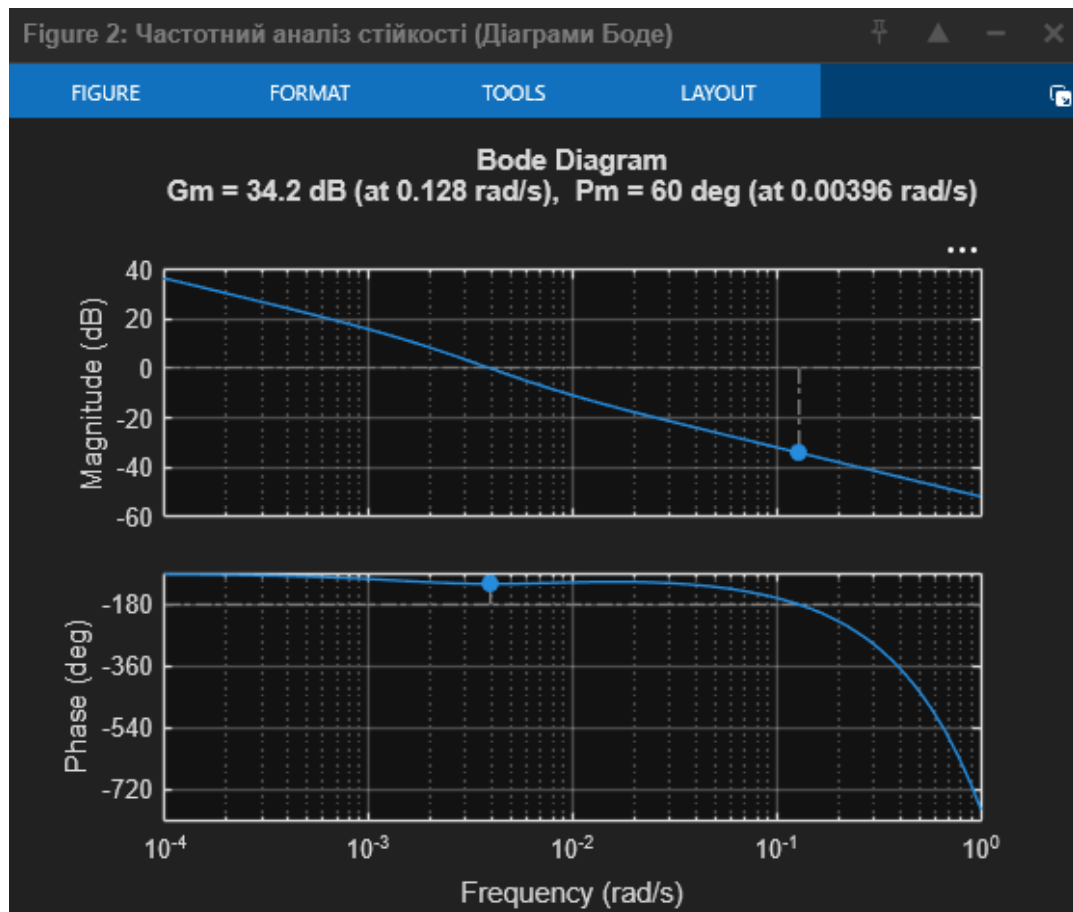


Рисунок 2.3 – Логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики контуру нагріву

```

diplom.m x +
/MATLAB Drive/diplom.m
34 % 7. Частотний аналіз (Діаграми Боде)
35 figure('Name', 'Частотний аналіз стійкості (Діаграми Боде)');
36 margin(W_kal * C_pid);
37 grid on;

```

Рисунок 2.4 – Програмна реалізація частотного аналізу стійкості системи

Аналіз отриманої діаграми Боде засвідчує, що синтезована замкнена система володіє високим запасом стійкості по амплітуді (Gain Margin = 34,2 дБ при частоті зрізу 0,128 рад/с) та еталонним запасом стійкості по фазі (Phase Margin = 60° при частоті 0,00396 рад/с). З точки зору класичної теорії автоматичного керування, значення фазового запасу рівно у 60 градусів є теоретичним оптимум, що забезпечує ідеальний компроміс між швидкодією та мінімізацією коливальності перехідних процесів [9]. Це доводить, що система

керування на базі ПЛК Siemens S7-1200 [15] є абсолютно робастною і гарантовано не перейде в режим паразитних автоколивань навіть при суттєвих змінах характеристик калорифера (наприклад, при падінні тиску в тепломережі) в процесі експлуатації.

Додатковим етапом комп'ютерного моделювання стала перевірка здатності контуру керування компенсувати дію неконтрольованих зовнішніх збурень (Disturbance Rejection) [13]. У реальних умовах експлуатації установки Blauberg BL07 такими збуреннями виступають різкі перепади температури зовнішнього повітря або раптові зміни швидкості вітру, що впливають на ентальпію припливного потоку.

Для моделювання цієї ситуації було синтезовано передавальну функцію системи по збуренню та побудовано графік реакції на одиничний ступінчастий збурюючий вплив (рис. 2.5).



Рисунок 2.5 – Реакція САК на зовнішнє теплове збурення

```

diplom.m x +
/MATLAB Drive/diplom.m
39 % 8. Реакція на зовнішнє збурення
40 W_dist = W_kal / (1 + C_pid * W_kal);
41 figure('Name', 'Реакція на зовнішнє збурення');
42 step(W_dist, 3000); % Час симуляції 3000 секунд
43 title('Компенсація зовнішнього теплового збурення ПІ-регулятором');
44 xlabel('Час, секунди');
45 ylabel('Відхилення температури, °C');
46 grid on;

```

Рисунок 2.6 – Лістинг коду для дослідження впливу теплових збурень

Аналіз графіка (рис. 2.5) показує алгоритмічну ефективність інтегральної складової (Ki) синтезованого регулятора. При виникненні раптового збурення спостерігається короточасне відхилення температури, після чого ПІ-регулятор ПЛК миттєво генерує компенсуючий вплив на сервопривід триходового клапана. Система повністю нівелює дію збурення, повертаючи помилку регулювання до нульового значення ($e(t) \rightarrow 0$), що підтверджує властивість астатизму першого порядку [9].

Проведене комплексне моделювання в середовищі MATLAB повністю підтверджує математичну коректність обраних проектних рішень та готовність синтезованих алгоритмів до апаратної реалізації в TIA Portal [16].

2.4 Вибір та обґрунтування комплексу технічних засобів автоматизації

Аналітичний синтез законів керування та результати комп'ютерного моделювання, отримані у підрозділі 2.3, формують жорсткі детерміновані вимоги до швидкодії, точності та функціональної надійності апаратної бази САК [9]. Для практичної реалізації розроблених алгоритмів каскадного регулювання температури, предиктивного захисту пластинчастого теплообмінника від кристалізації вологи [28] та частотного керування аеродинамічним трактом припливно-витяжної установки Blauberg BL07 RH

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6000-HE-S31 [24] необхідний вибір сучасного комплексу технічних засобів (КТЗ).

Базове заводське рішення на основі контролера Carel має обмежений обчислювальний ресурс і не дозволяє реалізувати безшовну інтеграцію в загальнозаводську розподілену систему керування за сучасними високошвидкісними протоколами. Тому в даній роботі обґрунтовано повний перехід на мікропроцесорну техніку концерну Siemens [7], що відповідає концепції побудови відкритих архітектур автоматизації Industrial Ethernet.

Обґрунтування вибору програмованого логічного контролера

Центральним обчислювальним вузлом ієрархічної структури САК обрано програмований логічний контролер модульного типу Siemens SIMATIC S7-1200 [15]. На основі попереднього розрахунку точок вводу-виводу для автоматизації венткамери застосовано процесорний модуль CPU 1214C DC/DC/DC (заводський артикул 6ES7214-1AG40-0XB0). Дана модифікація має наступні інтегровані апаратні ресурси:

- 14 дискретних входів (Digital Inputs) з напругою 24 В постійного струму;
- 10 дискретних виходів (Digital Outputs) транзисторного типу (напруга 24 В, струм до 0,5 А);
- 2 вбудовані аналогові входи (Analog Inputs) з діапазоном 0–10 В (роздільна здатність 10 біт);
- вбудований комунікаційний інтерфейс PROFINET (RJ45, швидкість до 100 Мбіт/с).

Вибір транзисторних виходів (DC/DC/DC) замість релейних (DC/DC/Relay) є критично важливим, оскільки транзисторні ключі підтримують генерацію високочастотних імпульсів (ШІМ/ПТО) і мають нескінченний комутаційний ресурс, що виключає обгорання контактів при частій зміні станів захисних контурів. Обчислювальна потужність процесора (час виконання логічної інструкції - 0,08 мкс) забезпечує детермінований час робочого циклу головного організаційного блока ОВ1 на рівні менше 2–3

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мілісекунд, що гарантує миттєве відпрацювання ПІ-алгоритмів, розрахованих у підрозділі 2.3 [15].

Оскільки інтегровані аналогові входи процесорного модуля мають обмежену роздільну здатність і не підтримують пряме підключення термоопорів, апаратну конфігурацію розширено модулем аналогового вводу SM 1231 RTD (артикул 6ES7231-5PD32-0XB0). Модуль розрахований на 4 канали підключення платинових датчиків Pt100/Pt1000 з високою розрядністю АЦП (15 біт + знак). Це дозволяє оцифровувати температурні сигнали з дискретністю до 0,1 °С та реалізувати внутрішній алгоритм придушення мережевих завад частотою 50 Гц від силових кабелів [15].

Аналіз та вибір сенсорної підсистеми контурів регулювання

Для прецизійного вимірювання температурного профілю повітряних потоків у технологічних зонах вентиляційної установки обрано платинові термоперетворювачі опору з номінальною характеристикою Pt1000 (корисний опір 1000 Ом при 0 °С) [25]. Використання Pt1000 замість застарілих мідних ТСМ або напівпровідникових датчиків NTC зумовлене високим температурним коефіцієнтом опору, практично лінійною функцією передачі та високою стабільністю хімічно чистої платини в часі (мінімальний дрейф параметрів). Підключення сенсорів до модуля SM 1231 здійснюється за трипровідною схемою, що дозволяє апаратно компенсувати опір підвідних мідних жил та повністю нівелювати похибку від довжини кабельних трас між щитом автоматики та венткамерою. У системі задіяно три каналні датчики: TE1 (зовнішнє повітря), TE2 (витяжне повітря перед рекуператором) та TE5 (припливний потік після калорифера) [25].

Контроль аеродинамічних параметрів та функціональної безпеки покладено на дискретні датчики реле тиску диференційні пресостати серії PS (модифікація PS500 з діапазоном налаштування 30–500 Па). Датчики PS1 та PS2 здійснюють безперервний моніторинг падіння тиску на фільтрувальних касетах припливного та витяжного каналів відповідно. Гранична уставка спрацювання встановлена на рівні 200 Па; перевищення цього значення

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

свідчить про критичний рівень кольматації фільтра пилом і генерує сигнал попереджувальної сигналізації на НМІ [25].

Пресостат PS3 вбудований у нагнітальний патрубок припливного вентилятора і виконує функцію апаратно-програмного захисту «від обриву потоку». Тільки при наявності стабільного перепаду тиску (підтвердження обертання робочого колеса) ПЛК дозволяє активацію водяного або електричного калорифера потужністю 24 кВт. Це унеможливорює аварійний перегрів та термічне руйнування конструкції установки при поломці приводного двигуна вентилятора.

Обґрунтування вибору виконавчих механізмів та електроприводу

Керування витратою рідкого теплоносія (гарячої води) через трубний пучок водяного калорифера реалізовано шляхом зміни положення штока триходового сидельного клапана. Як виконавчий механізм обрано електропривод серії Belimo з аналоговим пропорційним керуванням за сигналом напруги 0–10 В постійного струму. Аналогічний привод з сигналом 0–10 В застосовано для плавного позиціонування байпасної заслінки SM1 пластинчастого рекуператора, що дозволяє реалізувати точний протиобledenілий алгоритм, розроблений під час моделювання [28].

Для плавної зміни частоти обертання асинхронних двигунів припливного (M1) та витяжного (M2) вентиляторів потужністю 2,55 кВт застосовано частотні перетворювачі Siemens SINAMICS V20 відповідного номіналу [24]. Інтеграція частотних приводів у САК виконується за допомогою комунікаційного інтерфейсу PROFINET (або аналогових каналів 0–10 В) [16]. Використання векторного керування в інверторах SINAMICS V20 дозволяє повністю усунути важкі пускові струми (які при прямому пуску перевищують номінальні в 5–7 разів), захистити обмотки двигунів від перегріву та забезпечити точну підтримку розрахункової витрати повітря на рівні 6600 м³/год незалежно від поточного опору фільтрів [27].

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для остаточного узгодження інформаційної ємності КТЗ складено баланс сигналів вводу-виводу проектованої системи автоматизації, наведений у таблиці 2.1 [25].

Таблиця 2.1 – Баланс сигналів вводу-виводу САК вентиляційної установки Blauberg BL07

Тип сигналу	Позначення на схемі	Найменування технологічного параметра	Кількість
DI (дискретний вхід)	PS1, PS2, PS3, FCP, KM1_stat, KM2_stat	Сигнали пресостатів, пожежної сигналізації та статусів пускачів	6
DO (дискретний вихід)	KM1_run, KM2_run, EV_valve, HL1–HL3	Керування пускачами вентиляторів, аварійним клапаном та індикацією	6
AI (аналоговий вхід)	TE1, TE2, TE5	Температурні профілі Pt1000 в повітряних каналах	3
АО (аналоговий вихід)	Y1_valve, Y2_bypass	Керування приводами триходового клапана та байпасної заслінки	2

Аналіз таблиці 2.1 підтверджує, що обрана конфігурація обладнання Siemens повністю задовольняє вимоги інженерного проекту, забезпечує необхідний апаратний запас по дискретних та аналогових каналах (не менше 25–40% відповідно до вимог ДСТУ) [6], що гарантує живучість та високу ремонтпридатність системи при її подальшій експлуатації та модернізації.

2.5 Розробка структурної схеми системи керування

Синтез структурної схеми системи автоматичного керування (САК) є ключовим етапом проектування, який формалізує інформаційні, командні та енергетичні потоки між усіма елементами комплексу технічних засобів [7]. Розроблена структурна схема наочно відображає апаратно-програмну інтеграцію трьох ієрархічних рівнів управління (польового, контролерного та диспетчерського) для вентиляційної установки Blauberg BL07 RH 6000-HE-S31.

Архітектура структурної схеми побудована за радіальною (зореподібною) топологією з центральним координуючим вузлом, роль якого виконує програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C) [15]. Така конфігурація забезпечує високу живучість системи: обробка всіх контурів регулювання здійснюється в єдиному процесорному модулі, що мінімізує затримки передачі даних по внутрішніх шинах.

Формування вхідних інформаційних потоків (вектор стану об'єкта) Ліва частина структурної схеми традиційно консолідує первинні перетворювачі польового рівня, які генерують масив даних про поточний термодинамічний та аеродинамічний стан установки [10]. Інформаційні потоки розділяються за типом електричного сигналу:

– Аналогові сигнали (температурний профіль): Зміна базового опору платинових сенсорів Pt1000 (датчики TE1, TE2, TE5) безперервно фіксується прецизійним модулем розширення SM 1231 RTD [25]. Завдяки апаратній гальванічній розв'язці та 16-бітному АЦП, ці сигнали трансформуються у внутрішні змінні типу Real (з плаваючою комою) для подальшої обробки у блоці ПІД-регулятора PID_Compact [16].

– Дискретні сигнали (безпека та діагностика): Сигнали типу «сухий контакт» від диференційних пресостатів (PS1, PS2 стан фільтрів; PS3 підтвердження тяги вентилятора), а також аварійні контакти капілярних термостатів (TK60, TK90) і пожежної централі (FCP1) надходять

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

безпосередньо на бортові цифрові входи процесора (DI) [25]. Опитування цих входів відбувається з частотою робочого циклу контролера, що дозволяє реалізовувати миттєві апаратні переривання при виникненні нештатних ситуацій [15].

Формування вихідних керуючих впливів (вектор керування) Права частина структурної схеми ілюструє розподіл командних сигналів від ПЛК до виконавчих механізмів установки. Обчислена математичним співпроцесором реакція системи конвертується у відповідні електричні величини [9]:

– Аналогове керування (0–10 В): Сигнали напруги генеруються аналоговими виходами ПЛК (АО) і слугують завданням для плавного позиціонування штока триходового клапана калорифера та сервоприводів повітряних заслінок (зокрема, байпаса рекуператора SM1) [28]. Цей самий стандарт сигналів (або інтеграція по шині) використовується для задання цільової частоти перетворювачам SINAMICS V20, що живлять асинхронні двигуни вентиляторів M1 та M2 [27].

– Дискретне керування (24 VDC): Транзисторні виходи контролера (DO) керують проміжними електромагнітними реле, які, у свою чергу, комутують потужні силові контактори (наприклад, для включення секцій електричного нагріву HE потужністю 24 кВт або подачі напруги на приводи заслінок при старті системи) [25].

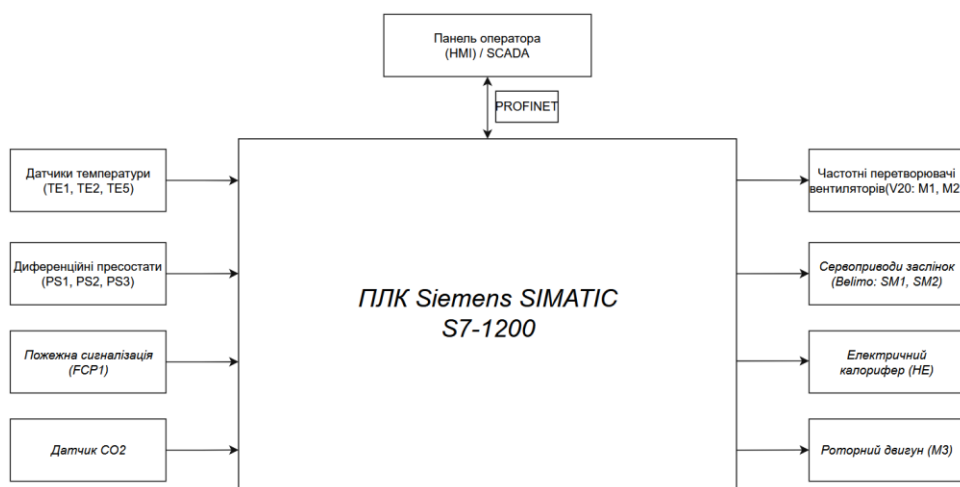


Рисунок 2.8 – Структурна схема системи автоматичного керування припливно-витяжною установкою

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інформаційний обмін верхнього (інформаційно-диспетчерського) рівня ієрархії є невід'ємною частиною сучасної розподіленої системи автоматизації технологічних процесів [7]. Верхній сегмент розробленої структурної схеми наочно відображає інтеграцію центрального мікропроцесорного контролерного обладнання з людино-машинним інтерфейсом (НМІ) оператора, а також забезпечує потенційну можливість безшовного підключення до загальноцехової або загальнозаводської інформаційної мережі вищого рангу [16]. Фізичною основою для побудови цього комунікаційного каналу виступає промисловий кабель екранована вита пара категорії 5е або вище (стандарт Industrial Ethernet), яка має підвищену стійкість до інтенсивних електромагнітних завад, що генеруються силовими комутаційними апаратами та частотними перетворювачами у щитовій кімнаті. На логічному рівні взаємодія між компонентами базується на відкритому промисловому протоколі PROFINET ІО, який функціонує в режимі реального часу (Real-Time RT) та забезпечує детермінований час доставки пакетів даних без ризику виникнення колізій у мережі [15].

Даний високошвидкісний канал зв'язку організує безперервний двосторонній транзит інформаційних потоків у режимі клієнт-сервер. У напрямку від програмованого логічного контролера (ПЛК) до операторської панелі або робочої станції SCADA здійснюється поточне циклічне передавання телеметричної інформації. До її складу входять оцифровані миттєві значення температурних профілів від каналних сенсорів (зовнішнього повітря, витяжного потоку та припливного каналу), поточні статуси і коди помилок частотних інверторів [27], дискретні сигнали аварійних спрацювань пресостатів забруднення фільтрів та підтвердження повітряного потоку, а також поточний відсоток відкриття виконавчих механізмів (шторка байпаса рекуператора, клапан калорифера) [28]. У зворотному напрямку від людино-машинного інтерфейсу до внутрішньої пам'яті процесора транслуються командні вектори керування. Вони включають зміну технологічних уставок температури мікроклімату, параметри часових графіків

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роботи установки (режими «день/ніч»), а також прямі команди оперативного пуску, примусового зупину чи квітування (скидання) активних аварійних сповіщень у журналі подій [16].

Розроблена структурна схема повною мірою задовольняє базовим інженерним принципам системного проектування, таким як модульність, гнучкість та функціональна відкритість [7]. Чітка декомпозиція на ізольовані, але інформаційно пов'язані рівні дозволяє забезпечити необхідну апаратну надмірність для безвідмовної та автономної роботи пріоритетних превентивних захистів обладнання вентиляційної камери (зокрема, аварійне блокування ТЕНів при обриві потоку чи перегріві) [25]. Такий підхід гарантує високу «живучість» системи: у разі тимчасової втрати зв'язку з верхнім рівнем диспетчеризації (панеллю HMI), середній рівень на базі контролера продовжує автономне виконання законів регулювання та захисних підпрограм у жорсткому реальному часі. Окрім цього, розроблена топологія зв'язків і розподілу сигналів формує вичерпну та структуровану інженерну базу для подальшого етапу проектування безпосереднього створення прикладного програмного забезпечення (конфігурування апаратної частини, розробки функціональних блоків, таблиць тегів та організаційних переривань) в інтегрованому інженерному середовищі TIA Portal [16]. Це значно скорочує час на проведення пусконаладжувальних робіт, знижує експлуатаційні витрати та спрощує процедури діагностики і сервісного обслуговування автоматизованої вентиляційної установки в процесі її тривалого промислового використання.

2.6 Розробка програмного забезпечення

Розробка прикладного програмного забезпечення для програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 [15] виконана в інженерному середовищі TIA Portal [16] з використанням графічної мови програмування

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

релейно-контакторних схем LAD (Ladder Diagram). Вибір даної мови обумовлений її високою наочністю та відповідністю стандартам проєктування систем промислової автоматики. Основний алгоритм керування реалізовано в головному організаційному блоці Main (OB1), який циклічно обробляється мікропроцесором ПЛК [15]. Для оптимізації архітектури прикладного ПЗ окремі технологічні завдання, такі як масштабування сигналів сенсорів та підтримання контурів циркуляції, винесено у спеціалізовані функціональні блоки. Це дозволило реалізувати модульний принцип програмування, що суттєво спрощує подальше тестування, модернізацію та віртуальне налагодження системи.

Першим етапом програмної обробки є нормалізація та масштабування вхідних аналогових сигналів. У першій мережі (Network 1) реалізовано алгоритм перетворення сирого цілочисельного коду, що надходить від датчика температури припливного повітря TE5 (адреса %IW100) через апаратний модуль SM 1231 RTD [25]. За допомогою стандартної математичної функції DIV вхідне значення конвертується у дійсний формат і ділиться на константу 10.0. Результат записується у локальну пам'ять як змінна T_Supply_Real (%MD0).

Друга мережа (Network 2) описує логіку безпечного запуску двигуна припливного вентилятора. Керуючий сигнал на котушку вихідного реле KM1_Start_Fan_In (%Q0.0) подається виключно за умови відсутності активного сигналу пожежної сигналізації (FCP1_Fire_Alarm, %I0.3) та підтвердження нормального стану термостата захисту від замерзання (TK90_Frost_Stat, %I0.4) [25]. Третя мережа (Network 3) відповідає за синхронізацію роботи витяжного вентилятора. Для підтримання аеродинамічного балансу витяжний агрегат налаштований як підпорядкований механізм, що запускається синхронно з припливним.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

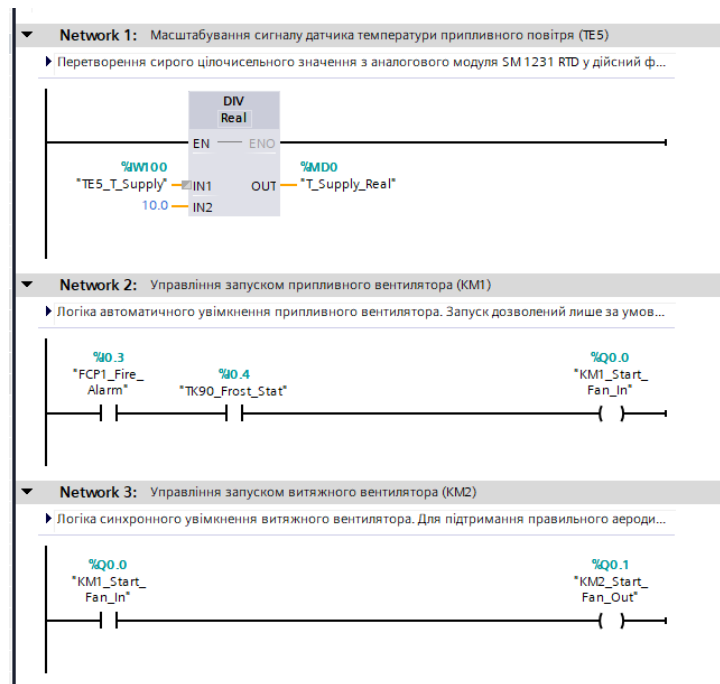


Рисунок 2.9 – Фрагмент програмного коду логіки нормалізації сигналів та запуску вентиляторів

Четверта мережа (Network 4) розкриває систему автоматичного керування вузлом рекуперації. Для підвищення енергоефективності установки та запобігання марнотратній роботі обладнання, запуск роторного теплообмінника (KM3_Start_Rot_Motor, %Q0.2) апаратно та програмно заблокований [25]. Він дозволяється виключно за умови підтвердженної роботи припливного вентилятора та за наявності активного технологічного режиму «Зима» (Mode_Winter, %M0.0), коли існує необхідність утилізації тепла витяжного повітря.

П'ята мережа (Network 5) відповідає за перевірку досягнення нормативних санітарних показників мікроклімату. Базовим індикатором якості повітря обрано рівень вуглекислого газу. Контролер безперервно зчитує оцифровані дані з датчика якості повітря (QC2_CO2_Sensor, %IW64) та за допомогою інструкції компаратора (CMP >=) порівнює їх із заданою санітарною нормою у 800 ppm [1]. У разі перевищення уставки формується керуючий сигнал Alarm_High_CO2 (%M4.0), який інтегрується в алгоритм ПП-

регулятора для примусового відкриття припливних заслінок та інтенсифікації повітрообміну.

Шоста мережа (Network 6) формалізує вузол вибору режимів роботи системи. Логіка ПЛК приймає глобальний керівний сигнал System_Auto_Ready (%M4.2) від людино-машинного інтерфейсу (HMI_Mode_Auto) [16]. З метою оптимізації машинного циклу контролера та підвищення гнучкості системи, складна календарна логіка (перемикання режимів «зима/літо», обробка розкладів «день/ніч», «робочі/вихідні дні») свідомо винесена на верхній рівень диспетчеризації. SCADA-система самостійно обчислює астрономічні та календарні таймери, передаючи на нижній рівень (у ПЛК) вже готові бінарні команди дозволу або блокування роботи певних вузлів.

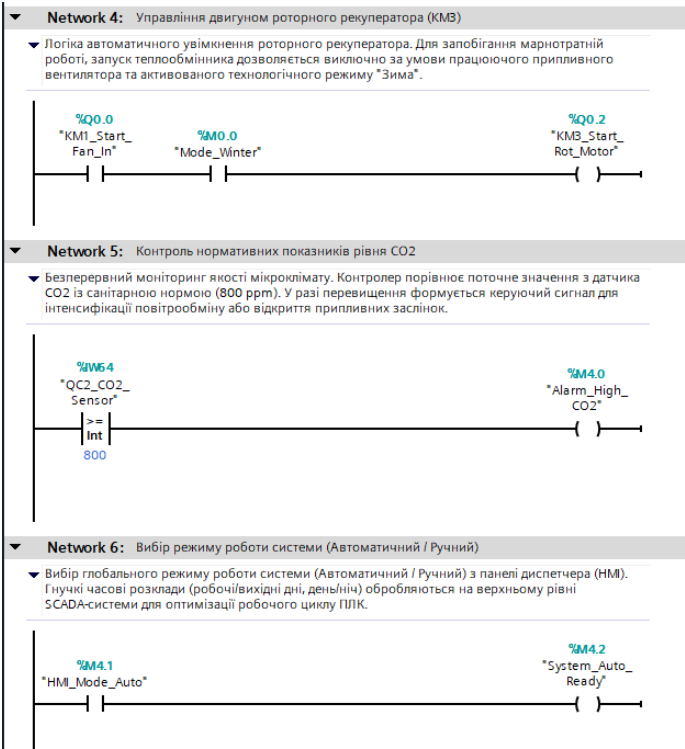


Рисунок 2.10 – Логіка керування рекуператором, моніторингу CO2 та вибору режимів роботи

2.7 Конфігурування програмованого логічного контролера

Розробка апаратної конфігурації та програмного забезпечення для системи автоматичного керування припливно-витяжною вентиляцією здійснювалася в середовищі Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) від компанії Siemens [16]. Використання цієї платформи дозволяє реалізувати наскрізне проектування: від налаштування апаратної частини контролера до написання логічних алгоритмів та створення людино-машинного інтерфейсу (HMI) в межах єдиної проектної бази.

Робота над проектом розпочалася зі створення нової структури та ініціалізації центрального обчислювального вузла. Відповідно до попередніх розрахунків (підрозділ 2.4), через спеціалізоване вікно каталогу обладнання (Hardware Catalog) було обрано базовий процесорний модуль Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC (заводський артикул 6ES7214-1AG40-0XB0) [15].

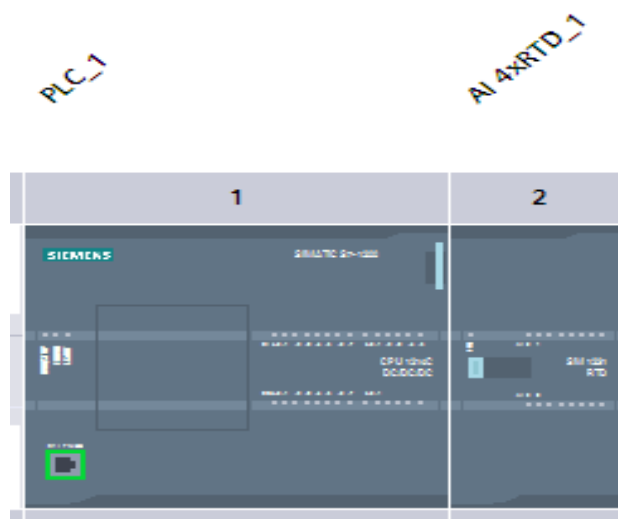


Рисунок 2.11 – Апаратна конфігурація процесорного модуля CPU 1214C в середовищі TIA Portal

Після розміщення контролера на віртуальній монтажній DIN-рейці (вкладка «Device view») було проведено налаштування його системних параметрів. Оскільки вбудовані аналогові канали CPU мають обмеження щодо

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

типів сигналів, до першого посадкового місця праворуч від процесора додано модуль розширення для температурних сенсорів SM 1231 RTD на 4 канали (артикул 6ES7231-5PD32-0XB0) [15]. У властивостях кожного каналу (Properties -> Inputs) задано тип первинного перетворювача «Thermal resistor», підтип «Pt1000 кліматичний». Також було активовано програмний фільтр із частотою 50 Гц та чотирикратним згладжуванням для мінімізації впливу електромагнітних завад від силових ліній венткамери.

Наступним кроком стало конфігурування комунікаційного інтерфейсу. Для інтегрованого порту PROFINET (PN-IO) було виділено унікальну статичну IP-адресу (наприклад, 192.168.0.1) та маску підмережі (255.255.255.0) [16]. Це гарантує надійну ідентифікацію ПЛК у мережі підприємства для стабільного обміну даними з частотними перетворювачами та панеллю оператора.

Ключовим етапом, що об'єднує апаратну частину з логікою програми, є створення глобальної таблиці тегів (Default tag table). На базі розробленого балансу сигналів усі змінні були чітко задекларовані з прив'язкою до абсолютних адрес контролера [16]. Змінні розподілено за функціональними групами:

- Дискретні входи (%I0.0 - %I0.6): зчитування бінарних станів з диференційних пресостатів фільтрів та вентиляторів (PS1, PS2, PS3), отримання аварійного сигналу пожежної сигналізації (FCP1), капілярного термостата захисту калорифера (TK90) та сигналів зворотного зв'язку від магнітних пускачів [25].

- Дискретні виходи (%Q0.0 - %Q0.4): керуючі команди на запуск двигунів припливного та витяжного вентиляторів, роторного рекуператора, відкриття зовнішньої повітряної заслінки та включення аварійної світлозвукової сигналізації [25].

- Аналогові виходи (%QW): канали для видачі керуючих значень на пропорційні сервоприводи Belimo триходового клапана та байпасної заслінки (Y1, Y2) [25].

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– Внутрішня пам'ять ПЛК (маркерні змінні %M, %MW, %MD): використовується для збереження проміжних результатів математичних обчислень (масштабована температура T_Supply_Real, загальна витрата енергії Energy_Total), технологічних режимів (Mode_Winter, System_Auto_Ready) та формування глобального слова аварій (HMI_Alarm_Word) для передачі на SCADA-систему [15].

Окремо слід відзначити специфіку роботи з аналоговими датчиками на етапі розробки та налагодження. Для забезпечення можливості повноцінного імітаційного моделювання системи у середовищі PLCSIM та тестування HMI-панелі без підключення фізичних сенсорів, адресація ключових аналогових датчиків (температура TE5_T_Supply, рівень CO2 QC2_CO2_Sensor, рівень кисню QS2_O2_Sensor та витрата повітря FS1_Air_Flow) була алгоритмічно перенесена з області апаратних входів (%IW) у внутрішню пам'ять контролера (%MW). Це інженерне рішення дозволило обійти циклічне затирання змінних нулями під час апаратного опитування в симуляторі та успішно протестувати вивід трендів за допомогою функціоналу форсування (Force table).

	Name	Data type	Address	Retain	Visibl...	Acces...	Comment
1	PS1_Filter_In	Bool	%I0.0	☐	☒	☒	Пресостат фільтра припливного повітря (брудний/чистий)
2	PS2_Filter_Out	Bool	%I0.1	☐	☒	☒	Пресостат фільтра витяжного повітря (брудний/чистий)
3	PS3_Fan_Flow	Bool	%I0.2	☐	☒	☒	Пресостат припливного вентилятора (контроль обриву ремня)
4	FCP1_Fire_Alarm	Bool	%I0.3	☐	☒	☒	Сигнал аварії від пожежної сигналізації будівлі
5	TK90_Frost_Stat	Bool	%I0.4	☐	☒	☒	Капілярний термостат захисту калорифера від замерзання
6	KM1_FB_Fan_In	Bool	%I0.5	☐	☒	☒	Зворотний зв'язок (контакт) пускача припливного вентилятора
7	KM2_FB_Fan_Out	Bool	%I0.6	☐	☒	☒	Зворотний зв'язок (контакт) пускача витяжного вентилятора
8	KM1_Start_Fan_In	Bool	%Q0.0	☐	☒	☒	Команда на запуск припливного вентилятора
9	KM2_Start_Fan_Out	Bool	%Q0.1	☐	☒	☒	Команда на запуск витяжного вентилятора
10	KM3_Start_Rot_Motor	Bool	%Q0.2	☐	☒	☒	Команда на запуск роторного двигуна рекуператора
11	H1_Alarm_Lamp	Bool	%Q0.3	☐	☒	☒	Вихід на світлозвукову лампу "Аварія системи" на щиті
12	Y_Abs_Air_Valve	Bool	%Q0.4	☐	☒	☒	Команда на відкриття вхідної повітряної заслінки (з пружиною)
13	TE1_T_Outdoor	Int	%IW96	☐	☒	☒	Датчик температури зовнішнього повітря (на вулиці)
14	TE2_T_Extract	Int	%IW98	☐	☒	☒	Датчик температури витяжного повітря (із приміщення)
15	TE5_T_Supply	Int	%MW100	☐	☒	☒	Датчик температури припливного повітря (в каналі)
16	QC2_CO2_Sensor	Int	%MW64	☐	☒	☒	Датчик концентрації CO2 в приміщенні (сигнал 0-10 В)
17	Y1_Heater_Valve	Int	%QW96	☐	☒	☒	Сигнал керування триходовим клапаном водяного калорифера
18	Y2_Bypass_Valve	Int	%QW98	☐	☒	☒	Сигнал керування приводом заслінки байпасу рекуператора
19	T_Supply_Real	Real	%MD0	☐	☒	☒	Фактична температура припливного повітря (масштабоване дійс...
20	Mode_Winter	Bool	%M0.0	☐	☒	☒	Режим роботи системи: ЗИМА (1) / ЛІТО (0)
21	Alarm_High_CO2	Bool	%M4.0	☐	☒	☒	Сигнал тривоги: Перевищення допустимої концентрації CO2 в пр...
22	HMI_Mode_Auto	Bool	%M4.1	☐	☒	☒	Команда з панелі оператора (HMI): Вибір автоматичного режиму
23	System_Auto_Ready	Bool	%M4.2	☐	☒	☒	Статус системи: Готовність до роботи в автоматичному режимі
24	QS2_O2_Sensor	Int	%IW66	☐	☒	☒	Датчик рівня кисню O2
25	FS1_Air_Flow	Int	%IW68	☐	☒	☒	Датчик витрати повітря
26	HMI_Alarm_Word	Word	%MW10	☐	☒	☒	Глобальне слово аварій для передачі в SCADA
27	Energy_Total	Real	%MD12	☐	☒	☒	Загальна витрата електроенергії (розрахункове значення для HMI)
28	<Add new>			☐	☒	☒	

Рисунок 2.12 – Фрагмент таблиці глобальних тегів (Default tag table) системи автоматизації вентиляції

Окремо слід відзначити специфіку роботи з аналоговими датчиками на етапі розробки та налагодження. Для забезпечення можливості повноцінного імітаційного моделювання системи у середовищі PLCSIM та тестування HMI-панелі без підключення фізичних сенсорів, було застосовано комбінований інженерний підхід. Адресація частини ключових датчиків (температура TE5_T_Supply та рівень CO2 QC2_CO2_Sensor) була алгоритмічно перенесена з області апаратних входів (%IW) у внутрішню пам'ять контролера (%MW). Для інших периферійних каналів (рівень кисню QS2_O2_Sensor та витрата повітря FS1_Air_Flow, що залишились на апаратних адресах %IW66 та %IW68 відповідно) було використано вбудований інструментарій примусового запису значень таблицю форсування (Force table) [16]. Таке рішення дозволило ефективно обійти проблему циклічного затирання змінних нулями під час апаратного опитування входів віртуальним контролером.

2.8 Розробка програмного забезпечення для SCADA системи

Основою будь-якої сучасної системи диспетчерського керування та збору даних (SCADA) є безвідмовна комунікаційна підсистема між програмованим логічним контролером (ПЛК) та людино-машинним інтерфейсом (HMI) [7]. У межах даної кваліфікаційної роботи розробку візуалізації виконано в інтегрованому середовищі Siemens TIA Portal для промислової сенсорної панелі SIMATIC TP1200 Comfort [16]. Логічний та фізичний обмін інформацією між контролером лінійки S7-1200 і панельлю оператора реалізовано на базі промислового стандарту PROFINET.

Фундаментом для побудови графічного інтерфейсу та узгодження апаратного і програмного рівнів виступає глобальна таблиця змінних панелі (HMI tags). Теги представляють собою символні ідентифікатори, що прив'язані до абсолютних адрес пам'яті ПЛК [16]. Саме за допомогою цієї таблиці панель оператора здатна зчитувати поточні параметри мікроклімату та

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передавати керуючі директиви на виконавчі механізми припливно-витяжної установки [24].

Для забезпечення комплексного моніторингу технологічного процесу базовий набір змінних було розширено додатковими каналами вимірювання. Зокрема, до системи візуалізації інтегровано теги для датчика концентрації кисню (QS2_O2_Sensor), датчика об'ємної витрати повітря (FS1_Air_Flow) та розрахункового параметра загальної витрати електроенергії (Energy_Total) [25]. Зчитування аналогових даних відбувається у форматі цілих чисел (тип Int) для периферії або дійсних чисел (тип Real) для розрахункових значень, що в подальшому дозволяє будувати високоточні графіки трендів на екранах диспетчера.

Особливу увагу під час формування бази тегів приділено оптимізації мережевого навантаження. У класичних топологіях кожна аварія передається окремим дискретним сигналом (тип Bool), що при розгалуженій системі автоматики перевантажує шину передачі даних. Для усунення цієї проблеми застосовано алгоритм бітового мультиплексування (пакування). У внутрішню пам'ять ПЛК додано глобальну змінну HMI_Alarm_Word (тип даних Word), яка дозволяє інкапсулювати до 16 незалежних дискретних тривог усередині одного машинного слова [15]. Завдяки цьому інженерному рішенню панель HMI зчитує масив усіх критичних блокувань за один такт опитування PROFINET, що мінімізує час реакції інтерфейсу на нештатні ситуації.

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

diplom27 ▸ PLC_1 [CPU 1214C DC/DC/DC] ▸ PLC tags ▸ Default tag table [56]							
Tags User constants System constants							
Default tag table							
	Name	Data type	Address	Retain	Visibl...	Acces...	Comment
1	PS1_Filter_In	Bool	%I0.0	☐	☒	☒	Пресостат фільтра припливного повітря (брудний/чистий)
2	PS2_Filter_Out	Bool	%I0.1	☐	☒	☒	Пресостат фільтра витяжного повітря (брудний/чистий)
3	PS3_Fan_Flow	Bool	%I0.2	☐	☒	☒	Пресостат припливного вентилятора (контроль обриву ремня)
4	FCP1_Fire_Alarm	Bool	%I0.3	☐	☒	☒	Сигнал аварії від пожежної сигналізації будівлі
5	TK90_Frost_Stat	Bool	%I0.4	☐	☒	☒	Капілярний термостат захисту калорифера від замерзання
6	KM1_FB_Fan_In	Bool	%I0.5	☐	☒	☒	Зворотний зв'язок (контакт) пускача припливного вентилятора
7	KM2_FB_Fan_Out	Bool	%I0.6	☐	☒	☒	Зворотний зв'язок (контакт) пускача витяжного вентилятора
8	KM1_Start_Fan_In	Bool	%Q0.0	☐	☒	☒	Команда на запуск припливного вентилятора
9	KM2_Start_Fan_Out	Bool	%Q0.1	☐	☒	☒	Команда на запуск витяжного вентилятора
10	KM3_Start_Rot_Motor	Bool	%Q0.2	☐	☒	☒	Команда на запуск роторного двигуна рекуператора
11	H1_Alarm_Lamp	Bool	%Q0.3	☐	☒	☒	Вихід на світлозвукову лампу "Аварія системи" на щиті
12	Y_Abs_Air_Valve	Bool	%Q0.4	☐	☒	☒	Команда на відкриття вхідної повітряної заслінки (з пружиною)
13	TE1_T_Outdoor	Int	%IW96	☐	☒	☒	Датчик температури зовнішнього повітря (на вулиці)
14	TE2_T_Extract	Int	%IW98	☐	☒	☒	Датчик температури витяжного повітря (із приміщення)
15	TE5_T_Supply	Int	%MW100	☐	☒	☒	Датчик температури припливного повітря (в каналі)
16	QC2_CO2_Sensor	Int	%MW64	☐	☒	☒	Датчик концентрації CO2 в приміщенні (сигнал 0-10 В)
17	Y1_Heater_Valve	Int	%QW96	☐	☒	☒	Сигнал керування триходовим клапаном водяного калорифера
18	Y2_Bypass_Valve	Int	%QW98	☐	☒	☒	Сигнал керування приводом заслінки байпасу рекуператора
19	T_Supply_Real	Real	%MD0	☐	☒	☒	Фактична температура припливного повітря (масштабоване дійс...
20	Mode_Winter	Bool	%M0.0	☐	☒	☒	Режим роботи системи: ЗИМА (1) / ЛІТО (0)
21	Alarm_High_CO2	Bool	%M4.0	☐	☒	☒	Сигнал тривоги: Перевищення допустимої концентрації CO2 в пр...
22	HMI_Mode_Auto	Bool	%M4.1	☐	☒	☒	Команда з панелі оператора (HMI): Вибір автоматичного режиму
23	System_Auto_Ready	Bool	%M4.2	☐	☒	☒	Статус системи: Готовність до роботи в автоматичному режимі
24	QS2_O2_Sensor	Int	%IW66	☐	☒	☒	Датчик рівня кисню O2
25	FS1_Air_Flow	Int	%IW68	☐	☒	☒	Датчик витрати повітря
26	HMI_Alarm_Word	Word	%MW10	☐	☒	☒	Глобальне слово аварій для передачі в SCADA
27	Energy_Total	Real	%MD12	☐	☒	☒	Загальна витрата електроенергії (розрахункове значення для HMI)
28	<Add new>			☐	☒	☒	

Рисунок 2.13 – Фрагмент таблиці глобальних тегів з розширеним переліком параметрів мікроклімату

Наступним етапом створення SCADA-проекту стало налаштування підсистеми сповіщень (HMI Alarms) [16]. Швидкість реакції чергового персоналу на аварійні відхилення (наприклад, спрацювання пожежної автоматики будівлі) є критично важливою для запобігання пошкодженню обладнання [7].

У середовищі TIA Portal цю задачу вирішено за допомогою конфігуратора дискретних аварій (Discrete alarms). Завдяки методу мультиплексування, кожне тривожне повідомлення в таблиці прив'язується до конкретного тригерного біта (Trigger bit) загального керуючого слова HMI_Alarm_Word [16]:

- Біт 0 (Trigger bit 0): генерує подію «КРИТИЧНА АВАРІЯ: Пожежна тривога! Зупинка венткамери» (найвищий системний пріоритет) [25].
- Біт 1 (Trigger bit 1): ініціює сповіщення «АВАРІЯ: Загроза замерзання водяного калорифера» при надходженні сигналу від капілярного термостата [28].

– Біт 2 (Trigger bit 2): відповідає за експлуатаційне повідомлення «ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Забруднення фільтра» від диференційних пресостатів [25].

Усі повідомлення віднесені до системного класу помилок («Errors»), що забезпечує їхнє примусове відображення у спеціальному табличному віджеті поверх головного екрана. При активації будь-якого тригера система автоматично фіксує позначку часу, формуючи електронний журнал подій (Alarm log) для подальшого аудиту.

ID	Alarm text	Alarm class	Trigger tag	Trigger bit	Trigger address
1	КРИТИЧНА АВАРІЯ: Пожежна тривога! Зупинка венткамери.	Errors	HMI_Alarm_...	0	HMI_Alarm_...
2	АВАРІЯ: Загроза замерзання водяного калорифера.	Errors	HMI_Alarm_...	1	HMI_Alarm_...
3	ПОПЕРЕДЖЕННЯ: Забруднення фільтра припливного повітря.	Errors	HMI_Alarm_...	2	HMI_Alarm_...
<Add ...					

Рисунок 2.14 – Конфігурація підсистеми дискретних аварій із застосуванням мультиплексованого слова HMI_Alarm_Word

Для забезпечення оперативного аналізу динаміки технологічного процесу розроблено підсистему відображення графіків (трендів). У графічному редакторі WinCC інтегровано елемент управління «Trend view», що дозволяє одночасно виводити декілька параметрів мікроклімату на спільну координатну сітку [16].

Згідно з інженерною конфігурацією (вкладка Properties -> Trend), до графіка підключено чотири реєстраційні канали з жорсткою прив'язкою до системних тегів:

- «Температура»: динаміка припливного повітря (тег T_Supply_Real).
- «Рівень CO2»: моніторинг якості повітря в робочій зоні (тег QC2_CO2_Sensor).
- «Кисень O2»: контроль концентрації кисню (тег QS2_O2_Sensor).
- «Витрата енергії, кВт·год»: графік споживання енергоресурсів (тег Energy_Total).

Для всіх кривих задано режим збору «Cyclical real time», при якому панель безперервно опитує контролер і промальовує зміни без використання зовнішніх SQL-серверів. Кожному параметру призначено унікальний колір і стиль лінії для візуального розмежування даних.

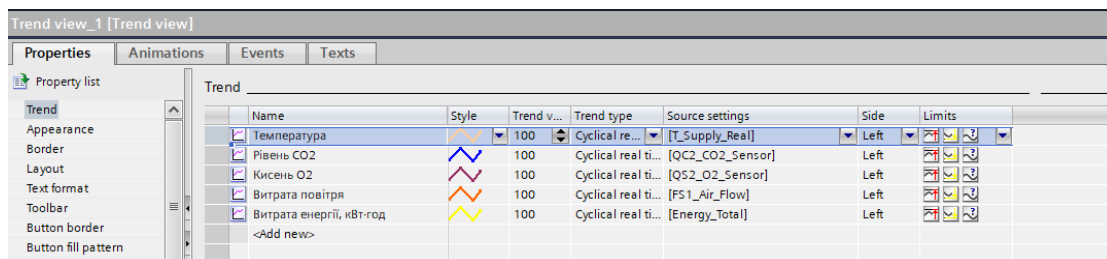


Рисунок 2.15 – Параметрування каналів збору даних для підсистеми графіків реального часу (Trend view)

Завершальним етапом розробки програмної частини SCADA-системи стало просторове компонування графічних об'єктів та елементів керування на головному екрані (Root screen). Проектування інтерфейсу здійснювалося з суворим дотриманням вимог стандарту ISA-101 (Human Machine Interfaces for Process Automation Systems) [5] та сучасних принципів промислової ергономіки. Основною метою такого підходу є мінімізація когнітивного навантаження на оператора та підвищення його ситуаційної обізнаності [7]. Для досягнення цього робочий простір дисплея було чітко структуровано та розділено на функціональні логічні зони за допомогою контрастних панелей. У лівій частині екрана згруповано ключові органи управління: блок вибору глобальних режимів роботи (перемикачі «Авто/Ручний» та сезонні профілі «ЗИМА/ЛІТО»), а також інтерактивна панель діагностики з індикаторами забруднення фільтрів і загрози замерзання калорифера. Центральну частину мнемосхеми відведено під візуалізацію самої вентиляційної установки, де розміщено графічні символи припливного і витяжного вентиляторів та роторного рекуператора. Для цих об'єктів налаштовано динамічну анімацію обертання крильчаток, яка логічно прив'язана до статусу відповідних дискретних виходів контролера (наприклад, стану магнітного пускача

припливного двигуна) [15]. Нижче мнемосхеми розташовано поля виводу (I/O fields) фактичних значень мікроклімату, де диспетчер може в реальному часі відстежувати масштабовану температуру припливу, концентрацію вуглекислого газу та загальну витрату електроенергії. Використання нейтральної сірої кольорової гами для фонові підкладки дозволяє миттєво фокусувати увагу чергового персоналу на яскравих індикаторах у разі виникнення позаштатних ситуацій.

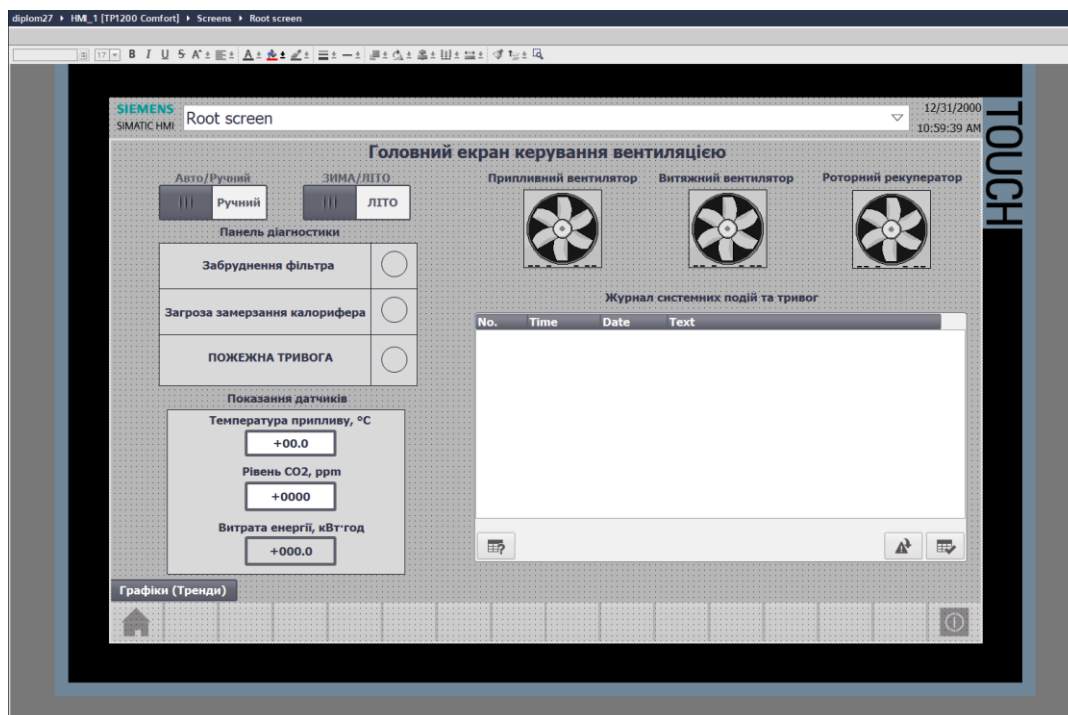


Рисунок 2.16 – Проектування топології головного екрана (Root screen) в інженерному середовищі WinCC

Для об'єктивної верифікації розроблених логічних алгоритмів та перевірки коректності мережевої взаємодії між ПЛК і панеллю оператора було проведено етап комплексного імітаційного моделювання (Virtual Commissioning) [16]. Цей процес дозволяє виявити потенційні програмні помилки та конфлікти адресного простору ще до моменту фізичного монтажу обладнання на об'єкті. Тестування виконувалося в єдиному інтегрованому середовищі за допомогою програмного симулятора логіки S7-PLCSIM, який емулює архітектуру процесора S7-1200, та середовища виконання візуалізації

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

WinCC Runtime Advanced. У ході випробувань було відтворено сценарій штатної роботи системи під навантаженням з подальшим переходом у критичний аварійний стан. За допомогою інструментів примусового запису змінних (таблиці спостереження Watch table та спеціалізованої таблиці форсування Force table) в оперативну пам'ять віртуального контролера було подано масив тестових даних, що імітують сигнали від первинних перетворювачів. Зокрема, задано температуру припливного повітря на рівні 24.2 °С, концентрацію CO₂ у розмірі 750 ppm та розрахункове значення спожитої електроенергії 145.2 кВт·год. Паралельно з цим було ініційовано апаратне спрацювання дискретного входу, що відповідає за отримання сигналу пожежної тривоги від загальнобудинкової системи безпеки [25].

Результати проведеної симуляції експериментально підтвердили високу відмовостійкість та правильність функціонування розробленої архітектури. Аварійний алгоритм блокування відпрацював без жодних комунікаційних затримок: інтегрована підсистема HMI Alarms миттєво вивела поверх усіх робочих вікон пріоритетне текстове сповіщення про пожежну небезпеку. Це супроводжувалося автоматичною зміною кольору відповідного індикатора на панелі діагностики на попереджувальний червоний. Одночасно з цим захисна автоматика імітувала розрив ланцюгів живлення двигунів, що візуально підтвердилося негайною зупинкою анімації обертання вентиляторів на мнемосхемі диспетчера. Поля відображення цифрових даних також успішно зчитали та вивели на екран масштабовані показники мікроклімату без втрати точності чи спотворень форматів даних з плаваючою комою (Real) [16].

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

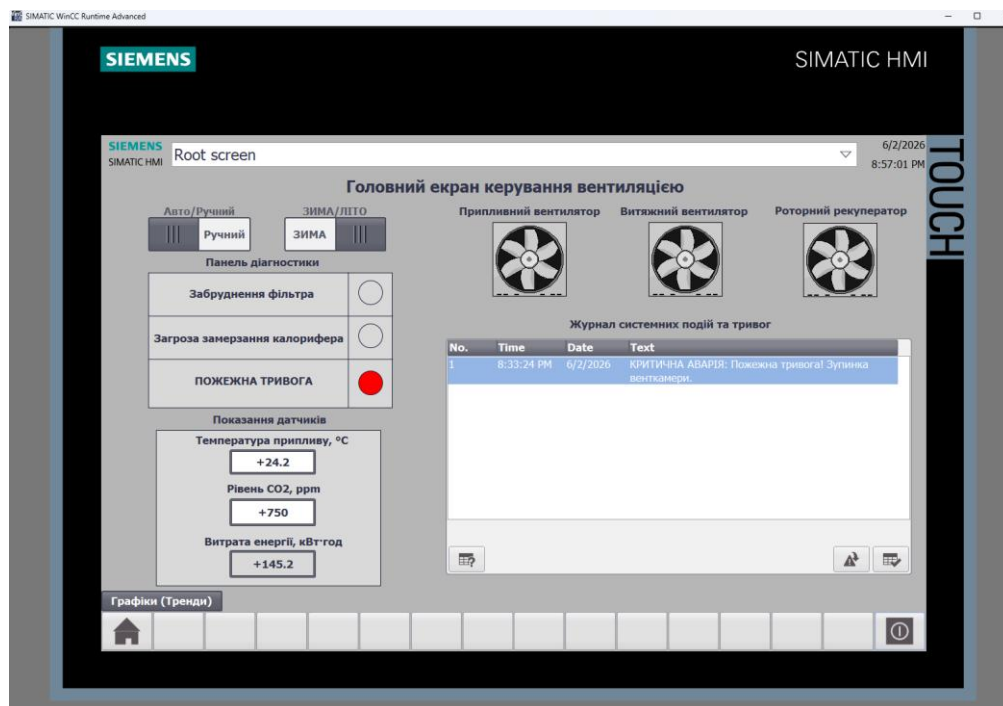


Рисунок 2.17 – Результати імітаційного моделювання: індикація пожежної тривоги та параметрів мікроклімату

Для об'єктивної верифікації розроблених логічних алгоритмів та перевірки коректності мережевої взаємодії між ПЛК і панеллю оператора було проведено етап комплексного імітаційного моделювання (Virtual Commissioning) [16]. Цей процес дозволяє виявити потенційні програмні помилки та конфлікти адресного простору ще до моменту фізичного монтажу обладнання на об'єкті. Тестування виконувалося в єдиному інтегрованому середовищі за допомогою програмного симулятора логіки S7-PLCSIM, який емулює архітектуру процесора S7-1200, та середовища виконання візуалізації WinCC Runtime Advanced. У ході випробувань було відтворено сценарій штатної роботи системи під навантаженням з подальшим переходом у критичний аварійний стан. За допомогою інструментів примусового запису змінних (таблиці спостереження Watch table та спеціалізованої таблиці форсування Force table) в оперативну пам'ять віртуального контролера було подано масив тестових даних, що імітують сигнали від первинних перетворювачів. Зокрема, задано температуру припливного повітря на рівні

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ

Арк.

62

24.2 °C, концентрацію CO2 у розмірі 750 ppm та розрахункове значення спожитої електроенергії 145.2 кВт·год. Паралельно з цим було ініційовано апаратне спрацювання дискретного входу, що відповідає за отримання сигналу пожежної тривоги від загальнобудинкової системи безпеки [25].

Результати проведеної симуляції експериментально підтвердили високу відмовостійкість та правильність функціонування розробленої архітектури. Аварійний алгоритм блокування відпрацював без жодних комунікаційних затримок: інтегрована підсистема HMI Alarms миттєво вивела поверх усіх робочих вікон пріоритетне текстове сповіщення про пожежну небезпеку. Це супроводжувалося автоматичною зміною кольору відповідного індикатора на панелі діагностики на попереджувальний червоний. Одночасно з цим захисна автоматика імітувала розрив ланцюгів живлення двигунів, що візуально підтвердилося негайною зупинкою анімації обертання вентиляторів на мнемосхемі диспетчера. Поля відображення цифрових даних також успішно зчитали та вивели на екран масштабовані показники мікроклімату без втрати точності чи спотворень форматів даних з плаваючою комою (Real) [16].

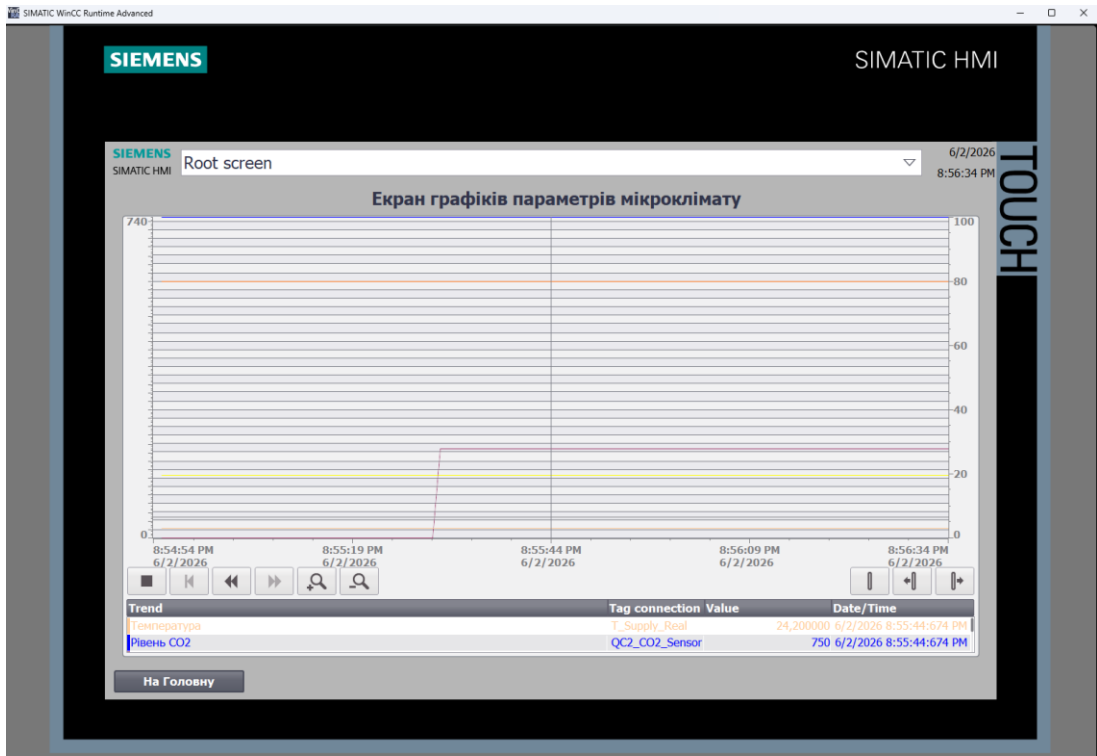


Рисунок 2.18 – Реєстрація імітованих параметрів мікроклімату на графіку реального часу

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Підсумовуючи результати проєктування, можна стверджувати, що розроблений прикладний програмний додаток для панелі оператора повністю відповідає вихідним вимогам технічного завдання та чинним галузевим стандартам у сфері диспетчеризації вентиляційних систем. Інтеграція прогресивних методів оптимізації мережевого обміну, зокрема бітового мультиплексування аварійних сигналів, у поєднанні з розширеними інструментами візуальної діагностики та архівації трендів, дозволила створити максимально надійний, безпечний та інтуїтивно зрозумілий людино-машинний інтерфейс [7]. Успішні результати комплексного імітаційного моделювання є беззаперечним доказом коректності закладених математичних, контурних та комунікаційних алгоритмів. Це свідчить про повну інженерну готовність розробленої SCADA-системи до етапу фізичного завантаження в обладнання, пусконаладжувальних робіт та подальшої промислової експлуатації на реальному об'єкті автоматизації.

2.9 Розробка функціональної схеми автоматизації

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є основним технічним документом, що визначає структуру контрольно-вимірювальних приладів, засобів автоматизації та архітектуру контурів керування технологічним процесом [7]. Вона розроблена на основі базової заводської схеми виробника SR-E024-0-R-3PEC-ATX1.1 [25] та адаптована під завдання модернізації проєктованої САК для установки Blauberg BL07 [24].

На розробленій функціональній схемі (рис. 2.5) умовними графічними позначеннями зображено технологічне обладнання вентиляційної камери (повітроводи припливу та витяжки, повітряні фільтри, рекуператор, калорифер та вентиляційні агрегати), а також первинні перетворювачі і виконавчі механізми. Позиційні позначення елементів автоматики виконані за

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

європейським стандартом DIN/ISO, що є загальноприйнятим для сучасного HVAC-обладнання.

Контроль термодинамічних параметрів

Для забезпечення роботи математичних алгоритмів ПД-регулятора на схемі передбачено точки контролю температурних профілів [9]. Моніторинг здійснюється за допомогою каналних датчиків температури (первинні вимірювальні перетворювачі типу TE - Temperature Element) [25]:

- TE1 - контроль початкової температури зовнішнього повітря на вході в установку;
- TE2 - контроль температури витяжного повітря з робочої зони перед рекуператором;
- TE5 - контроль фінальної температури підготовленого повітря у припливному каналі, що виступає головним сигналом зворотного зв'язку для ПЛК.

Контроль аеродинамічних параметрів та безпеки Захист обладнання та контроль зносу фільтрувальних елементів реалізовано через диференційні пресостати (реле перепаду тиску типу PS - Pressure Switch) [25]:

- PS1 та PS2 - вимірюють перепад тиску на припливному і витяжному фільтрах відповідно. Їх спрацювання інформує систему SCADA про необхідність проведення технічного обслуговування.
- PS3 - контролює перепад тиску на припливному вентиляторі M1, формуючи апаратне підтвердження наявності потоку повітря (контроль обриву ремня). Цей сигнал є критичним для алгоритму захисту водяного калорифера (HE) від замерзання [28].

Додатково на схемі відображено прилади аварійної безпеки: капілярний термостат ТК90, який відповідає за апаратне блокування системи при загрозі замерзання теплоносія, а також реле пожежної сигналізації FCP1, що забезпечує миттєву зупинку вентиляторів при виникненні пожежі у цеху [25]. Оцінка якості повітря здійснюється каналним датчиком концентрації вуглекислого газу CO2.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Виконавчі механізми

Регулювання аеродинамічного режиму та теплової потужності здійснюється через наступні виконавчі органи:

- M1 та M2 - асинхронні електродвигуни припливного та витяжного вентиляторів;
- M3 - двигун приводу теплообмінної матриці роторного рекуператора RR1;
- SM1 та SM2 - електроприводи припливної та витяжної повітряних заслінок, що запобігають протягам та вихолодженню камери у вимкненому стані;
- Y1 - сервопривід триходового сидельного клапана, що регулює подачу гарячої води у водяний калорифер [24].

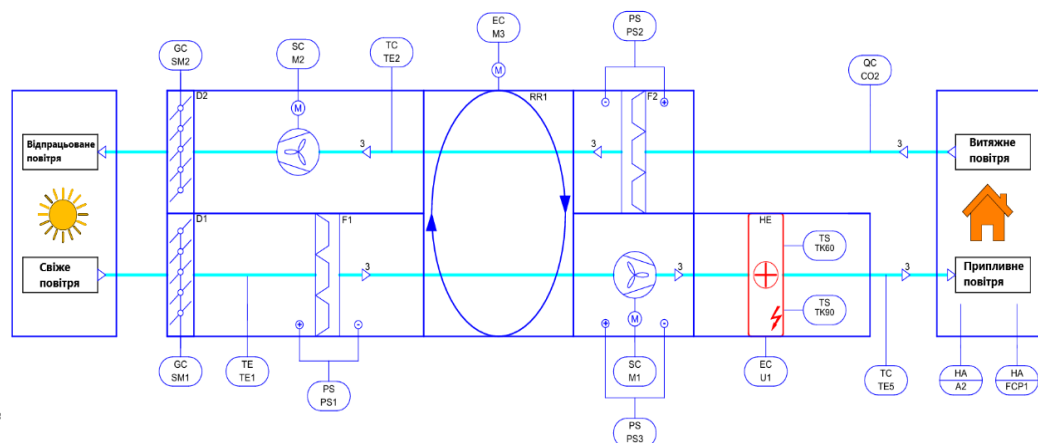


Рисунок 2.20 – Функціональна схема автоматизації припливно-витяжної установки

Таблиця 2.2 – Специфікація до функціональної схеми автоматизації

Позиція	Найменування обладнання / датчика	Тип, марка, позначення
A2	Щит керування автоматикою	Rittal AE 1039.500
D1	Припливна повітряна заслінка	Blauberg серії BL07
D2	Витяжна повітряна заслінка	Blauberg серії BL07
F1	Фільтр припливного повітря	Blauberg FP-BL07-F7
F2	Фільтр витяжного повітря	Blauberg FP-BL07-G4

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						66

Продовження табл. 2.2

FCP1	Сигнал аварії від пожежної сигналізації	ППКП "Тірас"
HE	Водяний повітрянагрівач (калорифер)	Blauberg HW-BL07
M1	Припливний вентилятор	3 комплекту установки
M2	Витяжний вентилятор	3 комплекту установки
M3	Двигун роторного рекуператора	3 комплекту рекуператора
PS1	Диференційне реле тиску (пресостат) фільтра припливного повітря	Siemens QBM81-3
PS2	Диференційне реле тиску (пресостат) фільтра витяжного повітря	Siemens QBM81-3
PS3	Диференційне реле тиску припливного вентилятора (контроль обриву ремня)	Siemens QBM81-5
CO2	Канальний датчик концентрації CO2	Siemens QPM2102D
RR1	Роторний рекуператор	Blauberg серії BL07
SM1	Електропривод припливної повітряної заслінки	Belimo LF24
SM2	Електропривод витяжної повітряної заслінки	Belimo LF24
TE1	Датчик температури зовнішнього повітря	Siemens QAM2120.040
TE2	Датчик температури витяжного повітря	Siemens QAM2120.040
TE5	Датчик температури припливного повітря (в каналі)	Siemens QAM2120.040
Y1	Сервопривід триходового клапана водяного калорифера	Belimo LR24A-SR
TK90	Капілярний термостат захисту калорифера від замерзання	Siemens QAF81.3
U1	Шафа керування температурою	USHK 3/4" Grundfos

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фізична передача інформаційних масивів від усіх польових первинних перетворювачів до центральної шафи керування автоматикою (позиція А2 на схемі) здійснюється спеціалізованими екранованими кабельними лініями. Використання екранованих трас є критично важливим для збереження цілісності слабкострумів аналогових сигналів (зокрема, від платинових термоопорів) та мінімізації наведених електромагнітних завад від силового комутаційного обладнання і перетворювачів частоти [25]. Усередині шафи А2 вхідні сигнали проходять через клемні колодки та, за необхідності, блоки гальванічної розв'язки, після чого надходять на відповідні канали модулів розширення та інтегровані входи програмованого логічного контролера Siemens SIMATIC S7-1200 [15].

Мікропроцесорне ядро ПЛК здійснює безперервне циклічне опитування входів, прецизійне аналого-цифрове перетворення (АЦП) та програмну фільтрацію даних. На основі отриманого вектора стану об'єкта, контролер виконує закладені в нього математичні алгоритми: розраховує пропорційно-інтегральні (ПІ) закони регулювання, перевіряє логічні умови апаратних блокувань та, у разі потреби, миттєво активує підпрограми превентивного захисту обладнання (наприклад, алгоритм захисту калорифера від заморожування) [28].

Результатом роботи обчислювального процесора є формування детермінованих керуючих впливів. Ці нормовані команди транслуються через аналогові (стандарт 0–10 В) та транзисторні дискретні (24 В постійного струму) виходи контролера безпосередньо на виконавчі механізми: сервоприводи байпасних і секційних заслінок, електропривод триходового сидельного клапана калорифера та пускозахисну апаратуру вентиляційних агрегатів [15]. Такий замкнений багаторівневий цикл обміну даними гарантує абсолютну керованість процесу, точність підтримання санітарних норм мікроклімату [1] та максимальну енергоефективність роботи установки в режимі реального часу.

2.10 Розробка схеми електричної принципової

Схема електрична принципова (СЕП) є базовим документом для монтажу, налагодження та подальшої експлуатації комплексу технічних засобів автоматизації. Вона деталізує повний склад електричних апаратів, комутаційних пристроїв, кабельних ліній та визначає всі електричні зв'язки між польовим рівнем установки Blauberg BL07 [24] та мікропроцесорним контролером Siemens S7-1200 [15]. Розроблена схема поділяється на дві логічні частини: силові кола (живлення виконавчих механізмів) та кола керування (живлення ПЛК і збір інформації) [25].

Силова частина та апарати захисту Електроживлення вентиляційної установки здійснюється від цехової трифазної мережі змінного струму з глухозаземленою нейтраллю (система заземлення TN-S, напруга ~380/400 В, 50 Гц). Для гарантування безпеки обслуговуючого персоналу на вводі у шафу автоматики передбачено головний рубильник-роз'єднувач QS1 типу «Load switch», який дозволяє виконати видимий розрив усіх фаз під час проведення регламентних робіт [25].

Розподіл електроенергії та захист кабельних ліній від струмів короткого замикання і теплових перевантажень реалізовано за допомогою групи автоматичних вимикачів:

- Q1 (63 А) - забезпечує захист найбільш енергоємного споживача: секції електричного нагріву (HE) або насосної групи водяного калорифера потужністю 24 кВт.
- Q2 (16 А) - захищає силові кола живлення частотних перетворювачів припливного (M1) та витяжного (M2) вентиляторів [27].
- Q3 (6 А) - виділений автоматичний вимикач для захисту кіл живлення дискретних виходів ПЛК та сервоприводів повітряних заслінок (230 В) [25].

Особливу увагу приділено апаратному захисту нагрівача. Як видно з фрагмента схеми (рис. 2.6), у ланцюг керування контактором нагріву послідовно вбудовано контакт термічного запобіжника ТК90 (Thermal fuse

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

90°C) [28]. При виникненні критичного перегріву цей контакт апаратно, в обхід контролера, знімає напругу з котушки контактора, що унеможливорює виникнення пожежі навіть у випадку програмного збою ПЛК [15].

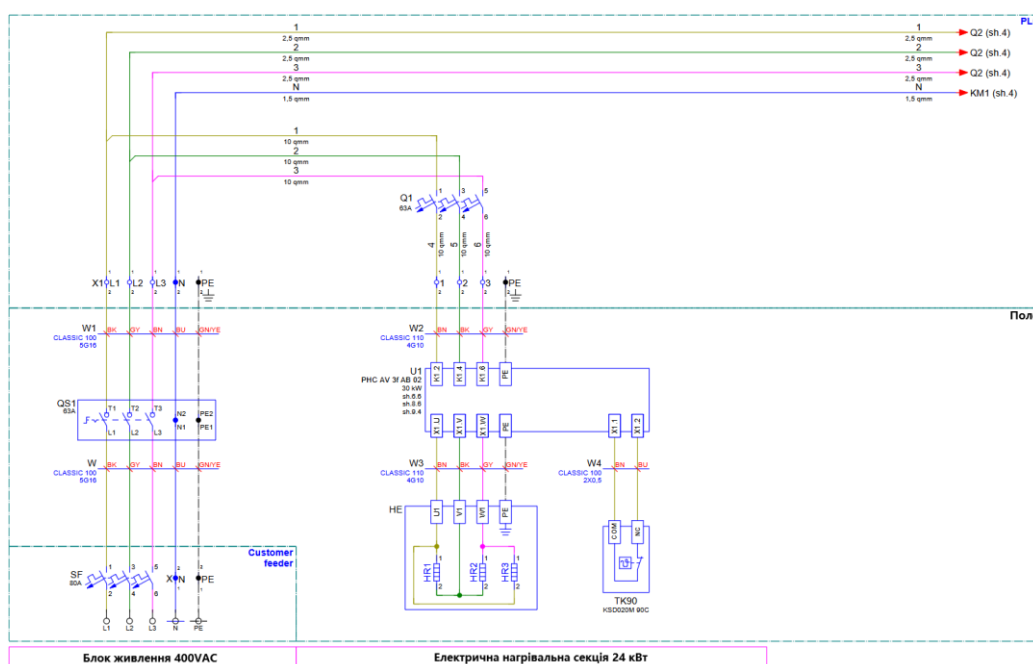


Рисунок 2.21 – Фрагмент електричної принципової схеми (силові кола та захист)

Таблиця 2.3 – Перелік елементів до принципової електричної схеми живлення та керування нагрівачем

Позиція	Найменування обладнання / матеріалу	Тип, марка, позначення
SF	Ввідний автоматичний вимикач (3P+N, In = 80 A)	ABB серії S800
QS1	Вимикач навантаження / Головний рубильник (3P, 63 A)	ABB OT63F3
Q1	Автоматичний вимикач захисту кола нагрівача (3P, In = 63 A)	ABB S203-C63
U1	Трифазний тиристорний регулятор потужності (до 30 кВт)	PHC AV 3f AB 02
HE	Секція електричного нагрівача (ТЕН), 24 кВт	3 комплекту установки

					<i>КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ</i>	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

TK90	Захисний біметалевий термостат перегріву (90°C, NC)	KSD020M 90C
X1	Блок ввідних силових гвинтових клем на DIN-рейку	Phoenix Contact UT 16
W, W1	Кабель силовий мідний, вогнестійкий (5x16 мм ²)	ВВГнг(д)-LS 5x16
W2, W3	Кабель силовий мідний, вогнестійкий (4x10 мм ²)	ВВГнг(д)-LS 4x10
W4	Кабель контрольний мідний екранований (2x0.5 мм ²)	J-Y(St)Y 2x0.5

Кола керування, контролера та польової периферії Для живлення мікропроцесорного ядра контролера Siemens S7-1200 [15], модулів розширення та активних датчиків передбачено понижуючий трансформатор / блок живлення TR1, який формує стабілізовану напругу 24 В постійного (або змінного) струму. Вторинна обмотка захищена окремим скляним запобіжником F1 (3.15 А).

Підключення первинних перетворювачів до модулів аналогового вводу (AI) виконано за допомогою екранованих кабелів типу UNITRONIC LiYY (наприклад, 2x0.25). Екрани кабелів в обов'язковому порядку заземлюються лише з одного боку (на спеціальну РЕ-шину в шафі автоматики) для запобігання виникненню контурних струмів («земляних петель»), які можуть спотворити мілівольтові сигнали від платинових термоопорів Pt1000 [25]. Дискретні сигнали (від пресостатів PS1-PS3 та пожежної централі) підключаються стандартними мідними кабелями перерізом 0.5–0.75 мм².

Повний комплект аркушів схеми електричної принципової, що включає детальні схеми підключення кожного датчика до клемних колодок контролера, таблицю з'єднань та специфікацію кабельного журналу, наведено у Додатках до даної пояснювальної записки [25].

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальну інженерну задачу розроблено комплексну мікропроцесорну систему автоматичного керування припливно-витяжною вентиляційною установкою Blauberg BL07 з рекуперацією тепла. Перехід від жорсткої релейно-контакторної логіки до адаптивних алгоритмів на базі сучасного програмованого логічного контролера дозволив досягти заданих нормативних показників мікроклімату та суттєво підвищити експлуатаційну надійність об'єкта.

За результатами виконання роботи зроблено наступні висновки:

1. Математичне моделювання та синтез контурів керування: Процес нагрівання повітря у водяному калорифері формалізовано у вигляді аперіодичної ланки першого порядку з транспортним запізненням. За допомогою алгоритмів робастного синтезу в середовищі MATLAB аналітично розраховано оптимальні параметри ПІ-регулятора (,), що забезпечило асимптотичну стійкість системи із запасом по фазі 60° та повну ліквідацію паразитних автоколивань при відпрацюванні теплових збурень.

2. Апаратна реалізація: Обґрунтовано та розроблено трирівневу ієрархічну архітектуру автоматизації на базі ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 (CPU 1214C DC/DC/DC) та модуля розширення SM 1231 RTD. Інтеграція перетворювачів частоти SINAMICS V20, пресостатів та сервоприводів Belimo дозволила сформувати повноцінні контури термодинамічної стабілізації, аеродинамічного балансу та функціональної безпеки.

3. Програмне забезпечення та візуалізація: В інженерному середовищі TIA Portal (на мові LAD) розроблено прикладне ПЗ для контролера та людино-машинний інтерфейс для панелі SIMATIC TP1200 Comfort.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ								
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата									
Розроб.		Макаренко М.В.			ВИСНОВОК				Літ.	Арк.	Аркушів		
Перевір.		Савицький О.І.									72	3	
									КНУ АКІТ-22				
Н. Контр.		Маринич І.А.											
Затверд.		Маринич І.А.											

Застосування алгоритму бітового мультиплексування (пакування до 16 дискретних тривог у глобальне слово HMI_Alarm_Word) дозволило кратно знизити навантаження на комунікаційну шину PROFINET та оптимізувати мережевий трафік.

4. Імітаційне моделювання (Virtual Commissioning): Для тестування SCADA-системи без фізичного обладнання застосовано метод алгоритмічного перенесення адрес частини аналогових сенсорів із зони апаратних входів (%IW) у внутрішню маркерну пам'ять (%MW) з подальшим використанням інструментарію примусового форсування (Force table) у середовищах PLCSIM та WinCC Runtime Advanced. Це підтвердило безвідмовність роботи аварійних алгоритмів (зокрема, пожежної тривоги) та коректність відображення трендів у режимі реального часу.

Ключовим здобутком розробленої системи є комплексне підвищення енергоефективності технологічного процесу обробки повітря. Економія енергоресурсів на підприємстві здійснюється за рахунок трьох взаємопов'язаних факторів:

1. Рекуперація тепла: Алгоритмічно оптимізоване керування байпасною заслінкою пластинчастого перехресно-точного рекуператора дозволяє стабільно утилізувати теплоту витяжного повітря. Це повертає до 73–80% теплової енергії назад у припливний тракт, радикально знижуючи навантаження на основний калорифер у зимовий період.

2. Частотне регулювання продуктивності: Відмова від неефективного механічного дроселювання (шиберів) на користь керування двигунами вентиляторів через частотні перетворювачі SINAMICS V20 дозволяє динамічно адаптувати масову витрату повітря до реальних потреб виробництва. Враховуючи кубічну залежність споживаної потужності від частоти обертання, це забезпечує до 40% економії електроенергії на приводних механізмах.

3. Адаптивне керування теплоносієм: Налаштований за допомогою математичного моделювання технологічний об'єкт PID_Compact забезпечує

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прецизійне позиціонування триходового клапана водяного калорифера. Плавна робота без перерегулювання усуває перевитрати гарячої води та мінімізує енергетичні втрати під час перехідних процесів.

Розроблена проектно-конструкторська документація (структурна схема, ФСА та принципова електрична схема) і готове програмне забезпечення підтверджують повну готовність системи до фізичного впровадження на реальному об'єкті.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіон України, 2013. 141 с.
2. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 26 с.
3. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
4. ДСТУ 3582:2013. Інформація та документація. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень українською мовою. Загальні вимоги та правила. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 15 с.
5. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21 жовт. 2021 р. № 1818-IX.
6. ДСТУ EN 13779:2015. Вентиляція будівель нежитлового призначення. Технічні вимоги до систем вентиляції та кондиціонування повітря. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2015. 64 с.
7. Пупена О. М., Ельперін І. В. Промислова автоматизація та інформаційні технології: навч. посіб. Київ: Ліра-К, 2019. 452 с.
8. Денисенко В. В. Комп'ютерне керування технологічним процесом, експериментом, обладнанням. Київ: Техніка, 2018. 768 с.
9. Осадчий С. І., Шарапов О. В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ: Центр навчальної літератури, 2020. 416 с.
10. Андрющенко О. А. Системи управління мікрокліматом промислових будівель: монографія. Харків: ХНУРЕ, 2021. 235 с.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ						
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		Макаренко М.В.			СПИСОК ЛТЕРАТУРИ			Літ.	Арк.	Аркушів	
Перевір.		Савицький О.І.								75	3
								КНУ АКІТ-22			
Н. Контр.		Маринич І.А.									
Затверд.		Маринич І.А.									

11. Іванов А. П. Основи автоматизації теплогазопостачання та вентиляції: навч. посіб. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. 280 с.
12. Керування технологічними процесами в середовищі MATLAB / Simulink: метод. вказівки / уклад. В. М. Ковальов. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2022. 112 с.
13. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. 13th ed. Pearson, 2016. 1088 p.
14. Палкін В. В. Енергозбереження в системах вентиляції та кондиціонування повітря. Харків: ХНАМГ, 2019. 198 с.
15. SIMATIC S7-1200 Programmable Controller: System Manual. Nurnberg: Siemens AG, 2024. 1848 p.
16. Programming with STEP 7 and TIA Portal V13: Programming Manual. Nurnberg: Siemens AG, 2015. 942 p.
17. WinCC Runtime Advanced V13.0 SP1: Operating Manual. Nurnberg: Siemens AG, 2014. 586 p.
18. SINAMICS V20 Inverter: Operating Instructions. Nurnberg: Siemens AG, 2022. 354 p.
19. SIMATIC S7-1200 CPU 1214C: Technical Specifications. Nurnberg: Siemens Industry Online Support, 2023. 120 p.
20. PID Control with S7-1200: Function Manual. Nurnberg: Siemens AG, 2021. 250 p.
21. Гайдуцький А. П. Енергоефективність вентиляційних систем промислових підприємств. Київ: Наукова думка, 2022. 210 с.
22. Петренко В. М. Методи оптимізації процесів рекуперації тепла у вентсистемах // Вісник інженерної академії України. 2023. № 2. С. 45–50.
23. Клименко С. О. Дослідження теплових процесів у пластинчастих теплообмінниках // Енергетика і автоматика. 2024. № 1. С. 112–118.
24. Blauberg Ventilatoren. Energy recovery units: Technical Data Sheet BL07 RH 6000-HE-S31. München, 2024. 12 p.

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Automatic control system for air-handling unit: Working documents SR-E024-0-R-3PEC-ATX1. 2024. 20 p.[cite: 4]

26. Офіційний портал технічної підтримки Siemens Industry Online Support (SIOS). URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 12.05.2026).

27. Ковальчук О. М. Роль частотного регулювання в автоматизованих системах вентиляції // Сучасні технології в автоматизації. 2025. № 4. С. 33–38.

28. Мельник В. В. Захист пластинчастих рекуператорів від обмерзання: аналіз методів // Промислова теплотехніка. 2023. Т. 45, № 2. С. 20–25.

29. Стандарт ISA-101: Human Machine Interfaces for Process Automation Systems. ISA, 2024. 115 p.

Лістинг програмного коду моделювання САК у середовищі

MATLAB

```

% Скрипт моделювання САК (з урахуванням реальної теплової інерції)
% 1. Ініціалізація параметрів об'єкта керування
K_kal = 1.5; % Коефіцієнт підсилення калорифера
T_kal = 450; % Стала часу калорифера
tau = 12;    % Транспортне запізнення

% 2. Створення математичної моделі
s = tf('s');
W_kal = K_kal / (T_kal * s + 1);
W_kal.InputDelay = tau;

% 3. Автоматичний синтез ПІ-регулятора
[C_pid, info] = pidtune(W_kal, 'PI');

% 4. Замкнена система
W_closed = feedback(C_pid * W_kal, 1);

% 5. Побудова графіка перехідного процесу
figure('Name', 'Перехідний процес системи керування');
step(W_closed, 3000); % Задаємо час симуляції 3000 секунд
title('Перехідний процес нагрівання припливного повітря (6600 м^3/год)');
xlabel('Час, секунди');
ylabel('Зміна температури, °C');
grid on;

% 6. Вивід розрахованих коефіцієнтів у консоль
disp('=== НОВІ Коефіцієнти ПІД-регулятора ===');
disp(['Пропорційна (Kp) = ', num2str(C_pid.Kp)]);
disp(['Інтегральна (Ki) = ', num2str(C_pid.Ki)]);
step_data = stepinfo(W_closed);
disp(['Час регулювання (в секундах): ', num2str(step_data.SettlingTime)]);
disp(['Час регулювання (в ХВИЛИНАХ): ', num2str(step_data.SettlingTime / 60)]);

% 7. Частотний аналіз (Діаграми Боде)
figure('Name', 'Частотний аналіз стійкості (Діаграми Боде)');
margin(W_kal * C_pid);
grid on;

% 8. Реакція на зовнішнє збурення
W_dist = W_kal / (1 + C_pid * W_kal);
figure('Name', 'Реакція на зовнішнє збурення');
step(W_dist, 3000); % Час симуляції 3000 секунд
title('Компенсація зовнішнього теплового збурення ПІ-регулятором');
xlabel('Час, секунди');
ylabel('Відхилення температури, °C');
grid on;

```

					КНУ КРБ.151.26.09.00.ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		