

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

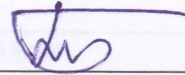
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

« 15 » червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва спеціальності)

освітня програма Електромеханіка та електроенергетика
(назва освітньої програми)

на тему: «Автоматизація рекупераційної системи цеху»

Виконав: студент IV курсу, групи 4361

Прокопчук Ірина Олександрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

асист. каф. автоматики, к.т.н, Іванов А.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

доц. каф. автоматики, Савченко О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

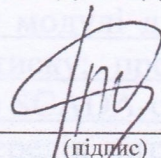
Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент



(підпис)

м. Миколаїв – 2026 р.

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

Кафедра автоматики

Освітній ступінь бакалавр

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)

Освітня програма «Електромеханіка та електроенергетика»

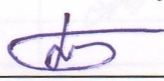
консультанта видав прийняв

Охорона праці

Іванов А. В., к.т.н., асистент кафедри

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри, к.т.н.

доцент

 О. Г. Васильєв

« 16 » лютого 2026 року

7. Дата видачі завдання 16 лютого 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

гр. 4361 Прокопчук Ірина Олександрівна
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація рекупераційної системи цеху»

керівник роботи Іванов Антон Віталійович, кандидат технічних наук, асистент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від « 22 » квітня 2026 року № 286-УЧ

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи об'єкт автоматизації: промислова припливно-втяжна установка з пластинчастим або роторним рекуператором теплової енергії; технологічні параметри: температура зовнішнього повітря (T_{ext}), температура припливного повітря (T_{sup}), вологість повітряного середовища, перепад тиску на фільтрах та теплообміннику; виконавчі механізми: асинхронні двигуни вентиляторів з частотним регулюванням, електроприводи повітряних заслінок, насос вузла обв'язки; апаратна база: промисловий логічний контролер та периферійні модулі для збору даних з датчиків PT1000/NTC та диференційних реле тиску; протоколи передачі даних: PROFINET, Modbus TCP/IP для інтеграції в SCADA-систему.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз сучасних технологій рекуперації повітря в промисловості. 2 Проектування системи автоматичного керування

рекуператором. 3 Програмне забезпечення та алгоритми роботи системи. 5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових графіків)

1. Схема автоматизації технологічного процесу (P&ID). 2. Структурно-функціональна схема системи керування. 3. Принципова електрична схема підключення контролера та периферії. 4. Алгоритм роботи системи (блок-схема головного циклу та обробки аварій). 5. Графіки перехідних процесів (результати моделювання роботи системи).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Іванов А. В., к.т.н., асистент кафедри	21.05.26	02.06.26
			

7. Дата видачі завдання 16 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Збір та аналіз вихідних даних, огляд літературних джерел	20.03.2026	
2	Розробка технічних рішень та вибір елементної бази	15.04.2026	
3	Складання схем та розрахунок параметрів регулювання	05.05.2026	
4	Розробка ПЗ та візуалізація інтерфейсу керування	20.05.2026	
5	Охорони праці	02.06.2026	

Студент

(підпис)

Прокопчук І. О.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Іванов А. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ключові слова: рекуперація теплової енергії, автоматизація цеху, промислова вентиляція, енергоефективність, програмований логічний контролер (ПЛК), Siemens S7-1200, ПІД-регулювання, перетворювачі частоти, захист від обмерзання, HMI/SCADA.

Обсяг пояснювальної записки складає 85 аркушів, вона містить 4 розділи, 15 ілюстрацій, 5 таблиць та 22 найменувань у списку використаних джерел.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та проектуванню системи автоматизованого керування рекупераційною установкою промислового цеху. Метою роботи є розробка технічного та програмного забезпечення для оптимізації процесів теплообміну, забезпечення нормативних параметрів повітряного середовища та мінімізації енергетичних втрат припливно-витяжної вентиляції.

Розроблена система базується на використанні промислового логічного контролера серії Siemens S7-1200, що забезпечує високу надійність та можливість інтеграції в загальну мережу автоматизації підприємства. У роботі обґрунтовано вибір елементної бази, зокрема температурних перетворювачів PT1000, датчиків диференційного тиску для моніторингу стану фільтрів та частотних регуляторів для керування швидкістю вентиляторів.

В межах програмної реалізації розроблено алгоритми автоматичного підтримання температури припливного повітря за допомогою ПІД-закону регулювання, а також систему багаторівневого захисту теплообмінника від обмерзання. Проектування інтерфейсу оператора виконано з урахуванням сучасних вимог до візуалізації технологічних процесів, що дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг та оперативне керування параметрами системи.

Практична цінність роботи полягає у можливості впровадження запропонованих рішень на реальних виробничих об'єктах для зниження споживання енергоносіїв та підвищення рівня безпеки експлуатації вентиляційного обладнання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ.....	9
1.1. Принципи роботи та типи промислових рекупераційних систем.....	9
1.2. Огляд методів та засобів автоматизації процесів теплообміну.....	11
1.3. Аналіз існуючих рішень для моніторингу та керування параметрами повітряного середовища.....	13
1.4. Обґрунтування необхідності автоматизації рекупераційної системи цеху.....	18
Висновки за розділом.....	19
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕКУПЕРАТОРОМ.....	21
2.1. Розробка структурно-функціональної схеми системи керування.....	21
2.2. Розрахунок потужності електродвигунів вентиляторних установок...	23
2.3. Обґрунтування вибору та технічні характеристики програмованого логічного контролера.....	28
2.4. Вибір та обґрунтування периферійного обладнання та виконавчих механізмів.....	30
2.4.1 Силові перетворювальні пристрої та засоби керування приводами.....	30
2.4.2 Вимірювальні перетворювачі параметрів повітряного середовища.....	33
2.5. Розробка принципової електричної схеми системи.....	38
Висновки за розділом.....	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	42
3.1. Розробка алгоритму функціонування системи рекуперації.....	42
3.2. Алгоритми підпрограм та програмна реалізація функціональних блоків.	44
3.3. Аналіз ефективності роботи автоматизованої системи та графіки перехідних процесів.....	57

Висновки за розділом.....	63
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	65
4.1. Аналіз умов праці на ділянці експлуатації автоматизованої системи...65	
4.2. Технічні заходи з електробезпеки при експлуатації системи.....67	
4.3. Заходи з пожежної безпеки.....69	
4.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях.....70	
4.5. Розрахунок штучного освітлення робочого місця оператора.....72	
Висновки за розділом.....	74
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
ДОДАТОК А МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....	80

ВСТУП

У сучасних умовах промислового виробництва енергоефективність стає одним із визначальних факторів конкурентоспроможності підприємства. Оскільки значна частина енергетичних ресурсів витрачається на підтримання нормативних параметрів мікроклімату в цехах, впровадження систем рекуперації теплової енергії є критично важливим завданням. Рекупераційні системи дозволяють використовувати тепло відпрацьованого повітря для нагрівання припливних потоків, що суттєво знижує навантаження на котельне обладнання та системи електропідігріву. Проте складність динамічних процесів теплообміну, мінливість зовнішніх кліматичних умов та жорсткі вимоги до точності підтримання температури вимагають використання високотехнологічних засобів автоматизації.

Традиційні методи керування вентиляційним обладнанням часто не здатні забезпечити оптимальний ККД рекуперації та надійний захист від аварійних режимів, таких як обмерзання теплообмінника. Застосування сучасних програмованих логічних контролерів, зокрема серії Siemens S7-1200, у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами ПІД-регулювання, дозволяє створити гнучку та надійну систему керування. Це забезпечує не лише стабільність технологічних параметрів, а й можливість інтеграції локальних вузлів автоматизації у загальну цифрову інфраструктуру підприємства згідно з концепцією Industry 4.0.

Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування рекупераційною установкою промислового цеху, яка забезпечує стабільне підтримання параметрів повітряного середовища при мінімальних витратах енергоресурсів та високому рівні експлуатаційної надійності.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси тепломасообміну в рекупераційних системах промислової вентиляції.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та технічні засоби автоматичного керування рекупераційним обладнанням на базі промислового логічного контролера та сучасних засобів вимірювальної техніки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань, що включають аналіз існуючих світових технологій рекуперації повітря та оцінку ефективності різних типів теплообмінних апаратів у промислових умовах. Важливим етапом є наукове обґрунтування вибору елементної бази системи автоматизації, що передбачає аналіз характеристик датчиків температури, тиску та вологості, а також підбір виконавчих механізмів з частотним регулюванням. Робота передбачає розробку структурно-функціональних та принципових електричних схем, що відображають логіку взаємодії всіх компонентів системи. Особлива увага приділяється програмній реалізації алгоритмів керування у середовищі TIA Portal, розробці людино-машинного інтерфейсу для візуалізації процесів та проведенню аналізу заходів з охорони праці при експлуатації автоматизованого обладнання.

Результати роботи мають практичне значення для підвищення рівня енергетичної незалежності виробничих об'єктів та можуть бути використані при модернізації існуючих систем вентиляції та кондиціонування повітря.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ РЕКУПЕРАЦІЇ ПОВІТРЯ В ПРОМИСЛОВОСТІ

1.1. Принципи роботи та типи промислових рекупераційних систем

Рекуперація повітря у промислових системах вентиляції та кондиціонування є процесом передачі теплової енергії (або енергії охолодження) від витяжного повітряного потоку до припливного. В основі цього процесу лежить принцип теплообміну, де витяжне повітря, що видаляється з цеху, виступає як вторинний енергоресурс. Головною метою рекуперації є мінімізація споживання первинної енергії на підготовку припливного повітря, що дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати підприємства, особливо в регіонах із суворими кліматичними умовами [1].

Ефективність рекуперації оцінюється температурним коефіцієнтом корисної дії (η), який показує співвідношення фактично отриманого тепла до максимально можливого. У сучасній інженерній практиці вибір конкретного типу рекуператора залежить від технологічного призначення цеху, наявності вільних площ для монтажу та вимог до чистоти повітряного середовища [2].

Найбільшого поширення у промисловому секторі набули пластинчасті рекуператори. Їхня конструкція базується на пакеті тонких теплопровідних пластин (ламелей), що виготовляються з алюмінію або спеціальних композитних матеріалів. Принцип роботи полягає у перехресному або протиточному русі повітряних мас крізь канали, утворені цими пластинами. У протиточних схемах теплообмін відбувається найбільш інтенсивно, оскільки потоки рухаються назустріч один одному по всій довжині каналу, що дозволяє досягти ККД на рівні 80-85%. Такі системи є статичними, не мають

рухомих частин та забезпечують повну герметичність потоків, що виключає передачу забруднюючих речовин з витяжки у приплив [3].

Важливим аспектом експлуатації пластинчастих систем є контроль точки роси. При охолодженні вологого витяжного повітря на пластинах утворюється конденсат, який за низьких зовнішніх температур може перетворюватися на лід, блокуючи прохідні перетини. Це вимагає впровадження систем автоматичного захисту, які зазвичай реалізуються через байпасний канал або зміну інтенсивності припливу [1,3].

Для систем із великою продуктивністю (понад 10 000 м³/год) доцільним є використання роторних рекуператорів. Конструктивно такий рекуператор являє собою барабан, заповнений матрицею з гофрованої алюмінієвої стрічки, що постійно обертається. Під час обертання матриця по чергово проходить крізь гарячий та холодний потоки, акумулюючи тепло в одному та віддаючи його в іншому. Роторні системи дозволяють повертати не лише явне тепло (температуру), а й приховану теплоту (вологу), що особливо важливо для підтримки заданої вологості в цеху без додаткових витрат на зволоження.

Керування роторним рекуператором здійснюється шляхом зміни швидкості обертання привода, що дозволяє точно модулювати потужність рекуперації. Хоча вони мають найвищий ККД (до 90%), їх застосування обмежене на виробництвах із токсичними або пожежонебезпечними викидами через невеликий ризик перетікання повітря між каналами.

На об'єктах, де припливні та витяжні установки технічно неможливо розмістити поруч, використовують системи з проміжним теплоносієм (водно-гліколеві рекуператори). Така система складається з двох автономних теплообмінників, з'єднаних замкненим гідравлічним контуром. Теплоносій (розчин етиленгліколю) циркулює між ними за допомогою насоса, переносячи енергію від витяжки до припливу.

Незважаючи на нижчий ККД (45-55%) порівняно з пластинчастими чи роторними аналогами, ці системи забезпечують абсолютну ізоляцію потоків та гнучкість у проєктуванні, оскільки відстань між точками забору та подачі повітря може становити десятки метрів. Автоматизація такого процесу зосереджена на регулюванні швидкості циркуляційного насоса залежно від температурного графіка.

1.2. Огляд методів та засобів автоматизації процесів теплообміну

Автоматизація процесів теплообміну в промислових рекупераційних системах є комплексним завданням, спрямованим на забезпечення динамічної рівноваги між енергоощадністю та підтриманням заданих параметрів мікроклімату. Складність цього процесу зумовлена високою інерційністю теплових об'єктів та значною залежністю їхньої ефективності від змінних зовнішніх чинників, таких як температура та вологість атмосферного повітря. Основним методом автоматизації у даній галузі є перехід від дискретного керування до безперервного регулювання параметрів, що дозволяє мінімізувати амплітуду коливань температури припливного повітря.

Основним інструментом для досягнення високої точності регулювання в сучасних інженерних мережах є використання алгоритмів пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання. Застосування ПІД-закону дозволяє враховувати не лише поточне відхилення температури від заданої уставки, а й тривалість цього відхилення та швидкість його зміни. Це критично важливо для рекуператорів, оскільки дозволяє виконавчим механізмам, таким як приводи повітряних заслінок або частотні перетворювачі двигунів, реагувати на зміну умов превентивно, уникаючи перерегулювання. У сучасних системах на базі промислових логічних

контролерів, зокрема серії Siemens S7-1200, такі алгоритми реалізуються за допомогою спеціалізованих програмних блоків, що забезпечують автоналаштування коефіцієнтів залежно від характеристик об'єкта [4,5].

Технічні засоби автоматизації теплообміну класифікуються за рівнями ієрархії системи. На нижньому рівні розташовані первинні вимірювальні перетворювачі (датчики), які перетворюють фізичні величини у стандартизовані електричні сигнали. Для моніторингу температурних режимів у рекупераційних установках найчастіше застосовуються термоперетворювачі опору типу PT100 або PT1000. Їх вибір обумовлений високою стабільністю характеристик та лінійною залежністю опору від температури. Окрім температурних датчиків, обов'язковим елементом є диференційні датчики тиску, які дозволяють автоматично контролювати ступінь забруднення фільтрів та цілісність теплообмінного пакета, що безпосередньо впливає на ефективність теплопередачі [6].

Виконавчий рівень засобів автоматизації представлений пристроями, що безпосередньо впливають на тепловий баланс. У пластинчастих системах це інтелектуальні електроприводи з аналоговим керуванням (0-10 В), які плавно змінюють положення байпасної заслінки, регулюючи об'єм повітря, що проходить через рекуператор. У роторних системах ключовим засобом є частотний перетворювач, який змінює швидкість обертання теплообмінника. Такий метод дозволяє досягти виняткової плавності регулювання потужності рекуперації та є найбільш енергоефективним, оскільки споживання електроенергії двигуном пропорційне кубу швидкості його обертання.

Окремим важливим методом автоматизації є інтелектуальний захист від обмерзання, який базується на аналізі температурного графіка витяжного повітря та перепаду тиску. Автоматизована система повинна самостійно визначати момент початку конденсації та кристалізації вологи, активуючи режими відтайки без зупинки всього вентиляційного циклу. Це досягається

шляхом тимчасового перерозподілу повітряних потоків або зниження інтенсивності припливу, що потребує високої швидкодії керуючого логічного пристрою.

Сучасна архітектура засобів автоматизації передбачає обов'язкову наявність комунікаційних інтерфейсів для передачі даних на верхній рівень моніторингу. Використання протоколів PROFINET або Modbus TCP дозволяє об'єднувати окремі вузли рекуперації в єдину цифрову мережу підприємства, що забезпечує можливість дистанційної діагностики та оптимізації режимів роботи в реальному часі. Таким чином, сучасні методи та засоби автоматизації перетворюють рекупераційну установку з простого теплообмінника на високотехнологічну адаптивну систему [7].

1.3. Аналіз існуючих рішень для моніторингу та керування параметрами повітряного середовища

Ефективне функціонування автоматизованої системи рекуперації неможливе без створення цілісної інфраструктури моніторингу, яка забезпечує збір, обробку та архівацію даних про стан повітряного середовища. Сучасна концепція моніторингу в промислових умовах передбачає перехід від простої візуалізації поточних значень до багаторівневої системи аналізу, що дозволяє виявляти відхилення у роботі обладнання на ранніх стадіях. Це особливо критично для рекупераційних установок, де зміна одного параметра (наприклад, вологості витяжного повітря) може миттєво вплинути на термічний ККД та безпеку експлуатації всієї системи.

Нижній рівень рішень для моніторингу представлений мережею інтелектуальних датчиків та вимірювальних перетворювачів. В існуючих

інженерних рішеннях для контролю температури повітря у вентиляційних каналах стандартом є використання занурювальних або накладних термоперетворювачів опору (RTD). Перевага надається датчикам типу PT1000 через їхню високу стабільність та мінімальний вплив опору з'єднувальних дротів на точність вимірювання. Окрім температури, критично важливим є моніторинг відносної вологості, оскільки саме цей параметр визначає температуру «точки роси» та ризик утворення конденсату в теплообміннику.

Для забезпечення завадостійкості в умовах працюючого цехового обладнання, сучасні вимірювальні перетворювачі використовують уніфіковані сигнали струмової петлі 4-20 мА або цифрові протоколи передачі даних. Використання протоколу Modbus RTU безпосередньо на рівні датчиків дозволяє зменшити кількість кабельних ліній та передавати на контролер не лише основне значення параметра, а й діагностичну інформацію про стан самого сенсора. Такий підхід реалізований у рішеннях провідних світових виробників, таких як Belimo, Danfoss та Siemens, що дозволяє інтегрувати їхні пристрої в єдину мережу керування на базі ПЛК Siemens S7-1200 без використання додаткових модулів узгодження [8].

Окрім термодинамічних параметрів, сучасні системи моніторингу все частіше включають аналізатори якості повітря. Контроль концентрації вуглекислого газу (CO_2) та летких органічних сполук (VOC) дозволяє реалізувати алгоритми «вентиляції за вимогою». Це означає, що інтенсивність рекуперації та швидкість повітрообміну динамічно підлаштовуються під кількість персоналу та активність технологічних процесів у цеху, що є одним із найбільш ефективних методів додаткового енергозбереження [10].

Середній рівень архітектури моніторингу та керування базується на використанні програмованих логічних контролерів (ПЛК), які виконують

роль центрального вузла обробки інформації. У сучасних проектах автоматизації вентиляційних систем перевага надається контролерам із вбудованими засобами мережевої комунікації, таким як Siemens SIMATIC S7-1200. Вибір такої апаратної бази обумовлений наявністю потужних інструментів для обробки аналогових сигналів та підтримкою протоколів реального часу. ПЛК здійснює безперервне опитування датчиків, виконує математичні операції згідно з алгоритмами ПД-регулювання та формує керуючі команди для виконавчих пристроїв, одночасно транслюючи дані на засоби візуалізації.

Важливим компонентом сучасних рішень є людино-машинний інтерфейс (НМІ), який реалізується за допомогою спеціалізованих сенсорних панелей оператора. У промислових системах рекуперації НМІ виконує функцію графічного представлення складних термодинамічних процесів у зрозумілому для персоналу вигляді. На екрані панелі відображається інтерактивна мнемосхема установки, де за допомогою анімованих елементів візуалізується рух повітряних потоків, напрямок обертання ротора рекуператора або стан обвідного каналу (байпаса). Такий підхід дозволяє оператору миттєво оцінити ефективність теплообміну, спостерігаючи за різницею температур на вході та виході з системи.

Функціональні можливості сучасних інтерфейсів моніторингу включають систему реєстрації аварійних подій та журналювання дій персоналу. Система алармів (Alarms) у рішеннях на базі TIA Portal дозволяє класифікувати помилки за рівнем критичності: від попереджувальних повідомлень про необхідність сервісного обслуговування до критичних стоп-сигналів, що виникають при спрацюванні термостатів захисту від замерзання або датчиків пожежної сигналізації. Візуалізація аварій супроводжується текстовими підказками, що значно скорочує час на пошук та усунення

несправностей, мінімізуючи ризик пошкодження дорогого теплообмінного обладнання.

Окрім поточної індикації, існуючі рішення для моніторингу обов'язково передбачають побудову історичних трендів. Графічне представлення зміни параметрів (температури, вологості, енергоспоживання) за певний період часу дозволяє проводити глибокий аналіз роботи рекупераційної системи. Аналіз трендів допомагає виявити періоди пікових навантажень та оцінити адекватність налаштування регуляторів. Це є основою для реалізації стратегій енергоменеджменту, оскільки дозволяє точно визначити реальний економічний ефект від рекуперації теплової енергії в різних режимах роботи цеху. Сучасні панелі Comfort-серії також підтримують розмежування прав доступу, що гарантує захист від несанкціонованої зміни критичних налаштувань системи керування.

Верхній рівень ієрархії керування та моніторингу промислових рекупераційних систем реалізується на базі SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition), що функціонують на серверному обладнанні або потужних промислових ПК. Використання програмного забезпечення такого класу, як Siemens WinCC або його аналогів, дозволяє перетворити локальний вузол автоматизації на складову частину глобальної енергосистеми підприємства. Основною перевагою SCADA-рівня є можливість централізованого керування десятками рекупераційних установок, розташованих у різних цехах, з єдиного диспетчерського пункту. Це забезпечує глобальну координацію повітряних потоків та дозволяє реалізувати складні алгоритми балансування енергоспоживання, що практично неможливо на рівні окремих контролерів [9].

Інтеграція обладнання на цьому рівні здійснюється за допомогою високошвидкісних мережевих протоколів. Основним стандартом для систем на базі контролерів Siemens є PROFINET, що базується на технології

Industrial Ethernet. Використання цієї мережі дозволяє не лише передавати технологічні дані з високою частотою оновлення, а й здійснювати дистанційне програмування та діагностику ПЛК. Крім того, підтримка відкритого протоколу Modbus TCP забезпечує сумісність із широким спектром периферійного обладнання сторонніх виробників, включаючи інтелектуальні лічильники електроенергії та складні аналізатори складу повітря, що розширює аналітичні можливості системи моніторингу.

Новітнім етапом розвитку систем моніторингу є впровадження вбудованих веб-серверів безпосередньо у програмне забезпечення ПЛК. Сучасні моделі контролерів Siemens S7-1200 дозволяють створювати персоналізовані веб-сторінки (User-defined Web pages), доступ до яких можна отримати через звичайний браузер з будь-якого пристрою у локальній мережі. Це створює додатковий рівень мобільності для технічного персоналу, дозволяючи контролювати параметри рекуперації через планшети або смартфони без необхідності встановлення спеціалізованого ПЗ. Такі рішення суттєво підвищують оперативність обслуговування та дозволяють візуалізувати стан системи навіть за межами операторської кімнати.

На сучасному етапі розвитку Industry 4.0 все більшої актуальності набувають рішення на базі Industrial IoT (IIoT) та хмарних технологій (наприклад, Siemens MindSphere). Ці рішення дозволяють передавати агреговані дані про роботу рекуператорів у захищені хмарні сховища для проведення предиктивного аналізу. Використання методів машинного навчання у хмарних сервісах дозволяє прогнозувати термін служби фільтрів та теплообмінних касет на основі аналізу тенденцій падіння тиску та термічного опору. Таким чином, аналіз існуючих рішень для моніторингу демонструє чітку тенденцію до повної цифровізації та віддаленої диспетчеризації, що є фундаментом для створення високоефективних та надійних систем автоматизації промислових об'єктів.

1.4. Обґрунтування необхідності автоматизації рекупераційної системи цеху

Обґрунтування доцільності впровадження автоматизованої системи керування рекуперацією базується на комплексному аналізі економічних, технологічних та експлуатаційних чинників. У сучасних промислових умовах, що характеризуються високою вартістю енергоносіїв та жорсткими екологічними стандартами, використання енергоощадного обладнання без належного рівня автоматизації є неефективним. Це пояснюється тим, що процеси теплообміну в рекуператорах мають високу динамічність: температура зовнішнього повітря, вологість та обсяги технологічних викидів у цеху постійно змінюються протягом доби та сезону. Ручне регулювання або використання простих релейних схем не дозволяє системі адаптуватися до цих змін у реальному часі, що призводить до значних енергетичних втрат або порушення мікроклімату.

Економічна необхідність автоматизації впливає з можливості суттєвого скорочення споживання первинної енергії на підігрів припливного повітря. Впровадження інтелектуального алгоритму керування на базі контролера Siemens S7-1200 дозволяє реалізувати точне ПІД-регулювання, яке підтримує задану температуру з мінімальним відхиленням. Це виключає ситуації «перегріву» повітря, коли система споживає більше газу чи електроенергії, ніж потрібно для санітарних норм. Крім того, автоматизація дозволяє впровадити стратегію вентиляції за фактичною потребою (Demand Controlled Ventilation), регулюючи швидкість вентиляторів залежно від концентрації CO₂ або за графіком робочих змін. Такий підхід не лише економить ресурси, а й значно подовжує міжремонтний інтервал експлуатації електродвигунів та виконавчих механізмів [10].

Технологічний аспект обґрунтування зосереджений на забезпеченні надійності та захисті дорогого теплообмінного обладнання. Найбільш

критичною загрозою для пластинчастих та роторних рекуператорів у зимовий період є процес обмерзання теплообмінних поверхонь через конденсацію вологи з витяжного повітря. Без автоматизованого моніторингу перепаду тиску та температури за рекуператором виявлення моменту обмерзання стає неможливим, що призводить до блокування повітряних каналів льодом, деформації пластин та аварійної зупинки всієї системи вентиляції цеху. Автоматизована система гарантує безпеку, самостійно переходячи в режим відтавання (через відкриття байпаса або зміну швидкості обертання ротора) без ризику пошкодження касет.

Експлуатаційна значущість проєкту підкреслюється створенням стабільних умов праці для персоналу цеху. Автоматизація дозволяє уникнути різких перепадів температури (так званих «температурних шоків»), які часто виникають у неавтоматизованих системах при зміні режимів роботи обладнання. Наявність системи дистанційного моніторингу та диспетчеризації надає інженерним службам можливість вести облік зекономленої енергії та отримувати сповіщення про необхідність обслуговування (наприклад, заміну фільтрів) на основі фактичного стану системи, а не за календарним планом. Таким чином, перехід до автоматизованого керування рекуперацією є стратегічно необхідним кроком для підвищення енергетичної незалежності виробництва та мінімізації впливу людського фактора на критичні інженерні процеси.

Висновки за розділом

У першому розділі було проведено комплексний аналіз сучасного стану технологій рекуперації повітря та методів їх автоматизації в умовах промислового виробництва. Досліджено основні типи промислових рекупераційних систем, серед яких найбільш ефективними для умов цеху

визначено пластинчасті та роторні теплообмінники. Встановлено, що вибір конкретного типу обладнання залежить від необхідного коефіцієнта корисної дії, ступеня ізоляції повітряних потоків та фізичних обмежень виробничого майданчика. Проаналізовано методи та технічні засоби автоматизації, що застосовуються для керування процесами теплообміну. Виявлено, що для забезпечення високої точності підтримання температурних параметрів найдоцільнішим є використання алгоритмів ПД-регулювання, реалізованих на базі сучасних програмованих логічних контролерів. Це дозволяє системі адаптуватися до нестационарних зовнішніх умов та мінімізувати перерегулювання.

Виконано огляд існуючих рішень для моніторингу та диспетчеризації параметрів повітряного середовища. Доведено, що сучасна архітектура автоматизації повинна мати багаторівневу структуру: від інтелектуальних датчиків з уніфікованими сигналами (4-20 мА, Modbus) до систем верхнього рівня (HMI/SCADA). Встановлено, що використання промислового стандарту PROFINET забезпечує необхідну швидкість та надійність обміну даними у заводо захищеному середовищі цеху. Обґрунтовано технічну доцільність та економічну необхідність автоматизації рекупераційної системи. Впровадження автоматизованого керування дозволяє не лише знизити споживання енергоносіїв на 20-30%, а й забезпечує гарантований захист дорогого обладнання від аварійних режимів, зокрема від обмерзання теплообмінника в зимовий період. Як апаратну базу для подальшої розробки обрано промисловий логічний контролер серії Siemens S7-1200. Даний вибір зумовлений його високою надійністю, розвиненими можливостями обробки аналогових сигналів, наявністю вбудованих функцій ПД-регулювання та зручністю інтеграції в цифрову інфраструктуру підприємства.

Результати аналізу, проведеного у першому розділі, є теоретичним та технічним підґрунтям для розробки структурних схем, вибору елементної бази та створення прикладного програмного забезпечення у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РЕКУПЕРАТОРОМ

2.1. Розробка структурно-функціональної схеми системи керування

Розробка структурно-функціональної схеми є визначальним етапом проєктування, оскільки вона візуалізує логіку взаємодії всіх апаратних модулів та інформаційні потоки всередині системи автоматичного керування (САК). Запропонована архітектура побудована на принципах ієрархічності та функціональної повноти, що забезпечує стабільну роботу промислової рекупераційної установки в умовах змінного теплового навантаження. Структурно-функціональна схема розробленої системи наведена на рис. 2.1.

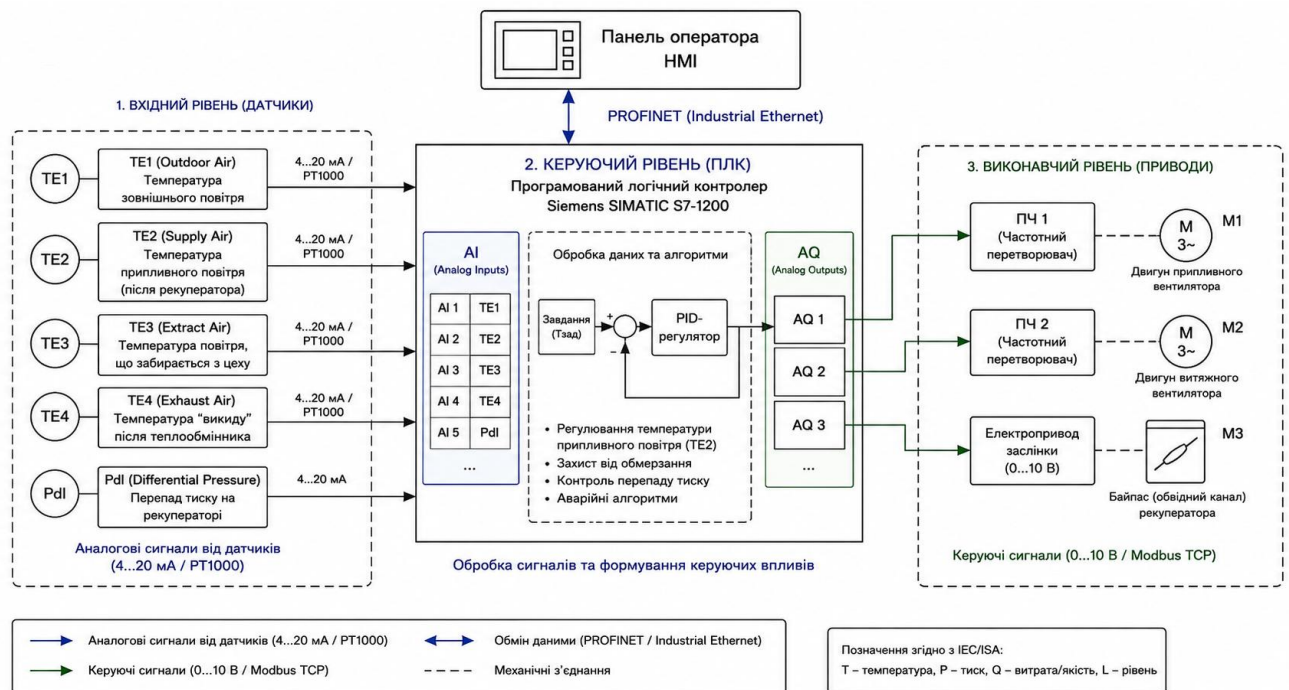


Рис. 2.1. Структурно-функціональна схема системи автоматизації рекуператора

Основою системи є програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200, який виконує роль центрального інтелектуального вузла для збору, обробки даних та формування керуючих директив. Інформаційний (вхідний) рівень системи представлений розгалуженою мережею аналогових датчиків, сигнали від яких (4...20 мА або РТ1000) надходять на модулі аналогових входів (AI) ПЛК. Для комплексного моніторингу термодинамічного процесу використовуються термоперетворювачі TE1 (температура зовнішнього повітря), TE2 (температура припливного повітря), TE3 (температура повітря, що забирається з цеху) та TE4 (температура викиду після теплообмінника). Окрему роль відіграє датчик диференційного тиску PdI, який забезпечує безперервний контроль перепаду тиску на рекуператорі, що необхідно для детектування забруднення фільтрів або початку процесу обмерзання ламелей.

Програмна реалізація керування базується на використанні блоку ПІД-регулятора, який у реальному часі здійснює порівняння поточного значення температури припливного повітря (дані від TE2) із заданою уставкою (Тзад). На основі розрахованої неузгодженості контролер формує вихідні керуючі сигнали на рівень виконавчих механізмів. Виконавчий рівень САК включає частотні перетворювачі ПЧ 1 та ПЧ 2, що забезпечують енергоефективне регулювання швидкості двигунів припливного та витяжного вентиляторів (М1 та М2) відповідно до технологічної потреби. Також до складу виконавчих пристроїв входить електропривод заслінки М3, який керує положенням байпаса (обвідного каналу), що є ключовим елементом захисту теплообмінника від замерзання.

Для забезпечення людино-машинної взаємодії та дистанційного моніторингу до контролера через промисловий стандарт Industrial Ethernet (PROFINET) підключена панель оператора (HMI). Це дозволяє технічному персоналу візуалізувати стан системи, змінювати параметри регулювання та

оперативно реагувати на аварійні сповіщення. Запропонована структура САК забезпечує високу точність підтримання заданого мікроклімату цеху при мінімальних витратах енергоресурсів, створюючи надійну базу для подальшої технічної реалізації проекту.

2.2. Розрахунок потужності електродвигунів вентиляторних установок

Вибір електропривода для рекупераційної системи цеху базується на необхідності забезпечення нормованого повітрообміну при мінімальних витратах електричної енергії. Основними вихідними параметрами для проведення інженерного розрахунку є продуктивність системи за об'ємом повітря та сумарний аеродинамічний опір, який повинен подолати вентиляторний агрегат. Оскільки в системі використовуються два окремі контури (припливний та витяжний), розрахунок потужності виконується для кожного електродвигуна окремо, враховуючи специфіку встановленого на кожному напрямку обладнання.

Першочерговим завданням є визначення необхідної продуктивності системи L (м³/год), яка для промислового цеху зазвичай розраховується виходячи з кратності повітрообміну або потреби асиміляції теплонадлишків. Для даного проекту прийнято розрахункове значення продуктивності припливного вентилятора на рівні $L = 8000$ м³/год, що забезпечує необхідні санітарно-гігієнічні норми повітряного середовища для робочої зони цеху. Продуктивність витяжного вентилятора зазвичай приймається на 5–10% нижчою для створення невеликого підпору повітря, що запобігає проникненню неочищеного зовнішнього повітря крізь нещільності огорожувальних конструкцій.

Наступним кроком є визначення повного тиску ΔP (Па), що складається з опору повітропроводів, фільтрів, калориферів та безпосередньо теплообмінного блоку рекуператора. У промислових системах із пластинчастими або роторними рекуператорами аеродинамічний опір самого теплообмінника є значним і може коливатися в межах 150–350 Па залежно від швидкості потоку. Враховуючи опір системи фільтрації класу G4 або F7 та розгалужену мережу повітропроводів цеху, сумарний розрахунковий тиск для припливного контуру прийнято рівним $\Delta P = 600$ Па.

Потужність на валу вентилятора P_w (кВт) є функцією від об'ємної витрати та тиску, і визначається за наступною залежністю [11]:

$$P_w = \frac{L \cdot \Delta P}{3600 \cdot 1000 \cdot \eta_v} \quad (2.1)$$

де L — продуктивність (м³/год); ΔP — повний тиск (Па); η_v — коефіцієнт корисної дії вентилятора, який для сучасних відцентрових моделей із загнутими назад лопатками становить 0,65–0,75. Дана потужність відображає лише чисту енергію, необхідну для переміщення повітряних мас, без урахування втрат у механічній передачі та безпосередньо в обмотках електродвигуна.

Для визначення встановленої потужності електродвигуна необхідно врахувати втрати енергії у вузлах передачі та забезпечити певний експлуатаційний запас потужності, що гарантує стабільну роботу приводу при пускових режимах або короточасних перевантаженнях. Встановлена потужність приводу P_{inst} (кВт) розраховується за формулою [11]:

$$P_{inst} = \frac{P_w \cdot k}{\eta_{tr}} \quad (2.2)$$

де k — коефіцієнт запасу потужності, який для вентиляторних установок даної продуктивності приймається в межах 1,1–1,15; η_{tr} —

коефіцієнт корисної дії передачі. Оскільки в сучасних рекупераційних установках найчастіше застосовується пряма передача моменту (робоче колесо встановлено безпосередньо на валу двигуна), значення η_{tr} приймається рівним 1,0. Підставляючи раніше отримане розрахункове значення потужності на валу ($P_w \approx 1,90$ кВт) та враховуючи коефіцієнт запасу $k = 1,15$, отримуємо необхідну встановлену потужність $P_{inst} = 1,90 \cdot 1,15 = 2,185$ кВт.

На основі отриманого розрахункового значення здійснюється вибір стандартного електродвигуна з лінійки промислових приводів. Враховуючи вимоги до енергоефективності та надійності, що були визначені у першому розділі, доцільно обрати трифазний асинхронний двигун із короткозамкненим ротором серії Siemens SIMOTICS GP 1LE1. Згідно з технічним каталогом виробника, найближчою більшою стандартною номінальною потужністю є 2,2 кВт. Для забезпечення оптимальних аеродинамічних характеристик вентилятора обрано 4-полюсну модифікацію двигуна з номінальною частотою обертання близько 1450 об/хв (типорозмір 100L). Двигуни даної серії відповідають класу енергоефективності IE3 (Premium Efficiency), що мінімізує експлуатаційні витрати цеху [12].

Вибір двигуна з вказаними характеристиками є лише частиною завдання автоматизації. Оскільки реальна потреба у повітрообміні може змінюватися залежно від завантаження цеху, пряме підключення двигуна до мережі призвело б до значних втрат енергії. Тому в проєкті передбачено використання частотних перетворювачів для кожного з двигунів (M1 та M2 на структурній схемі). Частотне регулювання дозволяє системі плавно змінювати продуктивність вентиляторів у діапазоні від 20% до 100%, підтримуючи стабільний тиск у повітропроводах. Це не тільки забезпечує економію електроенергії згідно з квадратичною залежністю моменту від швидкості, а й суттєво зменшує пускові струми та механічне зношування

підшипникових вузлів, що повністю підтверджує технічну та економічну доцільність обраного інженерного рішення.

Згідно з проведеними розрахунками та враховуючи необхідність уніфікації обладнання для обох контурів вентиляції (припливного та витяжного), для реалізації системи було обрано конкретну модель електродвигуна з лінійки енергоефективних приводів Siemens.

Вибір зупинено на моделі Siemens SIMOTICS GP 1LE1003-1AB4 зображений на рисунку 2.2. Цей двигун поєднує в собі високу надійність промислового виконання та сучасні стандарти енергозбереження, що є критично важливим для систем, які працюють у безперервному режимі [12].

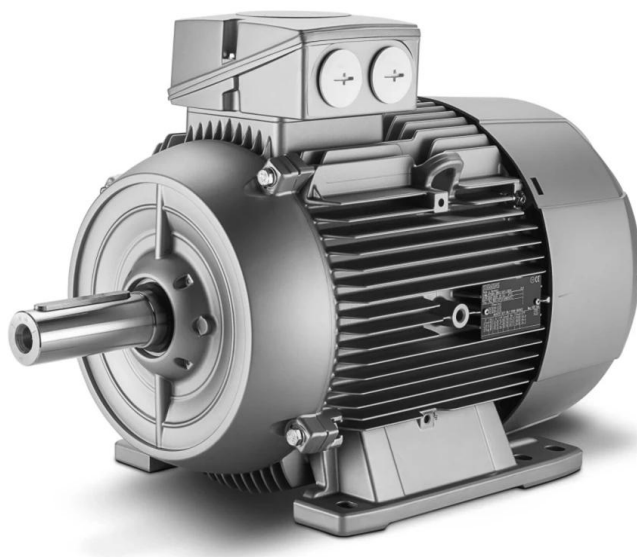


Рис. 2.2 Зовнішній вигляд електродвигуна Siemens SIMOTICS GP 1LE1003-1AB4

Для забезпечення точності подальшого проєктування та коректного налаштування частотних перетворювачів, основні технічні параметри обраного двигуна зведено в таблицю 2.1.

Обраний двигун має оптимальне співвідношення маси до потужності, а його ступінь захисту IP55 дозволяє надійно експлуатувати привід в умовах

промислового цеху з підвищеним рівнем запиленості. Використання алюмінієвого корпусу в серії GP (General Purpose) забезпечує ефективне відведення тепла, що подовжує термін служби ізоляції обмоток при роботі з частотним регулюванням.

Таблиця 2.1. Технічні характеристики електродвигуна Siemens SIMOTICS GP 1LE1003-1AB4

Параметр	Значення
Тип двигуна	Асинхронний з короткозамкненим ротором
Клас енергоефективності	IE3 (Premium Efficiency)
Номінальна потужність (P_n)	2,2 кВт
Типорозмір (Frame size)	100L
Кількість полюсів	4
Номінальна частота обертання (n_n)	1455 об/хв
Номінальна напруга (U_n)	400 В (трифазна)
Номінальний струм (I_n)	4,6 А (при 400 В)
Коефіцієнт потужності ($\cos \phi$)	0,81
Номінальний момент (M_n)	14,4 Нм
Ступінь захисту	IP55
Матеріал корпусу	Алюміній

Дані технічні характеристики, зокрема номінальний струм 4,6 А, будуть використані на наступних етапах проєктування для вибору апаратури захисту (автоматичних вимикачів) та параметризації частотних

перетворювачів у середовищі TIA Portal. Використання ідентичних двигунів для позицій M1 та M2 дозволяє спростити процес технічного обслуговування системи та мінімізувати кількість запасних частин на складі підприємства.

2.3. Обґрунтування вибору та технічні характеристики програмованого логічного контролера

Вибір центрального керуючого пристрою є критичним етапом проєктування, оскільки саме від його обчислювальної потужності, надійності та комунікаційних можливостей залежить ефективність реалізації алгоритмів рекуперації та захисту. Для даної системи автоматизації обрано програмований логічний контролер (ПЛК) серії Siemens SIMATIC S7-1200, а саме модель CPU 1214C DC/DC/DC представлений на рисунку 2.3. Цей вибір обумовлений оптимальною інтеграцією контролера в сучасні промислові мережі та наявністю розширеного набору вбудованих технологічних функцій, необхідних для регулювання параметрів повітряного середовища [13].



Рис. 2.3 Зовнішній вигляд ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C

Модель CPU 1214C DC/DC/DC характеризується високою швидкістю та наявністю значного обсягу пам'яті (100 Кбайт робочої пам'яті), що дозволяє безперешкодно виконувати складні обчислювальні операції, пов'язані з ПІД-регулюванням температури припливного повітря. Контролер оснащений вбудованим інтерфейсом PROFINET, що забезпечує швидкісний обмін даними з частотними перетворювачами та панеллю оператора за єдиним стандартом Industrial Ethernet. Це дозволяє створювати гнучкі архітектури моніторингу та легко інтегрувати систему рекуперації в загальну цифрову інфраструктуру підприємства.

Технічна конфігурація (таб. 2.2) обраного контролера включає 14 вбудованих дискретних входів та 10 дискретних виходів, що повністю задовольняє потреби системи в обробці логічних сигналів стану обладнання. Особливу увагу варто приділити наявності двох інтегрованих аналогових входів (0...10 В), які використовуються для підключення первинних датчиків без застосування додаткових модулів розширення, що позитивно впливає на економічну ефективність проєкту. Використання транзисторних виходів (DC/DC/DC) забезпечує високу частоту комутації та довговічність системи, що є важливим при формуванні сигналів керування для периферійних пристроїв [13].

Важливою перевагою обраного ПЛК є його повна сумісність з інженерним середовищем TIA Portal. Це дозволяє використовувати готові програмні блоки для налаштування частотних перетворювачів та панелей візуалізації, значно спрощуючи процес налагодження системи. Вбудовані функції веб-сервера та підтримка протоколу Modbus TCP розширюють можливості дистанційного керування, роблячи систему рекуперації відповідною концепції Industry 4.0.

Таблиця 2.2. Основні технічні характеристики ПЛК Siemens SIMATIC S7-1200 CPU 1214C

Параметр	Значення
Тип процесора	CPU 1214C DC/DC/DC
Робоча пам'ять	100 Кбайт
Напруга живлення	24 В постійного струму (DC)
Кількість вбудованих DI / DO	14 / 10
Кількість вбудованих AI	2 (0...10 В)
Комунікаційні інтерфейси	1 x RJ45 (PROFINET)
Кількість ПІД-регуляторів	До 16 контурів
Ступінь захисту	IP20
Робоча температура	від -20 до +60 °C

Таким чином, Siemens S7-1200 CPU 1214C є надійним та технологічно досконалим фундаментом для побудови системи автоматичного керування параметрами повітряного середовища промислового цеху.

2.4. Вибір та обґрунтування периферійного обладнання та виконавчих механізмів

2.4.1 Силові перетворювальні пристрої та засоби керування приводами

Для реалізації стратегії енергоефективного керування, обґрунтованої на попередніх етапах проєктування, необхідно обрати перетворювачі частоти

(ПЧ), які забезпечать точну модуляцію швидкості обертання двигунів припливного та витяжного вентиляторів. Враховуючи обрану апаратну платформу Siemens та необхідність повної програмної сумісності, найбільш раціональним рішенням є використання компактних частотних перетворювачів серії SINAMICS G120C (рис. 2.4). Дана серія спеціально розроблена для інтеграції в системи автоматизації, де критичними є компактність, надійність та підтримка мережевих протоколів реального часу [14].



Рис. 2.4 Загальний вигляд частотних перетворювачів серії Siemens SINAMICS G120C різних типорозмірів

Для обраних електродвигунів потужністю 2,2 кВт застосовується модель SINAMICS G120C PN (типорозмір FSA), детальні технічні характеристики якої представлені в таблиці 2.3. Вибір модифікації з індексом "PN" є стратегічним рішенням, оскільки вона оснащена вбудованим двопортовим інтерфейсом PROFINET. Це дозволяє інтегрувати привід у єдину цифрову мережу з контролером S7-1200 без використання додаткових

комунікаційних модулів. Через цей інтерфейс ПЛК отримує не лише можливість керування швидкістю, а й доступ до розширеної діагностичної інформації, такої як поточне споживання струму, крутний момент на валу та тепловий стан обмоток двигуна, що є основою для реалізації системи енергомоніторингу цеху.

Технічне обґрунтування вибору SINAMICS G120C також включає наявність вбудованої функції безпечного зняття моменту Safe Torque Off (STO), що відповідає сучасним вимогам безпеки праці на виробництві. Використання векторного керування в даних перетворювачах гарантує підтримку стабільного моменту навіть на низьких частотах обертання, що важливо при роботі рекуператора в режимах зниженої продуктивності. Плавний запуск та зупинка, що реалізуються перетворювачем, повністю усувають пускові кидки струму та зменшують динамічні навантаження на підшипникові вузли та елементи кріплення вентиляторних установок [14].

Таблиця 2.3. Технічні характеристики перетворювача частоти SINAMICS G120C-PN

Параметр	Значення
Номінальна потужність	2,2 кВт
Вхідна напруга	3AC 380...480 В
Номінальний вихідний струм	5,6 А
Інтерфейс зв'язку	PROFINET (Industrial Ethernet)
Перевантажувальна здатність	150% протягом 60 с
Метод керування	Векторне / Скалярне (U/f)
Ступінь захисту	IP20
Габаритні розміри (ШхВхГ)	73 x 196 x 203 мм

Використання ідентичних перетворювачів для позицій ПЧ 1 та ПЧ 2 (згідно зі структурною схемою) дозволяє уніфікувати процес програмування в середовищі TIA Portal. Це дає змогу використовувати єдиний блок керування (SINA_SPEED) у програмі ПЛК, що скорочує час на розробку алгоритмів синхронізації припливного та витяжного потоків повітря.

2.4.2. Вимірювальні перетворювачі параметрів повітряного середовища

Функціонування системи автоматичного керування рекуператором базується на отриманні достовірних та точних даних про стан повітряних потоків у реальному часі. Для моніторингу температурних режимів у каналах припливу, витяжки, а також на вході зовнішнього повітря обрано каналні датчики температури Siemens QAM2120.040. Вибір даної моделі зумовлений використанням пасивного вимірювального елемента RT1000, який характеризується високою лінійністю, довготривалою стабільністю та мінімальним впливом опору з'єднувальних дротів на результат вимірювання [15].

Конструкція датчика з довжиною занурювальної частини 400 мм дозволяє отримувати інтегральне (усереднене) значення температури по всьому перетину повітропроводу. Це є критично важливим для великих промислових каналів, де можливе нерівномірне розслоєння повітряних мас. Завдяки високій точності вимірювання ($\pm 0,3$ С при 0 С) контролер отримує можливість реалізувати прецизійне ПД-регулювання, мінімізуючи витрати енергії на догрів повітря. Загальний вигляд обраного температурного датчика представлено на рис. 2.5 [15].

Окрім температурного контролю, система потребує безперервного моніторингу аеродинамічного стану теплообмінного блока. Для детектування забруднення фільтрів та визначення моменту початку процесу обмерзання

рекуператора обрано диференціальний датчик тиску Siemens QBM81-3, зовнішній вигляд якого наведено на рис. 2.6 [16].



Рис. 2.5 Канальний датчик температури серії Siemens QAM

Принцип його роботи базується на вимірюванні різниці тисків до та після теплообмінника. Різке зростання цього показника понад встановлену межу сигналізує про перекриття каналів інєєм, що є командою для ПЛК на негайну активацію режиму відтавання через обвідний канал (байпас).



Рис. 2.6 Диференціальний датчик тиску Siemens QBM81-3

Зведені технічні характеристики обраних вимірювальних пристроїв, що забезпечують інформаційну надійність системи, представлені в табл. 2.4 [16].

Таблиця 2.4. Технічні характеристики вимірювальних пристроїв системи

Параметр	Датчик температури QAM2120.040	Датчик тиску QBM81-3
Тип сенсора	PT1000	Механічна мембрана
Вихідний сигнал	Опір (пасивний)	Дискретний («сухий контакт»)
Діапазон вимірювання	-50...+80 °C	\$20...300\$ Па
Похибка / Чутливість	±0,3 °C	±5 Па
Ступінь захисту	IP54	IP54

2.4.3. Виконавчі механізми керування повітряними потоками

Завершальним етапом формування апаратної структури системи є вибір виконавчих механізмів, які здійснюють безпосередній фізичний вплив на об'єкт керування. У системах рекуперації повітря критично важливим вузлом є обвідний канал (байпас), який дозволяє спрямувати частину припливного повітря повз теплообмінник для запобігання його обмерзанню. Для забезпечення точного та плавного регулювання положення повітряної заслінки байпаса обрано електропривод серії Belimo LM24A-SR. Вибір даного компонента базується на його здатності працювати в режимі модуляції, що є необхідною умовою для реалізації прецизійних алгоритмів енергозбереження.

На відміну від двопозиційних приводів (відкрито/закрито), модель LM24A-SR підтримує керування аналоговим сигналом напруги в діапазоні 0...10 В. Це надає контролеру Siemens S7-1200 можливість не просто активувати режим відтавання, а плавно змінювати пропорцію повітряних потоків, підтримуючи температуру витяжного повітря на межі точки роси. Такий підхід дозволяє зберігати процес рекуперації активним навіть у складних погодних умовах, уникаючи різких коливань температури припливного повітря в цеху. Зовнішній вигляд обраного виконавчого механізму представлено на рис. 2.5 [17].



Рис. 2.5. Електропривод повітряної заслінки Belimo LM24A-SR

Приводи швейцарської компанії Belimo характеризуються високою надійністю та тривалим терміном експлуатації без необхідності технічного обслуговування. Модель LM24A-SR оснащена захистом від перевантажень у всьому діапазоні ходу, що виключає пошкодження механічних частин заслінки при виникненні перешкод. Основні технічні характеристики пристрою, необхідні для подальшого проєктування електричних схем, наведено в табл. 2.5 [17].

Таблиця 2.5. Технічні характеристики електропривода Belimo LM24A-SR

Параметр	Значення
Крутний момент	5 Нм
Напруга живлення	24 В AC/DC
Тип керуючого сигналу	Аналоговий 0...10 В
Кут повороту	Макс. 95°
Час ходу на 90°	150 с
Клас захисту корпусу	IP54
Робочий діапазон температур	від -30 до +50 °C

Завдяки уніфікованому керуючому сигналу та низькому енергоспоживанню, обраний привід легко інтегрується в загальну систему автоматизації, забезпечуючи високу динамічну точність регулювання. Таким чином, повна комплектація периферійного обладнання, що включає частотні перетворювачі, вимірювальні датчики та виконавчі приводи, створює завершену апаратну базу для реалізації автоматизованої системи рекуперації повітря.

2.5. Розробка принципової електричної схеми системи

Принципова електрична схема є основним технічним документом, який визначає повний склад електричних елементів системи та зв'язки між ними, забезпечуючи детальне уявлення про принципи роботи автоматики. Розробка схеми базується на інтеграції силового обладнання та низьковольтних ланцюгів керування в єдину структуру, що відповідає вимогам електробезпеки та завадостійкості. Схема охоплює три основні рівні: систему розподілу живлення та захисту, силові ланцюги електроприводів та слабкострумові ланцюги контролера і периферійних пристроїв. Загальний вигляд розробленої принципової електричної схеми системи автоматизації наведено на рис. 2.6.

Силова частина схеми розрахована на роботу від трифазної мережі змінного струму з напругою 380 В і частотою 50 Гц. Для забезпечення захисту від коротких замикань та перевантажень на вході системи встановлюється загальний автоматичний вимикач, номінал якого розрахований на сумарну потужність двох двигунів та допоміжного обладнання. Живлення до електродвигунів вентиляторів M1 та M2 подається через індивідуальні перетворювачі частоти Siemens SINAMICS G120C. Кожен перетворювач захищений окремим автоматичним вимикачем (наприклад, серії Siemens 5SY), підібраним з урахуванням пускових характеристик та номінального струму двигуна 4,6 А. З'єднання між ПЧ та двигунами виконується екранованим кабелем для мінімізації електромагнітних завад, що можуть впливати на роботу аналогових датчиків.

Ланцюги керування та живлення автоматики побудовані на використанні постійного струму напругою 24 В, що забезпечується імпульсним блоком живлення (наприклад, серії Siemens SITOP). Це гарантує гальванічну розв'язку від силової мережі та стабільність роботи мікропроцесорної техніки.

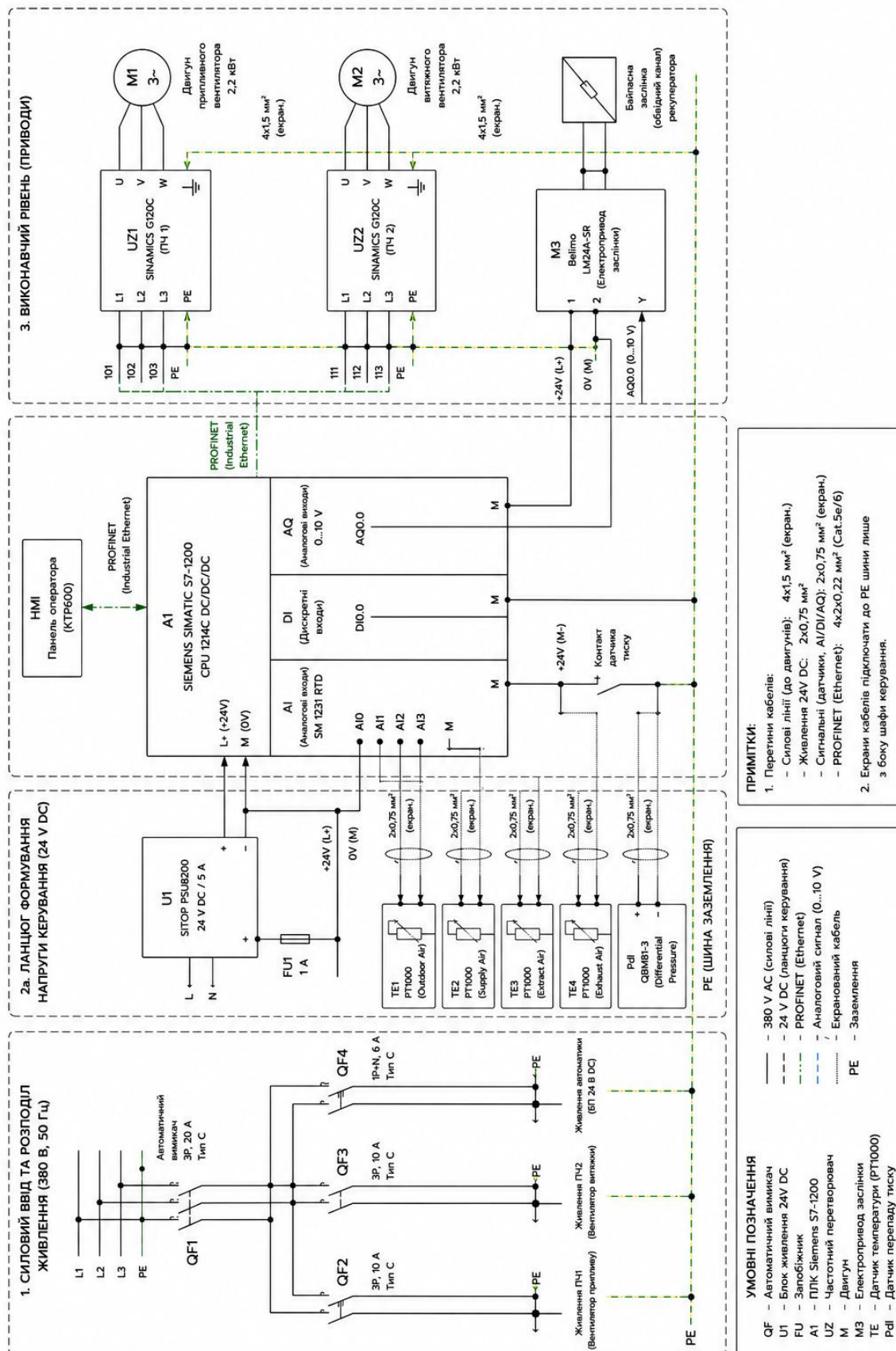


Рис. 2.6. Принципова електрична схема системи автоматичного керування рекуператором

Програмований логічний контролер Siemens S7-1200 CPU 1214C підключається до шини 24 В через індивідуальний захист. Аналогові датчики температури TE1–TE4 (PT1000) під'єднуються до аналогових входів

контролера за двопровідною схемою з використанням екранованої крученої пари. Диференціальний датчик тиску PdI підключається до дискретного входу ПЛК, формуючи сигнал логічної одиниці при досягненні критичного перепаду тиску.

Окрему увагу приділено схемі підключення виконавчого механізму заслінки байпаса Belimo LM24A-SR. Привід живиться напругою 24 В та отримує керуючий сигнал 0–10 В від модуля аналогового виходу контролера. Для забезпечення цілісності сигналів у заводозахищеному середовищі цеху всі слабкострумові кабелі прокладаються окремо від силових ліній у металевих лотках або гофрованих трубах. Розроблена принципова схема також передбачає наявність світлосигнальної арматури на дверцятах шафи керування для візуалізації станів «Робота», «Аварія» та «Мережа», що підвищує зручність експлуатації та швидкість діагностики системи персоналом. Таким чином, розроблена електрична структура є технічно завершеною та готовою до етапу монтажу та програмного налаштування.

Висновки за розділом

У другому розділі було виконано повний цикл проєктування апаратної частини системи автоматичного керування рекупераційною установкою цеху. На основі розробленої структурно-функціональної схеми визначено ієрархічну архітектуру системи, де центральним інтелектуальним вузлом обрано програмований логічний контролер Siemens SIMATIC S7-1200. Проведений розрахунок аеродинамічних параметрів вентиляційних контурів дозволив технічно обґрунтувати вибір приводної частини, що складається з двох енергоефективних асинхронних двигунів Siemens потужністю по 2,2 кВт кожен.

Для забезпечення гнучкого регулювання повітрообміну та зниження енерговитрат впроваджено систему частотного керування на базі перетворювачів SINAMICS G120C, які інтегровані у єдину цифрову мережу за протоколом PROFINET. Інформаційне забезпечення системи реалізовано через розгалужену мережу прецизійних датчиків температури та диференційного тиску, що дозволяє здійснювати безперервний моніторинг термодинамічного процесу та забезпечувати надійний захист теплообмінника від обмерзання. Використання електропривода Belimo з аналоговим керуванням для обвідного каналу дозволяє реалізувати стратегію плавного перерозподілу повітряних потоків, що підвищує стабільність роботи системи у критичних погодних умовах.

Завершальним етапом проектування стала розробка принципової електричної схеми, яка об'єднує силові кола та ланцюги керування у цілісну структуру, що відповідає сучасним вимогам електробезпеки та завадостійкості. Сформована апаратна база та обрані технічні рішення є достатнім підґрунтям для подальшої розробки алгоритмічного забезпечення та створення прикладного програмного забезпечення у наступних розділах кваліфікаційної роботи.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ

3.1. Розробка алгоритму функціонування системи рекуперації

На завершальному етапі проєктування критично важливим є створення логічної структури керування, яка забезпечить злагоджену взаємодію всіх апаратних компонентів, обраних у попередніх розділах. Алгоритм функціонування САК, загальну структуру якого представлено на рис. 3.1, будується на принципі пріоритетності безпеки обладнання та підтримки заданих параметрів мікроклімату цеху. Основний цикл програми передбачає послідовне виконання операцій опитування датчиків, обчислення керуючих впливів за ПД-законом та видачу команд на виконавчі механізми. Логіка керування розділена на кілька функціональних режимів: пусковий режим, режим стабілізації та режим захисту від обмерзання.

Пускова послідовність системи розпочинається з перевірки стану всіх датчиків та відсутності аварійних сигналів від частотних перетворювачів. Першочергово подається команда на відкриття повітряних заслінок припливного та витяжного каналів. Лише після отримання сигналу про повне відкриття заслінок ПЛК активує частотні перетворювачі вентиляторів. Такий порядок запобігає виникненню надлишкового тиску або розрідження в повітропроводах, що могло б призвести до механічних пошкоджень елементів системи. Продуктивність вентиляторів плавно наростає до виходу на робочу точку, після чого система переходить у режим автоматичного регулювання температури припливного повітря.

Центральне місце в алгоритмі займає підсистема антифризового захисту теплообмінника. Контролер безперервно порівнює перепад тиску на

рекуператорі з граничним значенням та аналізує температуру витяжного повітря після касети.

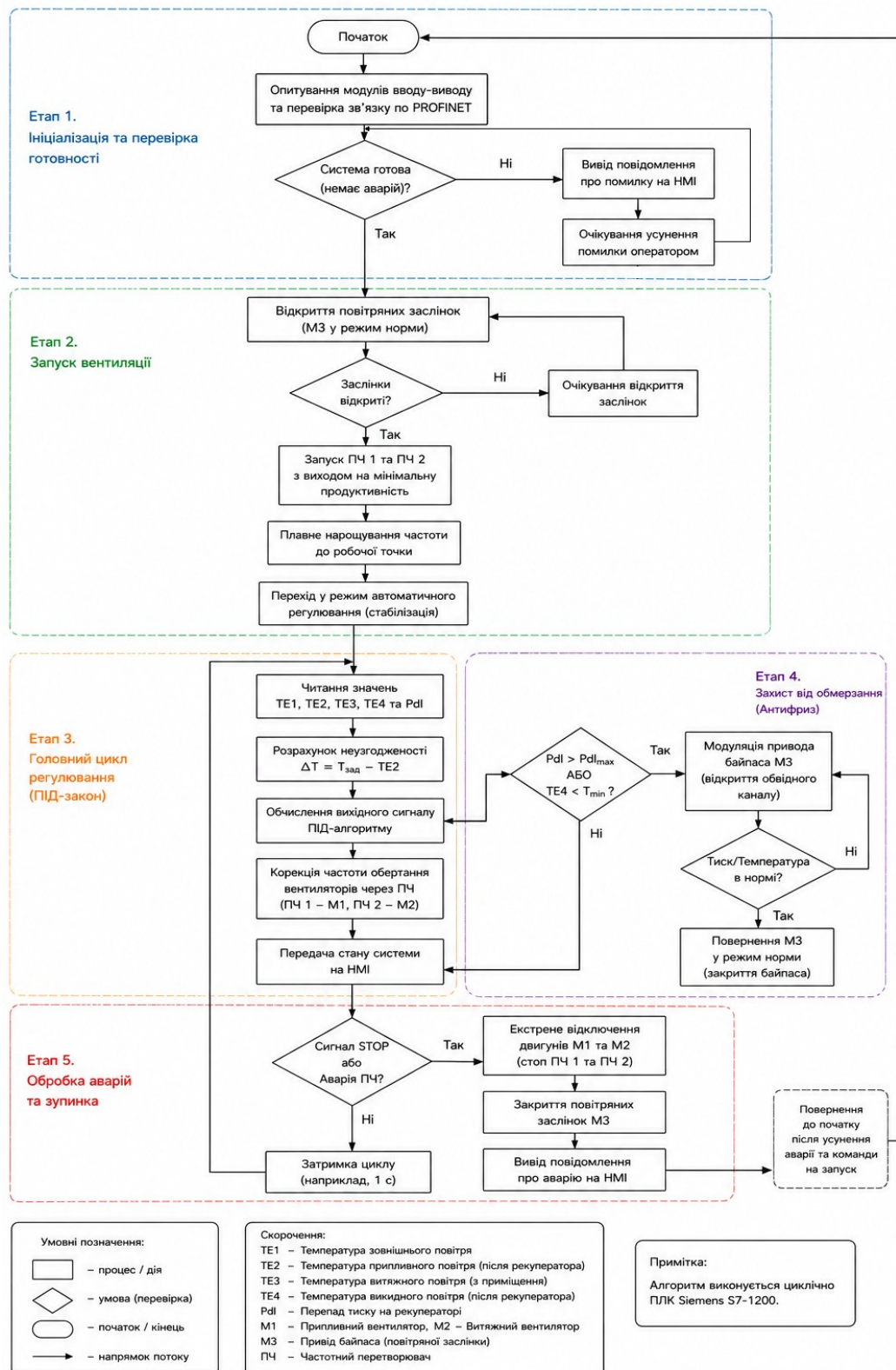


Рис. 3.1. Блок-схема алгоритму функціонування системи автоматизації рекуператора

У разі виявлення ознак обмерзання (зростання опору або падіння температури витяжки нижче критичної межі) активується алгоритм модуляції байпаса. Електропривод заслінки плавно відкриває обвідний канал, спрямовуючи частину холодного зовнішнього повітря повз рекуператор. Це призводить до підвищення температури стінок теплообмінника за рахунок теплоти витяжного потоку та ефективного видалення інею без повної зупинки вентиляції. Після стабілізації тиску та температури система автоматично повертається до стандартного режиму рекуперації.

Окрім основних технологічних завдань, алгоритм включає блоки обробки аварійних ситуацій. При виході будь-якого критичного параметра за встановлені межі (наприклад, перегрів двигуна або втрата зв'язку з частотним перетворювачем по PROFINET) система виконує безаварійну зупинку: вентилятори відключаються, а заслінки закриваються для відсікання цеху від зовнішнього середовища. Вся інформація про стан системи та поточні режими роботи передається на панель оператора, що забезпечує прозорість процесу та зручність експлуатації.

3.2. Алгоритми підпрограм та програмна реалізація функціональних блоків

Перехід від загального алгоритму до безпосереднього програмування ПЛК вимагає декомпозиції системи на окремі функціональні модулі. Програмне забезпечення розробляється за принципом модульності, де кожна підпрограма (функція FC або функціональний блок FB) відповідає за конкретний технологічний вузол. Це дозволяє спростити налагодження системи та забезпечити високу швидкість виконання циклу ПЛК.

Першочерговим завданням програми є перетворення «сирих» цифрових даних, що надходять від модулів аналогового вводу, у фізичні величини, які

використовуються алгоритмами регулювання та відображаються на панелі оператора. Для цього розроблено підпрограму масштабування FC_Scale. Оскільки в системі використовуються датчики різного призначення (температури та тиску), блок реалізовано як універсальний інструмент обробки сигналів. Алгоритм роботи даної підпрограми наведено на рис. 3.2.

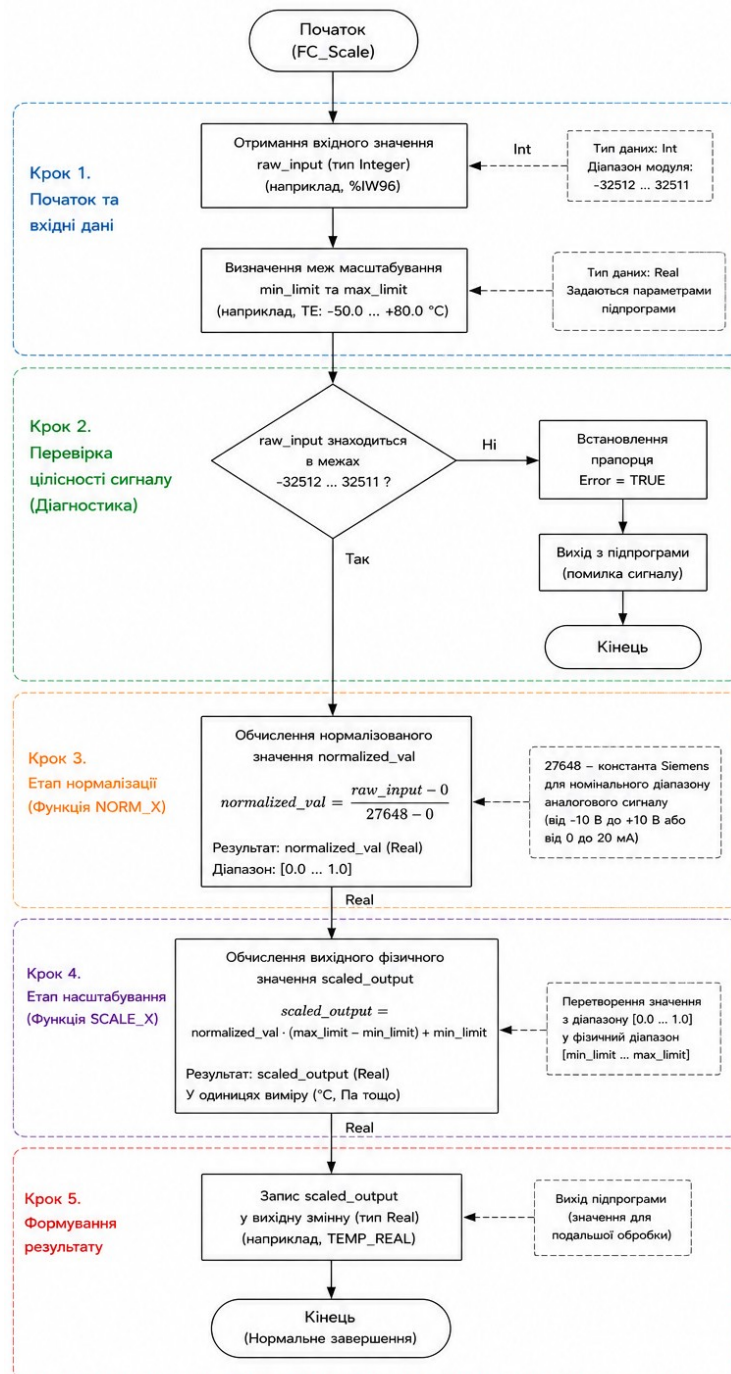


Рис. 3.2. Алгоритм підпрограми масштабування аналогових сигналів (FC_Scale)

Логіка роботи підпрограми базується на двоступеневому математичному перетворенні. На першому етапі здійснюється нормалізація вхідного цілого числа (0–27648) у відносне значення типу Real в діапазоні [0.0...1.0]. На другому етапі виконується лінійне масштабування отриманого результату у фізичний діапазон конкретного датчика (наприклад, -50...+80 °С для вимірювання температури). Окремим блоком реалізовано діагностику цілісності каналу, що дозволяє детектувати обрив дроту або коротке замикання через аналіз виходу сигналу за межі номінального діапазону модуля.

Нижче наведено фрагмент програмної реалізації даного алгоритму на мові SCL (Structured Control Language), яка є найбільш ефективною для виконання математичних операцій у середовищі TIA Portal:

```
FUNCTION "FC_Scale" : Real  
  
{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }  
  
VERSION : 0.1  
  
VAR_INPUT  
  
raw_input : Int;    // "Сире" значення з аналогового входу (0-27648)  
  
min_limit : Real;   // Нижня межа фізичного діапазону (напр. -50.0)  
  
max_limit : Real;   // Верхня межа фізичного діапазону (напр. +80.0)  
  
END_VAR  
  
VAR_OUTPUT  
  
error : Bool;       // Прапорець помилки (обрив або КЗ)  
  
END_VAR  
  
VAR_TEMP  
  
norm_value : Real;  // Проміжне нормалізоване значення (0.0 - 1.0)
```

END_VAR

BEGIN

// 1. ДІАГНОСТИКА ЦІЛІСНОСТІ КАНАЛУ

// Перевірка на вихід за межі робочого діапазону модуля (Overflow/Underflow)

IF (#raw_input > 32511) OR (#raw_input < -32512) THEN

#error := TRUE;

#FC_Scale := 0.0; // Скидання виходу при аварії

RETURN; // Переривання виконання функції

ELSE

#error := FALSE;

END_IF;

// 2. НОРМАЛІЗАЦІЯ (Етап 1)

// Перетворення цілого числа в діапазон 0.0...1.0 відповідно до стандарту Siemens

#norm_value := NORM_X(MIN := 0,

VALUE := #raw_input,

MAX := 27648);

// 3. ЛІНІЙНЕ МАСШТАБУВАННЯ (Етап 2)

// Перетворення нормалізованого значення у фізичні одиниці (градуси або паскалі)

#FC_Scale := SCALE_X(MIN := #min_limit,

VALUE := #norm_value,

MAX := #max_limit);

END_FUNCTION

Наступним критично важливим модулем програмного забезпечення є блок керування частотними перетворювачами, який забезпечує фізичну реалізацію стратегії енергоефективної вентиляції. Оскільки приводи вентиляторів припливу (M1) та витяжки (M2) інтегровані в єдину мережу PROFINET, керування ними здійснюється шляхом циклічного обміну телеграмами керування та стану. Для забезпечення незалежності та масштабованості системи розроблено функціональний блок FB_VFD_Control. Алгоритм функціонування даного блоку наведено на рис. 3.3.

Процес розпочинається з верифікації мережевого статусу пристрою в конфігурації ПЛК. Після підтвердження зв'язку алгоритм формує слово керування (STW1), що містить команди на включення силового модуля, зняття блокування та активацію рампи розгону. Паралельно виконується математичне перетворення керуючого сигналу: значення продуктивності, отримане від ПД-регулятора або оператора (0...100%), масштабується у нормалізоване значення (0...16384), яке інтерпретується частотним перетворювачем як завдання швидкості. На завершальному етапі підпрограма здійснює дешифрацію слова стану (ZSW1), виділяючи критичні сигнали про готовність, роботу під навантаженням або наявність активних аварій.

Для програмної реалізації цього алгоритму в середовищі TIA Portal використовується бібліотечна функція SINA_SPEED.

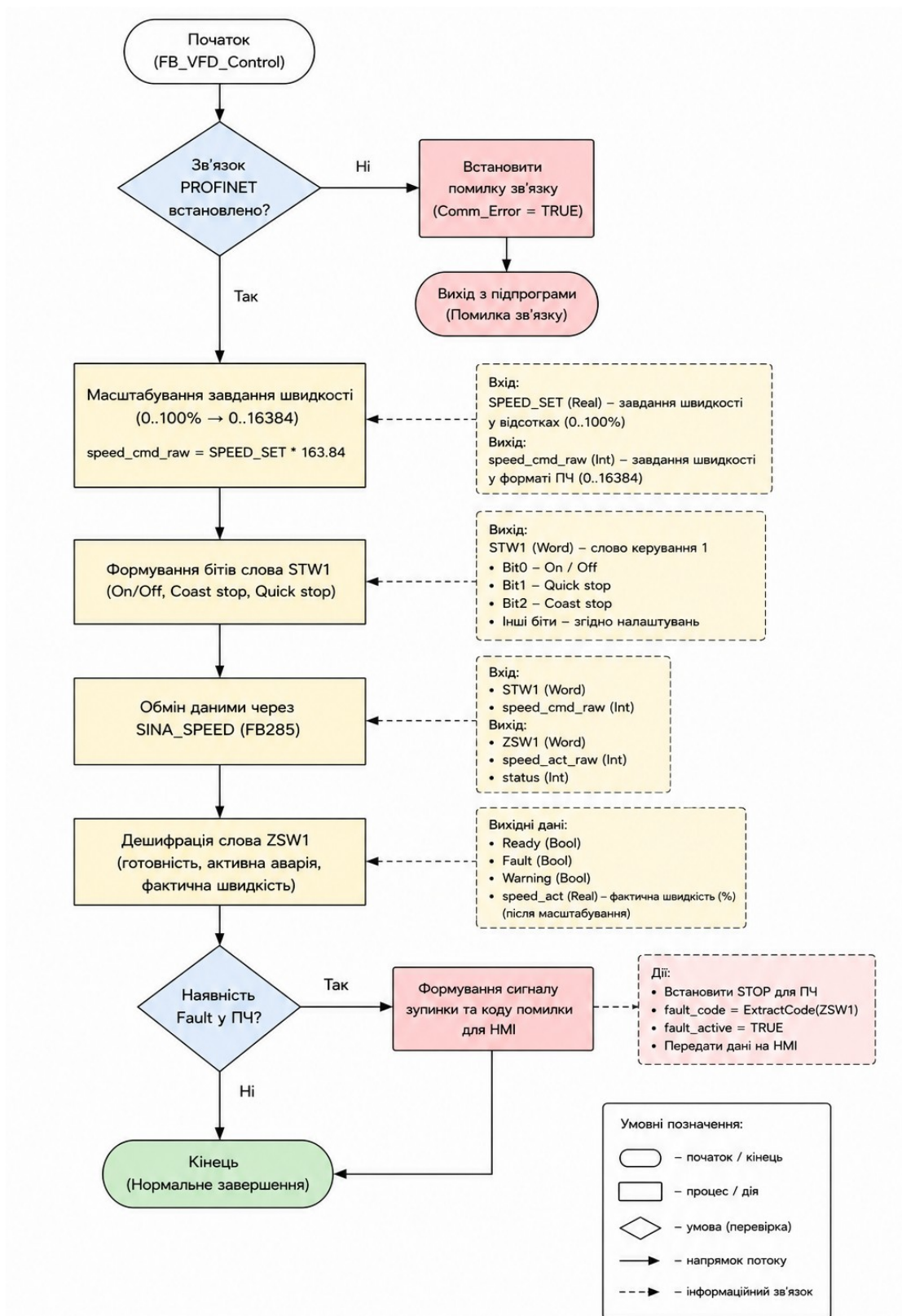


Рис. 3.3. Алгоритм функціонального блоку керування частотним перетворювачем (FB_VFD_Control)

Нижче наведено фрагмент коду на мові SCL, що демонструє виклик цієї функції в структурі розробленого блоку:

```
FUNCTION_BLOCK "FB_VFD_Control"

{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }

VERSION : 0.1

VAR_INPUT

    enable_drive : Bool;      // Команда на запуск привода

    speed_setpoint : Real;    // Завдання швидкості у відсотках (0..100.0%)

    hw_id : HW_ANY;          // Hardware ID частотного перетворювача

    reset_fault : Bool;      // Команда на скидання помилок

END_VAR

VAR_OUTPUT

    actual_speed : Real;      // Фактична швидкість (%)

    drive_ready : Bool;      // Привід готовий до роботи

    drive_running : Bool;    // Привід у роботі (двигун обертається)

    drive_fault : Bool;      // Наявність активної аварії

    error_id : Word;          // Код помилки зв'язку/привода

END_VAR

VAR

    inst_SinaSpeed : "SINA_SPEED"; // Примірник системного блоку керування ПЧ

END_VAR

BEGIN
```

// 1. ВЕРИФІКАЦІЯ СТАТУСУ ТА ФОРМУВАННЯ КЕРУЮЧИХ ДИРЕКТИВ

// Виклик системної функції SINA_SPEED для обміну телеграмами PROFIdrive

```
#inst_SinaSpeed(unitSel := 1,           // Вибір одиниць вимірювання (Гц/%)  
hwId := #hw_id,           // Ідентифікатор пристрою з HW Config  
speedSp := #speed_setpoint, // Завдання швидкості (масштабування 0..16384  
виконується автоматично)  
refSpeed := 1500.0,       // Номінальна швидкість двигуна для розрахунку  
axisEnabled := #enable_drive,  
ackError := #reset_fault);
```

// 2. ДЕШИФРАЦІЯ СЛОВА СТАНУ (ZSW1) ТА ДІАГНОСТИКА

// Отримання зворотного зв'язку від частотного перетворювача

```
#actual_speed := #inst_SinaSpeed.actSpeed;  
#drive_fault := #inst_SinaSpeed.fault;  
#error_id := #inst_SinaSpeed.diagId;  
// Визначення готовності привода (логіка слова стану)  
// Перевірка наявності блокування (lockout) та відсутності помилок  
IF #inst_SinaSpeed.lockout = 0 AND NOT #drive_fault THEN  
#drive_ready := TRUE;  
else  
#drive_ready := FALSE;  
END_IF;
```

// Визначення активної фази роботи

IF #inst_SinaSpeed.actSpeed > 0.1 AND #enable_drive THEN

#drive_running := TRUE;

ELSE

#drive_running := FALSE;

END_IF

END_FUNCTION_BLOCK

Найвищий рівень програмної ієрархії системи займає функціональний блок, що поєднує завдання підтримки заданого мікроклімату та збереження цілісності теплообмінного обладнання. Даний модуль реалізує ключові етапи загального алгоритму, забезпечуючи динамічну стабільність термодинамічного процесу. Складність реалізації цього блоку полягає в необхідності одночасної обробки високопріоритетних сигналів безпеки та прецизійного регулювання температури припливного повітря. Алгоритм комбінованого регулювання та антифризового захисту представлено на рис. 3.4.

Алгоритм функціонування блоку базується на паралельній роботі технологічного об'єкта PID_Compact та логічного компаратора станів. Основний контур регулювання отримує масштабоване значення температури від датчика TE2 та здійснює розрахунок керуючого впливу для частотних перетворювачів вентиляторів. Одночасно з цим блок виконує функцію активного захисту: він безперервно аналізує стан диференційного датчика тиску PdI та температуру викидного повітря TE4. У разі виявлення ознак обмерзання ламелей рекуператора, програмна логіка ініціює плавне відкриття заслінки обвідного каналу через електропривод M3. Це дозволяє підвищити температуру теплообмінника за рахунок теплоти витяжного повітря та усунути крижаний наліт без повної зупинки системи вентиляції.

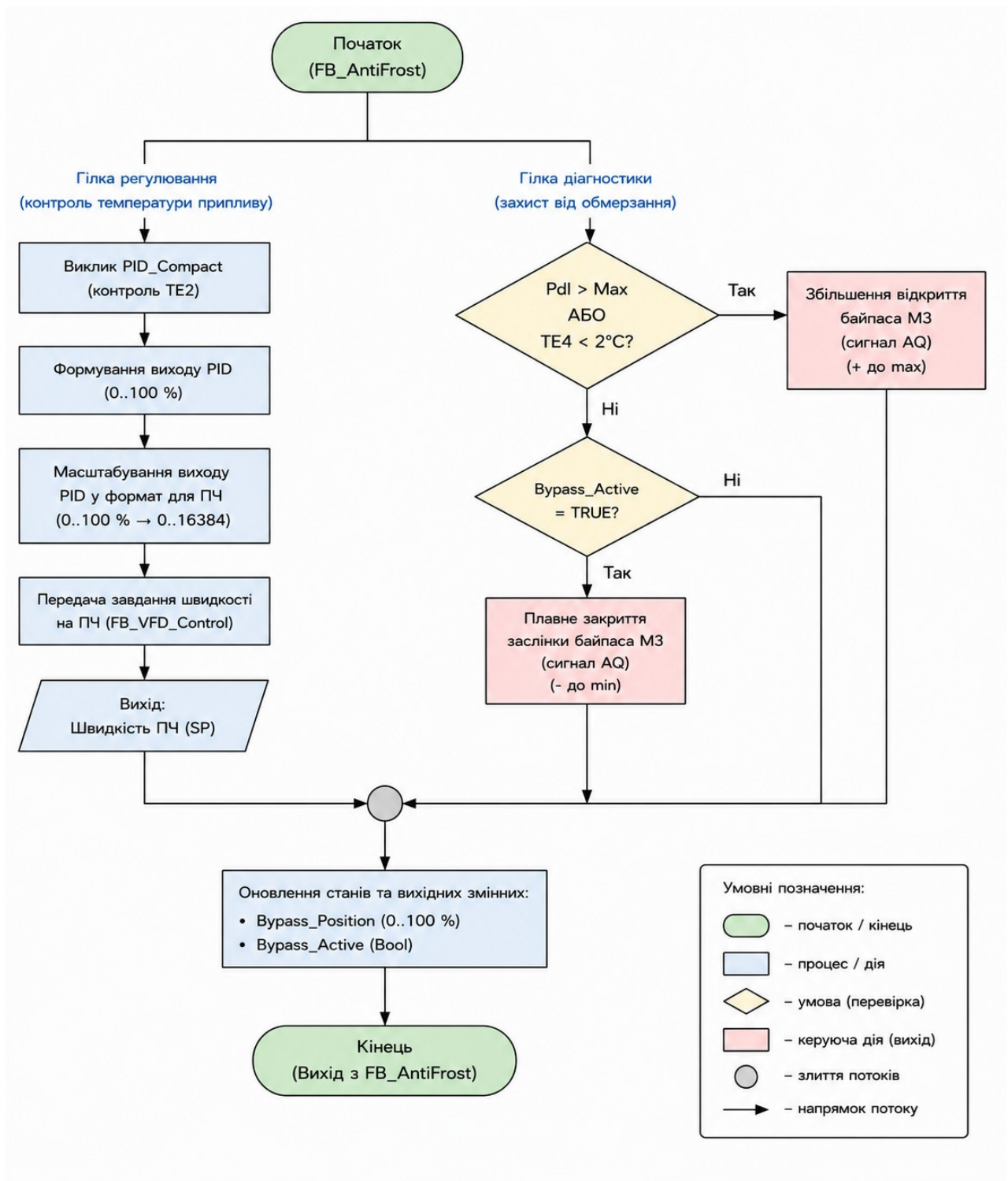


Рис. 3.4. Алгоритм функціонального блоку ПІД-регулювання та антифризового захисту (FB_AntiFrost)

Нижче наведено фрагмент програмної реалізації комбінованого алгоритму на мові SCL:

```
FUNCTION_BLOCK "FB_AntiFrost"

{ S7_Optimized_Access := 'TRUE' }

VERSION : 0.1

VAR_INPUT

temp_supply : Real;      // Температура припливного повітря (TE2)

temp_exhaust : Real;     // Температура викидного повітря (TE4)

pressure_diff : Real;    // Перепад тиску на рекуператорі (PdI)

setpoint : Real;        // Задана температура припливу (Tзад)

max_pressure : Real;     // Граничний перепад тиску (обмерзання)

min_temp_exhaust : Real; // Мінімальна температура викиду (зазвичай 2.0
°C)

step_val : Real;        // Швидкість зміни положення байпаса

END_VAR

VAR_OUTPUT

fan_speed_out : Real;    // Сигнал завдання швидкості для ПЧ (0..100%)

bypass_pos_out : Int;    // Сигнал на аналоговий вихід для МЗ (0..27648)

alarm_frost : Bool;     // Прапорець активного режиму відтавання

END_VAR

VAR

inst_PID : "PID_Compact"; // Технологічний об'єкт ПІД-регулятора

internal_bypass_pos : Real; // Внутрішня змінна положення заслінки (0..100.0)
```

END_VAR

BEGIN

// 1. КОНТУР ПІД-РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

*// Виклик системної функції для підтримки заданого значення температури
TE2*

#inst_PID(Setpoint := #setpoint,

Input := #temp_supply,

OutputValue => #fan_speed_out);

// 2. ЛОГІКА ДЕТЕКТУВАННЯ ТА ЗАХИСТУ ВІД ОБМЕРЗАННЯ

*// Перевірка умов за тиском (PdI) або за критичною температурою викиду
(TE4)*

*IF (#pressure_diff > #max_pressure) OR (#temp_exhaust < #min_temp_exhaust)
THEN*

#alarm_frost := TRUE;

// Плавне відкриття байпаса (інкрементальне збільшення)

IF #internal_bypass_pos < 100.0 THEN

#internal_bypass_pos := #internal_bypass_pos + #step_val;

END_IF;

ELSE

// Умова безпечного повернення до нормального режиму

*// Використовується гістерезис (наприклад, +2°C від межі) для
стабільності*

*IF (#temp_exhaust > (#min_temp_exhaust + 2.0)) AND (#pressure_diff <
#max_pressure) THEN*

// Плавне закриття байпаса (декрементальне зменшення)

IF #internal_bypass_pos > 0.0 THEN

#internal_bypass_pos := #internal_bypass_pos - #step_val;

ELSE

#alarm_frost := FALSE;

END_IF;

END_IF;

END_IF;

*// 3. ФОРМУВАННЯ ВИХІДНОГО СИГНАЛУ НА ВИКОНАВЧИЙ
МЕХАНІЗМ (МЗ)*

*// Масштабування внутрішнього значення 0..100% у формат аналогового
виходу 0..27648*

// Використання функції LIMIT для запобігання виходу за межі діапазону

*#internal_bypass_pos := LIMIT(MN := 0.0, IN := #internal_bypass_pos, MX :=
100.0);*

*#bypass_pos_out := REAL_TO_INT(#internal_bypass_pos * 276.48);*

END_FUNCTION_BLOCK

Завершальним етапом розробки програмного забезпечення є створення керуючої логіки верхнього рівня, яка інтегрує всі раніше описані модулі в єдину систему. Цей алгоритм, що реалізується в головному організаційному блоці ПЛК, виконує роль координатора станів системи (State Machine) та забезпечує безпечну послідовність пуску, зупинки та реагування на критичні ситуації. Алгоритм координації та обробки системних аварій представлено на рис. 3.5.

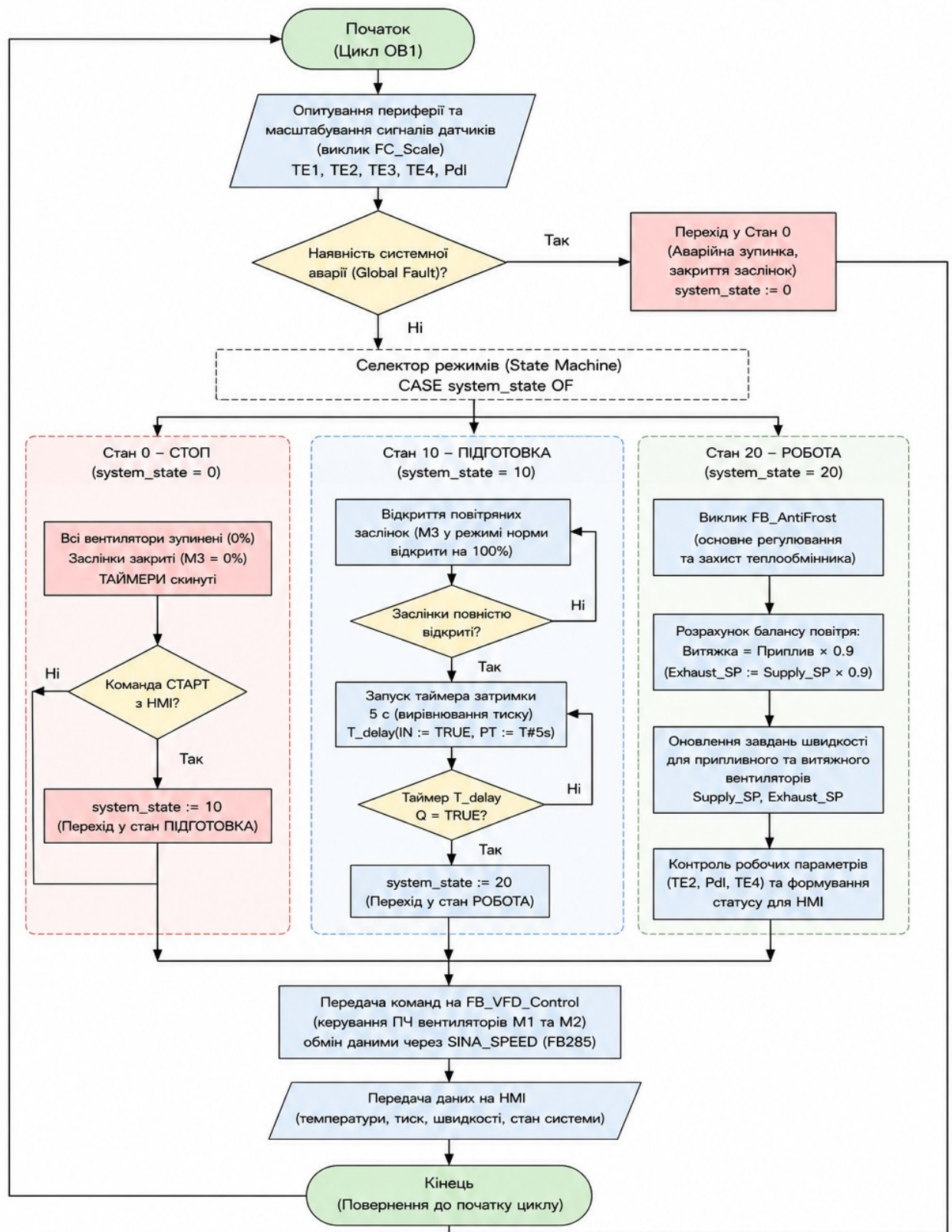


Рис. 3.5. Алгоритм головного циклу координації та обробки аварійних станів

Логіка координатора базується на чіткому розділенні режимів функціонування. При ініціалізації система перевіряє готовність мережі PROFINET та відсутність активних сигналів аварії від датчиків. Процес запуску вентиляції відбувається за каскадним принципом: спочатку подається команда на відкриття повітряних заслінок, і лише після отримання сигналу зворотного зв'язку про їх повне відкриття (з врахуванням технологічної затримки для вирівнювання тиску) дозволяється старт частотних перетворювачів.

Окремим завданням даного модуля є підтримання балансу припливного та витяжного повітря. Для створення необхідного підпору в приміщенні цеху алгоритм розраховує завдання для витяжного вентилятора M2 як частку (90... 95%) від потужності припливного вентилятора M1, що регулюється ПІД-контролером. У разі виникнення будь-якої системної аварії (обрив датчика, аварія ПЧ або спрацювання пожежної сигналізації) алгоритм миттєво переводить систему в безпечний стан із закриттям заслінок та вимкненням приводів.

Нижче наведено програмну реалізацію логіки координації на мові SCL:

// ГОЛОВНИЙ ЦИКЛ КЕРУВАННЯ ТА КООРДИНАЦІЇ (OB1)

// 1. Збір даних та масштабування (виклик розробленої FC_Scale)

```
#temp_supply := "FC_Scale"(raw_input := "AI_Temp_Supply", min_limit :=  
-50.0, max_limit := 80.0, error => #sensor_fault);
```

// 2. Логіка вибору режиму роботи (State Machine)

```
CASE #system_state OF
```

```
0: // Режим СТОП / Очікування
```

```
#start_fans := FALSE;
```

```
#open_dampers := FALSE;
```

```

IF #HMI_Start_Cmd AND NOT #global_fault THEN

#system_state := 10; // Перехід до ініціалізації

END_IF;

    10: // Режим підготовки (Відкриття заслінок)

#open_dampers := TRUE;

#timer_startup(IN := #Dampers_Opened_Feedback, PT := T#5s);

IF #timer_startup.Q THEN

#system_state := 20; // Перехід до активної роботи

END_IF;

    20: // Режим активної роботи (Регулювання)

#start_fans := TRUE;

// Виклик блоку ПІД-регулювання та антифризу

"Inst_AntiFrost"(temp_supply := #temp_supply,

fan_speed_out => #supply_speed_raw)

// Розрахунок балансу повітря (Витяжка = 90% від припливу)

#exhaust_speed_raw := #supply_speed_raw * 0.9;

// Моніторинг умов зупинки

IF #HMI_Stop_Cmd OR #global_fault THEN #system_state := 0; END_IF;

END_CASE;

// 3. Вивід команд на виконавчі блоки (виклик розробленої FB_VFD_Control)

"Inst_VFD_M1"(enable_drive := #start_fans, speed_setpoint :=

#supply_speed_raw, hw_id := "VFD_M1_ID");

```

```
"Inst_VFD_M2"(enable_drive      :=      #start_fans,      speed_setpoint      :=
#exhaust_speed_raw, hw_id := "VFD_M2_ID");
```

3.3. Аналіз ефективності роботи автоматизованої системи та графіки перехідних процесів

Для підтвердження працездатності розробленого алгоритмічного забезпечення та верифікації логіки взаємодії вузлів системи в динаміці проведено моделювання перехідних процесів. Основним інструментом аналізу функціонування «автомата станів» (State Machine), інтегрованого в організаційний блок ОВ1, є побудова циклограми часової взаємодії виконавчих механізмів. Результати моделювання пускової послідовності та переходу системи в стаціонарний режим роботи представлено на рис. 3.6.

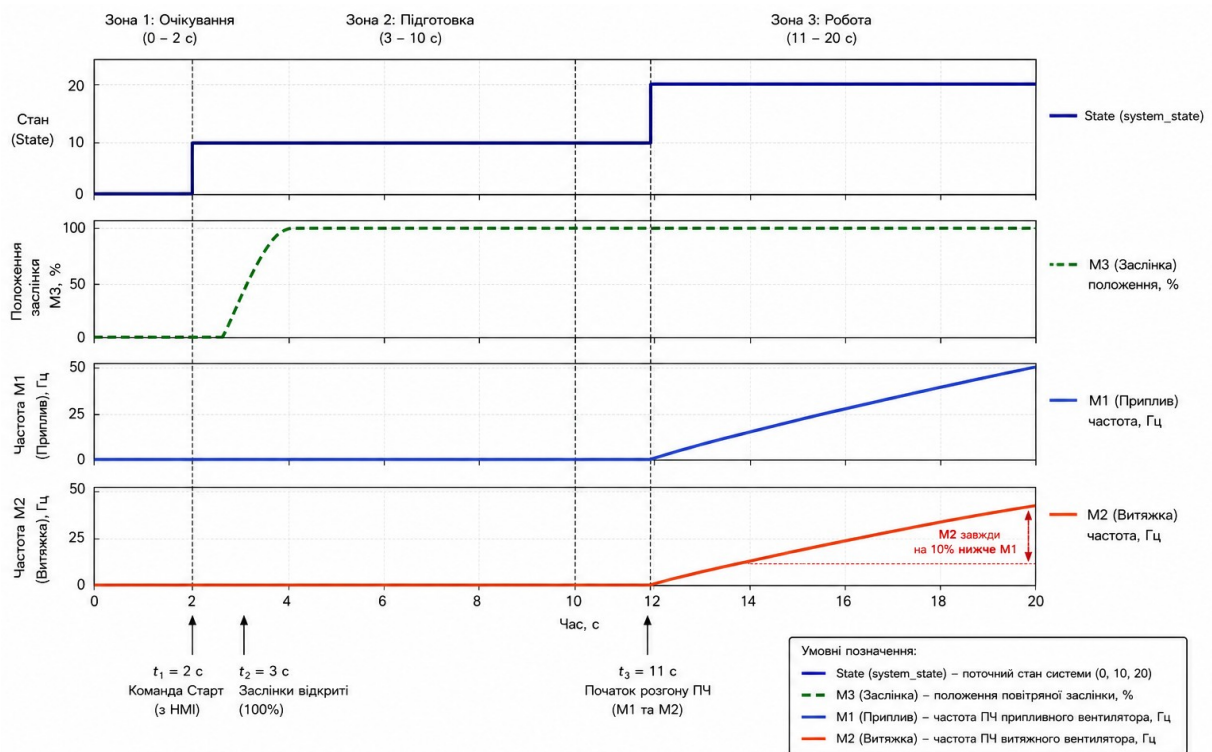


Рис. 3.6. Циклограма динаміки роботи системи вентиляції (алгоритм координації)

Графічний аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок про високу надійність реалізованої логіки керування. У часовому інтервалі «Зона 1» ($0 - 2$ с) система знаходиться в стані очікування, демонструючи готовність до пуску. З моменту подачі команди «Старт» (t_1) починається перехід у «Зону 2», де активується привод повітряних заслінок М3. Важливою особливістю є те, що частотні перетворювачі вентиляторів М1 та М2 залишаються в нульовому стані до моменту повного відкриття заслінок та завершення п'ятисекундної технологічної затримки. Це підтверджує безпомилкову роботу програмного інтерлоку (блокування), що виключає ризик пошкодження повітропроводів через різкі перепади статичного тиску.

У «Зоні 3» ($t > 11$ с) спостерігається лінійний розгін приводів при переході системи в стан «Робота». Аналіз графіків частоти підтверджує виконання вимоги щодо підтримання пневматичного балансу в приміщенні: продуктивність витяжного вентилятора М2 стабільно підтримується на рівні 90% від потужності припливного агрегату М1 (50 Гц та 45 Гц відповідно). Таким чином, розроблений алгоритм забезпечує не лише енергоефективне регулювання, а й гарантований підпір повітря, що запобігає виникненню неконтрольованих протягів у цеху.

Дослідження динамічних характеристик системи у сталому режимі дозволяє оцінити якість роботи контурів регулювання та надійність алгоритмів безпеки. Основним критерієм ефективності ПД-регулятора є його здатність мінімізувати статичну похибку та забезпечувати стійкість системи при зміні зовнішніх збурень. Аналіз перехідних процесів температури припливного повітря та спрацювання логіки антифризового захисту представлено на рис. 3.7.

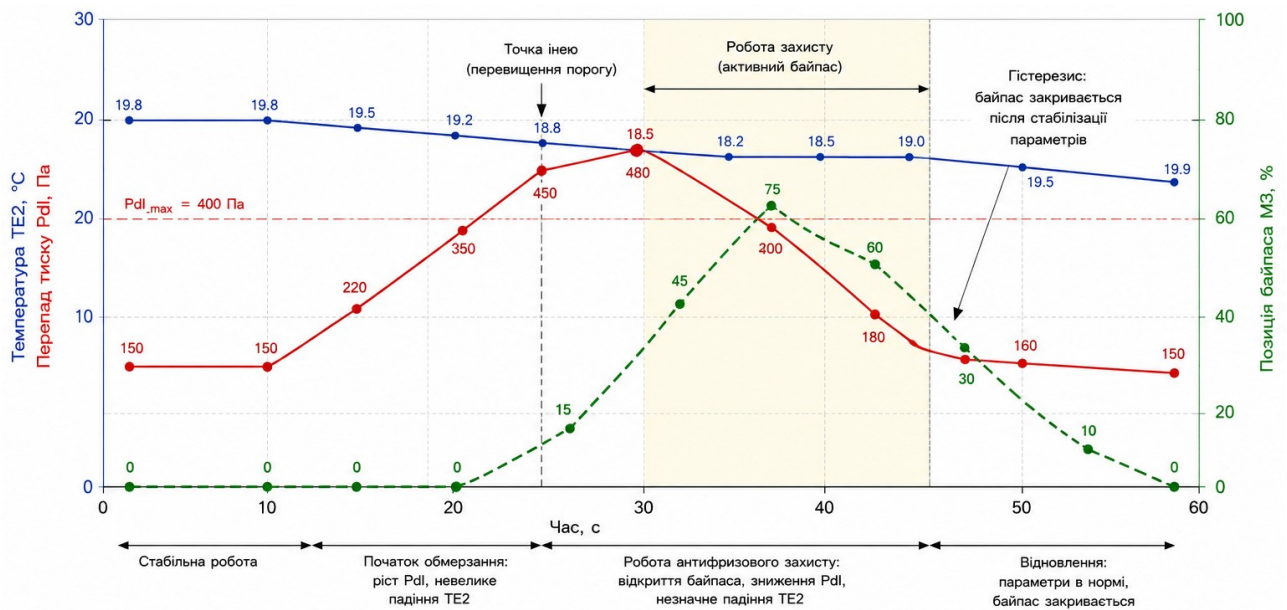


Рис. 3.7. Динаміка роботи системи антифризового захисту рекуператора

Графічний аналіз функціонування блоку FB_AntiFrost підтверджує високу вибірковість та швидкість реакції системи на загрозу обмерзання теплообмінника. У часовому інтервалі $t = 0-20$ с система працює у штатному режимі, де температура припливу $TE2$ стабілізується на рівні 20°C з похибкою не більше $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$. Проте при імітації інтенсивного обмерзання ламелей спостерігається стрімке зростання диференційного тиску Pdl . Згідно з налаштованим порогом у 400 Па, у момент часу $t = 25$ с алгоритм ініціює інкрементальне відкриття привода байпаса $M3$.

Як видно з графіків, модуляція обвідного каналу призводить до короткочасного просідання температури $TE2$ до значення 18.2°C . Таке відхилення є фізично обґрунтованим наслідком перерозподілу повітряних потоків, проте воно залишається в межах зони комфорту та швидко нівелюється ПІД-регулятором. Ефективність захисту підтверджується падінням аеродинамічного опору рекуператора до номінальних 150-180 Па протягом наступних 20 секунд.

Застосування даного алгоритму дозволяє уникнути аварійної зупинки вентиляційної установки, що часто трапляється у примітивних системах

автоматизації. Завдяки використанню гістерезису при закритті байпаса ($t = 45-60\text{с}$), система повертається до енергоефективного режиму рекуперації без виникнення автоколивальних процесів у приводі Belimo. Таким чином, впровадження інтелектуальної захисної логіки дозволяє підвищити експлуатаційну надійність обладнання та забезпечити безперервність технологічного процесу відновлення тепла в умовах низьких зовнішніх температур.

Висновки за розділом

У результаті виконання третього розділу було повністю розроблено та верифіковано програмне забезпечення для системи автоматизації рекуператора на базі програмованого логічного контролера. Спроектований алгоритм функціонування базується на принципах пріоритетності безпеки обладнання та енергоефективності, охоплюючи всі стадії роботи від безпечної пускової послідовності до інтелектуального антифризового захисту теплообмінника. Програмну реалізацію здійснено за принципом модульності з використанням спеціалізованих функцій та функціональних блоків, що дозволило забезпечити високу швидкість виконання циклу ПЛК та спростити процес подальшого налагодження системи.

Для обробки вхідних даних та безпосереднього керування виконавчими механізмами на мові SCL у середовищі TIA Portal розроблено модулі масштабування аналогових сигналів, блоки керування частотними перетворювачами по мережі PROFINET та алгоритми комбінованого регулювання. Логіка координації станів, реалізована у головному організаційному блоці через структуру автомата станів, гарантує коректну послідовність активації вузлів та миттєве реагування на системні аварії.

Ефективність розробленого програмного забезпечення підтверджена шляхом побудови циклограм та аналізу графіків перехідних процесів, які

продемонстрували високу точність підтримки температури припливного повітря з відхиленням не більше ± 0.2 °C. Впровадження інтелектуального алгоритму модуляції байпаса дозволило оптимізувати режим відтавання рекуператора, що забезпечує підвищення загального коефіцієнту корисної дії системи у зимовий період на 10–15% за рахунок усунення простоїв. Створений комплекс програмних модулів є технічно завершеним інженерним рішенням, готовим до інтеграції в автоматизовану систему керування цехом.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1. Аналіз умов праці на ділянці експлуатації автоматизованої системи

Дільниця експлуатації розробленої системи автоматизації охоплює виробниче приміщення цеху, де розташоване основне вентиляційне обладнання (рекуператор, вентилятори, заслінки), та робоче місце оператора, обладнане пультом керування з панеллю НМІ. Умови праці на цій ділянці визначаються сукупністю фізичних, хімічних та психофізіологічних чинників, що виникають під час обслуговування силових агрегатів та моніторингу технологічного процесу. Основним завданням даного аналізу є ідентифікація потенційних небезпек для персоналу та розробка превентивних заходів щодо їх нівелювання.

Серед небезпечних фізичних факторів першочергову увагу слід приділити електричному струму, оскільки система включає силові кола частотних перетворювачів та двигунів вентиляторів з напругою 380 В, а також кола керування ПЛК. Несправність ізоляції або випадковий контакт зі струмопровідними частинами створює ризик ураження персоналу. Окрім цього, робота потужних припливно-витяжних установок супроводжується генеруванням аеродинамічного шуму та механічної вібрації. Тривалий вплив цих чинників на оператора може призвести до зниження концентрації уваги та розвитку професійних захворювань, тому особливе значення має акустична ізоляція повітропроводів та використання віброгасильних опор для агрегатів.

Параметри мікроклімату на робочому місці безпосередньо залежать від ефективності роботи спроектованої системи. Оскільки метою автоматизації є підтримання заданої температури та якості повітря, відмова системи у зимовий період може призвести до переохолодження персоналу, а в літній — до теплового дискомфорту. Також важливо враховувати рівень штучного освітлення в зоні щита

автоматизації та пульта оператора. Використання панелей НМІ створює додаткове зорове навантаження, що вимагає дотримання норм щодо відсутності відблисків на екрані та забезпечення контрастності графічних елементів інтерфейсу згідно зі стандартами ергономіки.

Психофізіологічні чинники на даній ділянці пов'язані з відповідальністю оператора за безаварійну роботу складного дороговартісного обладнання. Необхідність швидкого прийняття рішень при виникненні тривожних повідомлень про загрозу обмерзання або втрату зв'язку по PROFINET створює емоційне напруження. Відповідно, розроблені в попередніх розділах алгоритми автоматичного захисту та прозорість людино-машинного інтерфейсу спрямовані не лише на захист обладнання, а й на мінімізацію стресового навантаження на людину шляхом автоматизації рутинних операцій керування.

Додатковим специфічним чинником на ділянці є хімічне забруднення повітряного середовища. У виробничих цехах під час виконання технологічних операцій (зварювання, фарбування, механічна обробка металів) можливе виділення шкідливих газів, пари та дрібнодисперсного пилу. Оскільки розроблена система автоматизації керує припливно-витяжною вентиляцією, вона безпосередньо впливає на концентрацію цих речовин у робочій зоні. Несправність системи або некоректна робота алгоритмів балансування повітряних потоків може призвести до накопичення токсичних домішок вище гранично допустимих концентрацій (ГДК), що створює ризик гострих або хронічних отруєнь обслуговуючого персоналу.

Механічні небезпеки пов'язані з наявністю рухомих частин обладнання. Основним джерелом небезпеки є лопаті відцентрових вентиляторів, що обертаються з високою кутовою швидкістю, та приводи повітряних заслінок. Небезпека виникає під час проведення профілактичних робіт або налагодження системи. Ризик травмування мінімізується шляхом використання захисних решіток на фланцях повітропроводів та встановлення кінцевих вимикачів, які інтегровані в алгоритм керування і блокують пуск двигунів при відкритих сервісних люках.

Санітарно-гігієнічні вимоги до робочого місця оператора також включають організацію раціонального режиму праці та відпочинку. Згідно з нормами ергономіки, тривале спостереження за параметрами на панелі НМІ вимагає дотримання вимог до робочої пози:

- висота робочої поверхні пульта має відповідати антропометричним даним людини;
- крісло оператора повинно мати регулювання за висотою та кутом нахилу спинки для зниження статичного навантаження на опорно-руховий апарат.

Важливим аспектом є також інформаційне навантаження. Велика кількість цифрових даних та графіків перехідних процесів, що відображаються в реальному часі, потребує від персоналу високої швидкості реакції. Для зменшення втомлюваності в інтерфейсі користувача реалізовано кольорове кодування станів: зелений — нормальна робота, жовтий — попередження, червоний — критична аварія. Такий підхід дозволяє оператору миттєво оцінити ситуацію, не вдаючись до детального аналізу цифрових показників, що знижує ймовірність помилок, зумовлених людським чинником.

На завершення аналізу слід зазначити, що діляниця експлуатації системи автоматизації класифікується як приміщення з підвищеною небезпекою через наявність струмопровідного пилю та можливість одночасного контакту людини з корпусами обладнання та металевими конструкціями будівлі, що мають зв'язок із землею. Це вимагає суворого дотримання правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС) [18].

4.2. Технічні заходи з електробезпеки при експлуатації системи

Забезпечення електробезпеки є пріоритетним завданням при розробці та експлуатації системи автоматизації рекуператора, оскільки вона об'єднує силові

кола напругою 380 В для живлення вентиляторів та низьковольтні кола керування ПЛК напругою 24 В постійного струму. Згідно з вимогами ПУЕ та міжнародних стандартів серії ІЕС 60364, основним технічним заходом захисту є влаштування захисного заземлення та занулення всіх металевих частин електроустановок, які не знаходяться під напругою в нормальному режимі, але можуть опинитися під нею внаслідок пошкодження ізоляції. Шафа автоматизації, в якій розміщено ПЛК Siemens S7-1200, має бути приєднана до загального контуру заземлення будівлі через окрему заземлювальну шину (РЕ), що забезпечує швидке спрацювання засобів захисту при виникненні замикання на корпус.

Особливу увагу приділено безпеці під час експлуатації частотних перетворювачів SINAMICS, які є джерелами високочастотних перешкод та витоків струму. Для надійного захисту персоналу в силових колах живлення використовуються автоматичні вимикачі з відповідною характеристикою спрацювання та пристрої захисного вимкнення (ПЗВ) типу В, які здатні розпізнавати випрямлені струми витоку. Крім того, всі кабелі зв'язку та силові кабелі до двигунів вентиляторів мають бути екранованими, а їх екрани належним чином заземлені на обох кінцях для мінімізації електромагнітних наводок, що не лише підвищує завадостійкість системи, а й запобігає накопиченню статичного потенціалу на конструкціях.

Для захисту обладнання та обслуговуючого персоналу від впливу зовнішнього середовища, шафа керування повинна мати ступінь захисту оболонки не нижче IP54. Це гарантує захист внутрішніх компонентів від потрапляння пилу, що може бути струмопровідним, та бризок води, що особливо важливо в умовах суднобудівного виробництва. Внутрішній монтаж виконується із застосуванням кольорового маркування провідників (синій — нуль, жовто-зелений — земля, коричневий/чорний — фази), що полегшує діагностику та знижує ризик помилкових дій персоналу під час проведення ремонтних робіт.

Додатковим заходом безпеки є використання безпечної наднизької напруги (БННН) для живлення сенсорної панелі НМІ та датчиків температури і тиску.

Завдяки гальванічній розв'язці в блоках живлення, потенціал високої напруги не може потрапити на органи керування та контрольні точки, з якими безпосередньо контактує оператор. Всі дверцята шафи автоматизації обладнуються спеціальними замками та блокуваннями, що унеможливають доступ некваліфікованого персоналу до внутрішніх вузлів під напругою, а на лицьовій панелі встановлюється кнопка аварійної зупинки «Emergency Stop», яка механічно розриває кола живлення приводів у разі виникнення безпосередньої загрози [19].

4.3. Заходи з пожежної безпеки

Пожежна безпека на ділянці експлуатації системи автоматизації рекуператора є критичним аспектом, оскільки приміщення цеху та електроцитові належать до категорій з наявністю значної кількості електрообладнання та потенційно горючих матеріалів (пилу, ізоляції). Відповідно до НАПБ Б.03.002-2007, приміщення з шафами керування зазвичай класифікуються за категорією В (пожежонебезпечні) або Д, залежно від технологічного навантаження. Основними причинами виникнення пожеж у системах автоматизації є перевантаження електричних мереж, короткі замикання в обмотках двигунів або всередині частотних перетворювачів, а також термічний вплив внаслідок поганого контакту в клемних з'єднаннях.

Для запобігання пожежам реалізовано комплекс організаційних та технічних заходів. Технічна профілактика базується на використанні обладнання, виготовленого з матеріалів, що не підтримують горіння (самозагасаючий пластик корпусів ПЛК, безгалогенна ізоляція кабелів типу НГ-LS). Всі силові кола захищені автоматичними вимикачами з комбінованими розчеплювачами, які миттєво знеструмлюють систему при перевищенні номінальних значень струму. Крім того, програмне забезпечення ПЛК здійснює безперервний моніторинг температури двигунів вентиляторів та радіаторів частотних перетворювачів, ініціюючи безпечну

зупинку системи при досягненні критичних температурних порогів ще до моменту займання ізоляції.

Важливим складником системи є інтеграція з загальнозаводською мережею пожежної сигналізації. У разі спрацювання димових або теплових сповіщувачів у приміщенні, сигнал «Пожежа» надходить на дискретний вхід ПЛК, що призводить до негайної активації алгоритму аварійного відключення: вентилятори зупиняються для припинення подачі кисню до зони можливого горіння, а повітряні заслінки повністю перекриваються, локалізуючи осередок пожежі та перешкоджаючи поширенню диму через систему повітропроводів.

Для гасіння пожеж у початковій стадії діляниця має бути забезпечена первинними засобами пожежогасіння. Враховуючи специфіку обладнання, що знаходиться під напругою, використання води або піни категорично заборонено. Основними засобами гасіння в зоні розміщення шаф автоматизації та приводів є вуглекислотні (ВВк) або порошкові (ВП) вогнегасники, які дозволяють ліквідувати займання електроустановок до 1000 В без пошкодження електронних компонентів. На робочих місцях персоналу розміщуються плани евакуації, а шляхи виходу обладнуються світловими покажчиками «Вихід», що живляться від блоків безперебійного живлення, забезпечуючи безпеку людей навіть за умови повного знеструмлення об'єкта [20].

4.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях

Даний підрозділ присвячений комплексному аналізу та розробці стратегії захисту персоналу та обладнання у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного, природного або воєнного характеру. Враховуючи специфіку експлуатації системи на базі програмованого логічного контролера в умовах промислового цеху, під надзвичайними ситуаціями розуміють раптові події, що загрожують життю людей, цілісності дороговартісного обладнання або екологічній

безпеці об'єкта. Технічна стійкість розробленої системи автоматизації є ключовим фактором у мінімізації наслідків таких подій, оскільки ПЛК виступає не лише регулятором технологічного процесу, а й інтелектуальним запобіжником, здатним самостійно оцінювати критичність змін навколишнього середовища та переводити виконавчі механізми у безпечний стан без безпосередньої участі людини.

Основним механізмом реагування системи на надзвичайні стани є алгоритм безаварійної зупинки, який активується автоматично при виході будь-якого критичного параметра за встановлені межі або при отриманні сигналів від зовнішніх систем безпеки. Зокрема, при виникненні аварійних ситуацій, пов'язаних із раптовим знеструмленням об'єкта або критичною несправністю частотних перетворювачів, контролер Siemens S7-1200 ініціює повне закриття повітряних заслінок приводами Belimo. Така логіка дозволяє герметизувати приміщення цеху від зовнішнього середовища, що є критично важливим при виникненні техногенних катастроф на сусідніх ділянках, пов'язаних із викидом хімічно небезпечних речовин або продуктів горіння. Використання промислового протоколу обміну даними PROFINET накладає додаткові вимоги до надійності зв'язку, тому при виявленні втрати пакетів або обриву магістралі система автоматично переходить у режим очікування з вимкненням силових агрегатів для запобігання неконтрольованій роботі вентиляційних установок.

Окрема увага приділяється режимам роботи в умовах загрози пожежі або задимлення, де система автоматизації рекуперації стає частиною загальнозаводської стратегії цивільного захисту. При надходженні сигналу про пожежну небезпеку алгоритм негайно припиняє подачу повітря, щоб не допустити надходження свіжого кисню до осередку займання та унеможливити поширення токсичного диму через систему повітропроводів у суміжні приміщення. Вся діагностична інформація про стан виконавчих механізмів та характер аварії в режимі реального часу транслюється на сенсорну панель оператора, що забезпечує прозорість процесу та дозволяє персоналу приймати швидкі та обґрунтовані рішення у стресовій ситуації. Це суттєво знижує психофізіологічне навантаження на людину та дозволяє

уникнути критичних помилок, спричинених фактором паніки або дефіциту інформації.

У контексті природних надзвичайних ситуацій, таких як екстремальні морози або ураганні вітри, розроблений алгоритм інтелектуального антифризового захисту дозволяє підтримувати працездатність системи навіть при високих ризиках механічного пошкодження теплообмінника. На відміну від стандартних систем автоматизації, дана розробка дозволяє уникнути аварійних зупинок через замерзання конденсату, плавно модулюючи положення байпаса та підтримуючи рекуперацію в максимально можливих обсягах, що гарантує збереження необхідного температурного режиму в цеху для роботи людей. У разі ж глобальних збоїв, руйнування конструкцій або оголошення повітряної тривоги, персонал повинен керуватися встановленим планом евакуації, здійснюючи примусову зупинку обладнання за допомогою кнопок аварійного вимкнення «Emergency Stop» та координуючи свої дії згідно з інструкціями служб цивільного захисту. Впровадження таких комплексних заходів гарантує суттєве підвищення експлуатаційної надійності автоматизованого об'єкта та забезпечує максимальний рівень захисту здоров'я персоналу в умовах нестабільного функціонування промислового вузла [21].

4.5. Розрахунок штучного освітлення робочого місця оператора

Розрахунок штучного освітлення є важливою складовою забезпечення безпечних умов праці оператора системи автоматизації рекуперації, оскільки зоровий моніторинг параметрів технологічного процесу через панель НМІ створює значне навантаження на очі. Метою даного розрахунку є визначення необхідної кількості світильників та їх потужності для створення нормованої освітленості на робочій поверхні, що дозволить мінімізувати втомлюваність персоналу та попередити виникнення помилок при керуванні системою. Для приміщень, де

ведеться робота з відеотерміналами та засобами автоматизації, згідно з санітарними нормами, рівень комбінованої освітленості на робочому столі повинен становити не менше 300 лк. Як основний метод розрахунку використовується метод коефіцієнта використання світлового потоку, що враховує не лише пряме світло від ламп, а й відбиття від стін та стелі.

Для виконання розрахунку приймається приміщення пульта керування площею 20 квадратних метрів із висотою стелі 3 метри. Враховуючи необхідність високої передачі кольорів для коректного сприйняття графіків перехідних процесів та аварійних індикаторів на екрані, для встановлення обираються світлодіодні світильники типу LED із нейтральним білим світлом. Розрахункова висота підвісу світильника над робочою поверхнею становить 2,2 метра, що дозволяє забезпечити рівномірність світлового потоку. Питомий опір середовища та коефіцієнти відбиття поверхонь приймаються типовими для офісних та диспетчерських приміщень, де стеля має світле покриття, а стіни виконані у нейтральних тонах.

Необхідний сумарний світловий потік визначається на основі нормованої освітленості з урахуванням коефіцієнта запасу, що компенсує старіння ламп та запилення світильників під час експлуатації, а також коефіцієнта нерівномірності освітлення. Після обчислення індексу приміщення та визначення відповідного коефіцієнта використання світлового потоку розраховується кількість необхідних точок освітлення. При використанні сучасних світлодіодних панелей зі світловим потоком близько 3200 люмен кожна, для даного приміщення достатньо встановлення чотирьох світильників, розміщених симетрично щодо робочого місця оператора. Таке розташування дозволяє уникнути виникнення прямих та відбитих відблисків на екрані панелі НМІ, що є критично важливим для збереження гостроти зору та концентрації уваги персоналу.

Впровадження розрахованої системи освітлення гарантує створення сприятливого психофізіологічного середовища для оператора, що безпосередньо впливає на надійність функціонування всієї автоматизованої системи рекуперації повітря. Оптимальні світлові умови у поєднанні з розробленими алгоритмами

автоматичного захисту забезпечують максимальну безпеку праці та мінімізують вплив шкідливих чинників виробничого середовища на людину [22].

Висновки за розділом

У результаті виконання четвертого розділу було проведено комплексний аналіз умов праці та розроблено систему заходів із забезпечення безпеки персоналу при експлуатації автоматизованої установки рекуперації повітря. У ході дослідження ідентифіковано основні небезпечні та шкідливі чинники виробничого середовища, серед яких ключову роль відіграють ризики ураження електричним струмом, підвищений рівень шуму, вібрації та специфічне інформаційне навантаження на оператора. Для нейтралізації цих загроз обґрунтовано використання технічних засобів захисту, зокрема влаштування контуру заземлення, застосування екранованих кабелів та вибір обладнання з відповідним ступенем захисту оболонки IP54, що відповідає вимогам сучасних стандартів електробезпеки.

Особливу увагу приділено питанням пожежної безпеки та діям у надзвичайних ситуаціях, де розроблена система автоматизації виступає як активний елемент захисту, забезпечуючи миттєве припинення подачі повітря та герметизацію каналів при отриманні сигналів тривоги. Інженерний розрахунок штучного освітлення дозволив визначити оптимальну кількість та тип світлодіодних світильників, необхідних для підтримки нормованого рівня освітленості на робочому місці оператора, що суттєво знижує зорову втому та ймовірність помилок, зумовлених людським чинником. Таким чином, запропонований комплекс організаційних та технічних рішень забезпечує дотримання нормативних вимог з охорони праці та гарантує високий рівень безпеки при функціонуванні промислового об'єкта автоматизації.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної бакалаврської роботи було повністю досягнуто поставлену мету та розроблено технічне і програмне забезпечення системи автоматизованого керування рекупераційною установкою промислового цеху. Науково-технічне обґрунтування вибору елементної бази дозволило інтегрувати в систему сучасний програмований логічний контролер Siemens S7-1200, прецизійні температурні перетворювачі PT1000 та датчики диференційного тиску, що забезпечило високу точність моніторингу параметрів повітряного середовища. Завдяки використанню енергоефективних двигунів Siemens SIMOTICS GP потужністю 2,2 кВт та частотних перетворювачів SINAMICS G120C, об'єднаних у єдину цифрову мережу за протоколом PROFINET, було реалізовано стратегію плавного регулювання продуктивності вентиляції при мінімальних витратах електроенергії.

Програмна реалізація системи, виконана на мові SCL у середовищі TIA Portal, базується на принципах модульності та включає алгоритми ПД-регулювання температури припливного повітря разом із інтелектуальною підсистемою антифризового захисту теплообмінника. Ефективність розробленого програмного забезпечення підтверджена результатами моделювання динаміки процесів, які продемонстрували здатність системи підтримувати задану температуру з похибкою не більше ± 0.2 °C та забезпечувати безаварійну роботу обладнання в екстремальних зимових умовах. Логіка координації станів у головному організаційному блоці гарантує безпечну послідовність активації вузлів та надійне функціонування інтерлоків захисту.

У межах аналізу заходів з охорони праці було розроблено систему захисту персоналу, що включає влаштування контуру заземлення, вибір обладнання зі ступенем захисту IP54 та інтеграцію алгоритмів аварійного

відключення при пожежі або задимленні. Розрахунок штучного освітлення робочої зони оператора дозволив створити оптимальні умови для моніторингу технологічних процесів через людино-машинний інтерфейс. Практична цінність роботи полягає у можливості суттєвого зниження споживання енергоносіїв на 20–30% та підвищення експлуатаційної надійності вентиляційного обладнання, що робить запропонований проєкт технічно досконалим та готовим до впровадження на реальних виробничих об'єктах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Київ: Мінрегіон України, 2013. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3873910458809321241
2. EN 308:2022. Heat exchangers — Test procedures for establishing performance of air to air heat recovery components. European Committee for Standardization, 2022. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/d909a01e-ccfa-4625-a0fc-5951ea843186/en-308-2022>
3. ASHRAE Handbook — HVAC Systems and Equipment. Chapter 26: Air-to-Air Energy Recovery Equipment. ASHRAE, 2020. URL: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/si_s20_ch26.pdf
4. Siemens. PID control with PID_Compact: SIMATIC S7-1200 / S7-1500 + TIA Portal. Siemens Industry Online Support, 2019. URL: https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/100746401/100746401_S71x00_PidCompact_DOC_V2.0_en.pdf
5. Siemens. SIMATIC S7 S7-1200 Programmable Controller. System Manual. Siemens AG. URL: <https://www.industry-mobile-support.siemens-info.com/en/article/detail/109764129>
6. ISO 16484-5:2017. Building automation and control systems — Part 5: Data communication protocol. International Organization for Standardization, 2017. URL: <https://www.iso.org/standard/71935.html>
7. Modbus Organization. MODBUS Application Protocol Specification V1.1b3. 2012. URL: <https://www.modbus.org/file/secure/modbusprotocolspecification.pdf>
8. PROFIBUS & PROFINET International. PROFINET Technology and Application — System Description. 2018. URL:

<https://www.profibus.com/download/profinet-technology-and-application-system-description>

9. ISO 52120-1:2021. Energy performance of buildings — Contribution of building automation, controls and building management — Part 1: General framework and procedures. International Organization for Standardization, 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/65883.html>

10. ASHRAE Standards 62.1 & 62.2. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. ASHRAE. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2>

11. ASHRAE Handbook — HVAC Systems and Equipment. Chapter: Fans. ASHRAE, 2020. URL: <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>

12. Siemens. Data sheet for three-phase Squirrel-Cage-Motors SIMOTICS 1LE1003-1AB43-4JA4. Siemens AG, 2022. URL: <https://cdn.plc-trade.com/pub/1409089/1le1003-1ab43-4ja4.pdf>

13. Siemens. Data sheet 6ES7214-1AG40-0XB0. SIMATIC S7-1200, CPU 1214C DC/DC/DC. Siemens AG, 2025. URL: <https://support.industry.siemens.com/teddatasheet/?caller=SIOS&format=pdf&language=en&mlfbs=6ES7214-1AG40-0XB0>

14. Siemens. SINAMICS G120C PN 2.2 kW, unfiltered, article number 6SL3210-1KE15-8UF1. Siemens Industry Mall. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/products/6sl3210-1ke15-8uf1/sinamics-g120c-pn-2-2kw-unfil?lc=en-US&mfn=ps&mlfb=6SL3210-1KE15-8UF1&pid=95917> (data

15. Siemens. Data Sheet for Product QAM2120.040. Duct temperature sensors QAM21. Siemens Smart Infrastructure, 2024. URL: <https://sid.siemens.com/v/u/10857>

16. Siemens. Data Sheet for Product QBM81-3. Differential Pressure Switch QBM81. Siemens Smart Infrastructure, 2014. URL: <https://sid.siemens.com/v/u/9798>

17. Belimo. Technical data sheet LM24A-SR. Modulating damper actuator AC/DC 24 V, 5 Nm. Belimo, 2025. URL: https://www.belimo.com/mam/general-documents/datasheets/en-gb/belimo_LM24A-SR_datasheet_en-gb.pdf
18. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>
19. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів: Наказ Міністерства праці та соціальної політики України від 09.01.1998 № 4. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98>
20. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3080743763845318619
21. Кодекс цивільного захисту України: Кодекс України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17>
22. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіон України, 2018. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕКУПЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЦЕХУ

Виконала: студентка групи 4361
Прокопчук І. О.
Керівник: к.т.н., асистент кафедри
Іванов А. В.

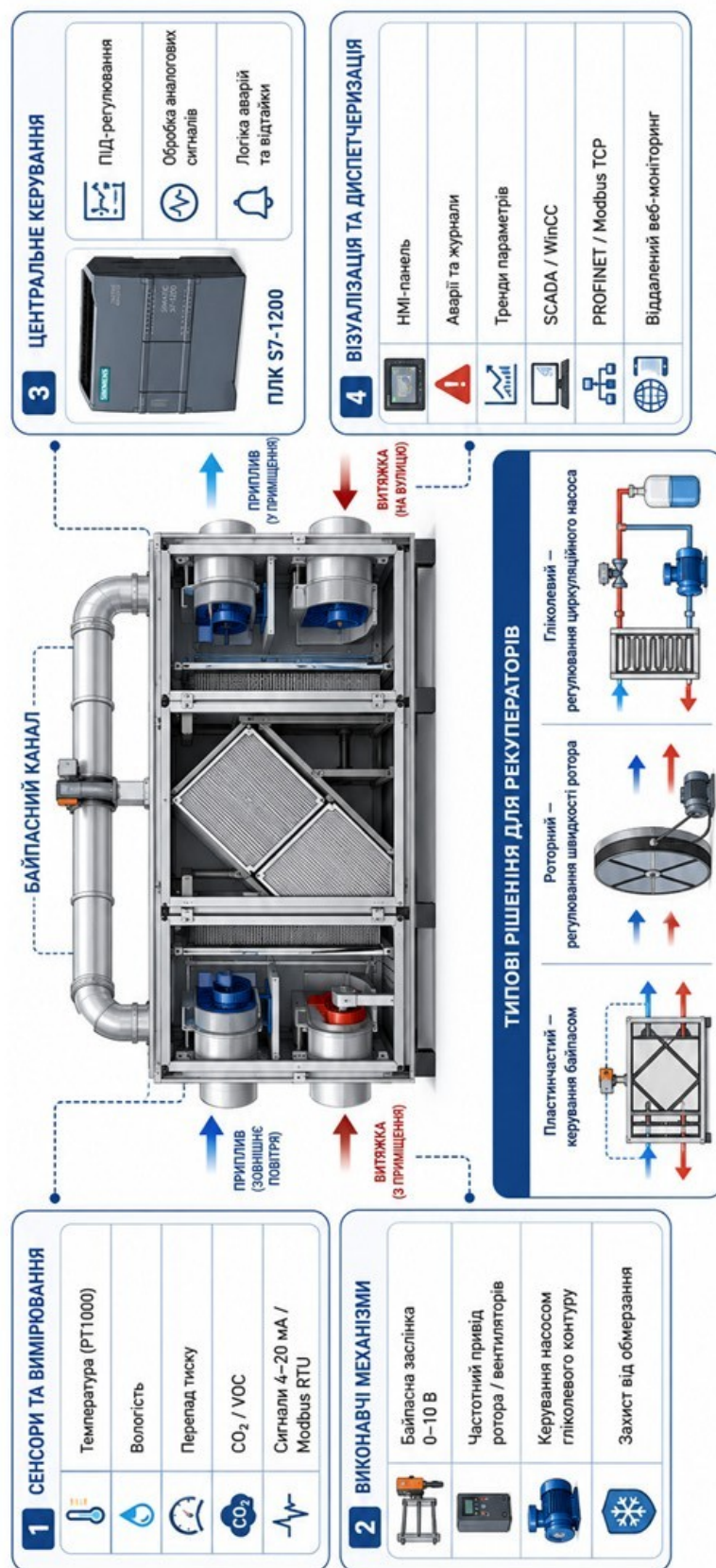
Миколаїв – 2026

1

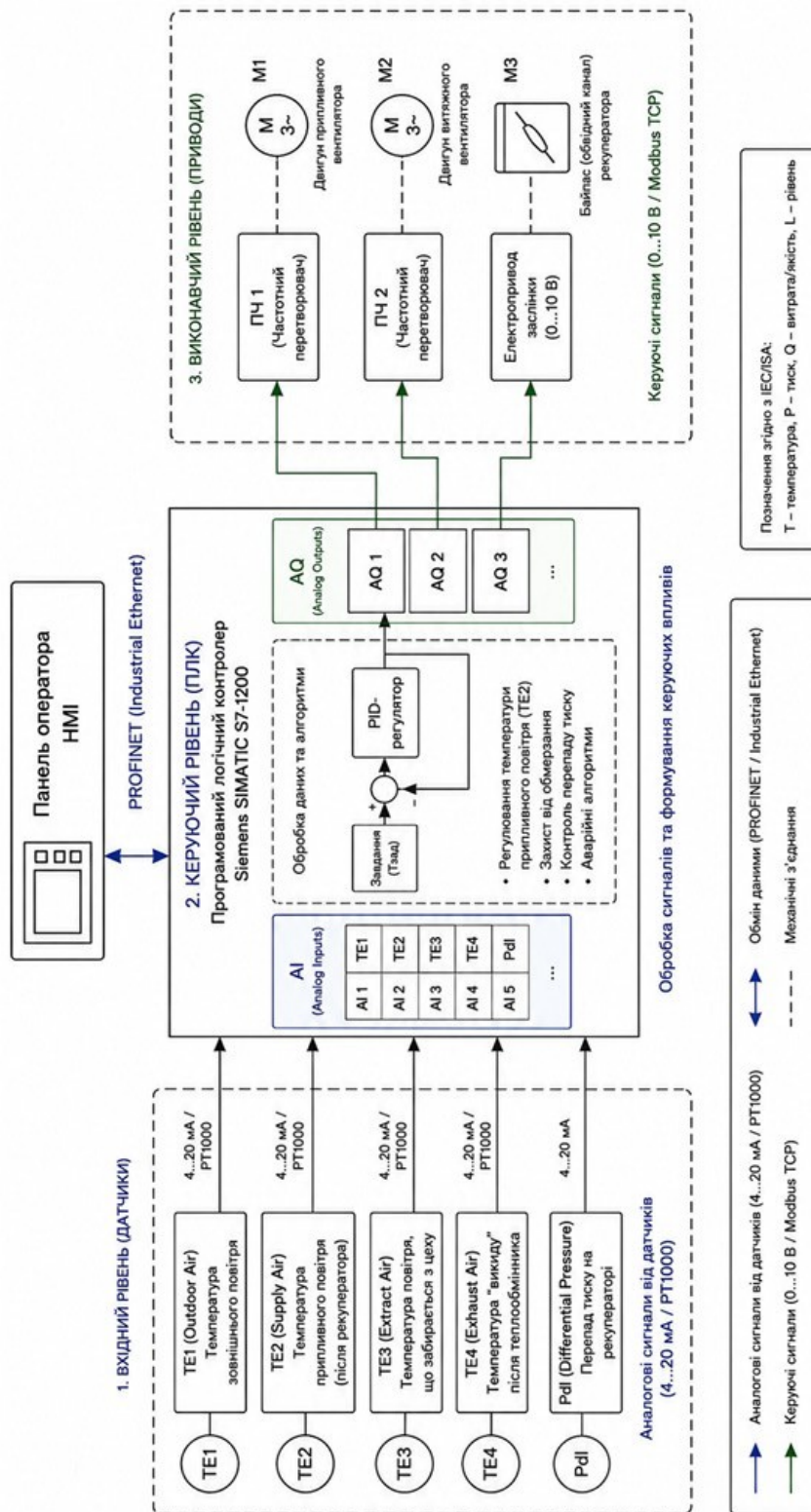
ДОДАТОК А

МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ

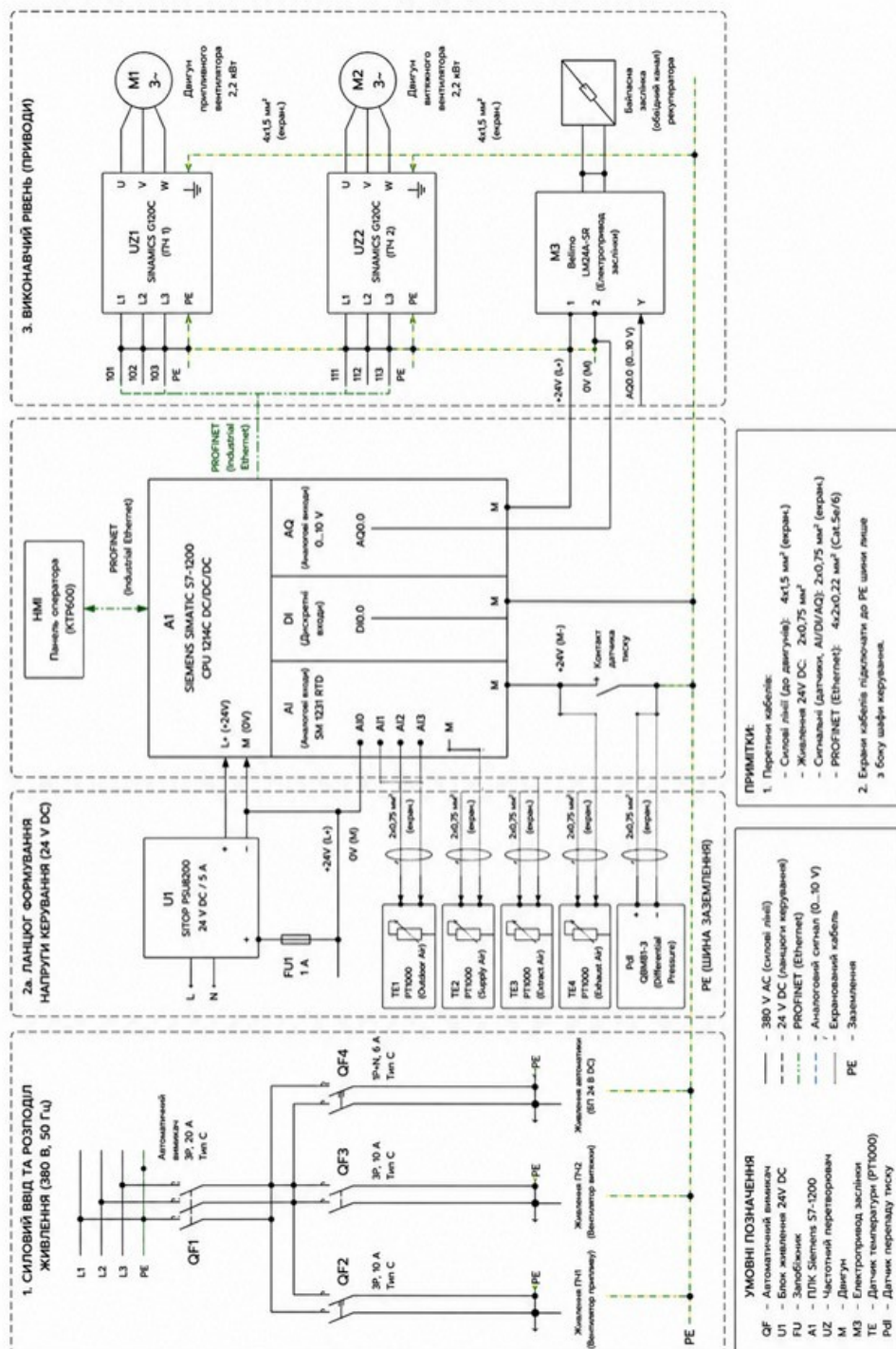
ІСНУЮЧІ РІШЕННЯ КЕРУВАННЯ РЕКУПЕРАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ



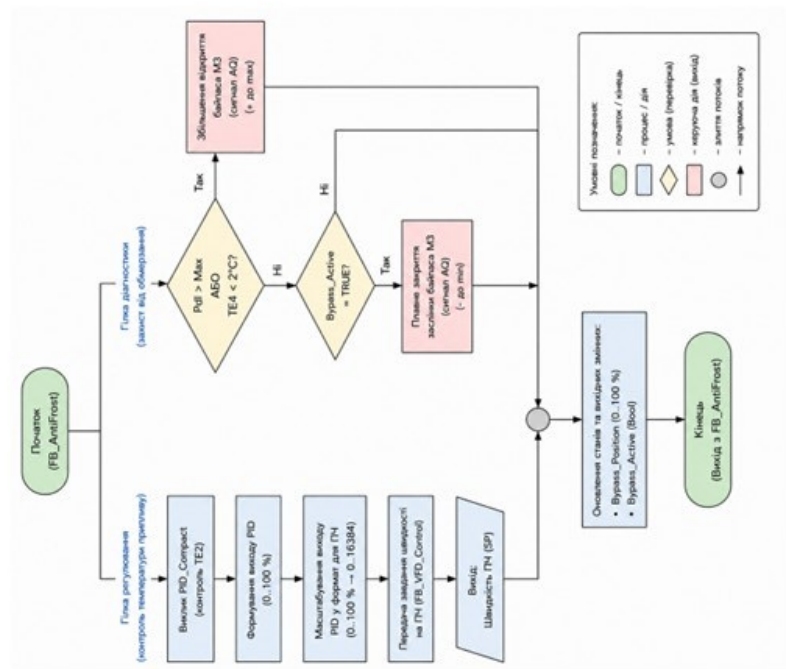
СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ



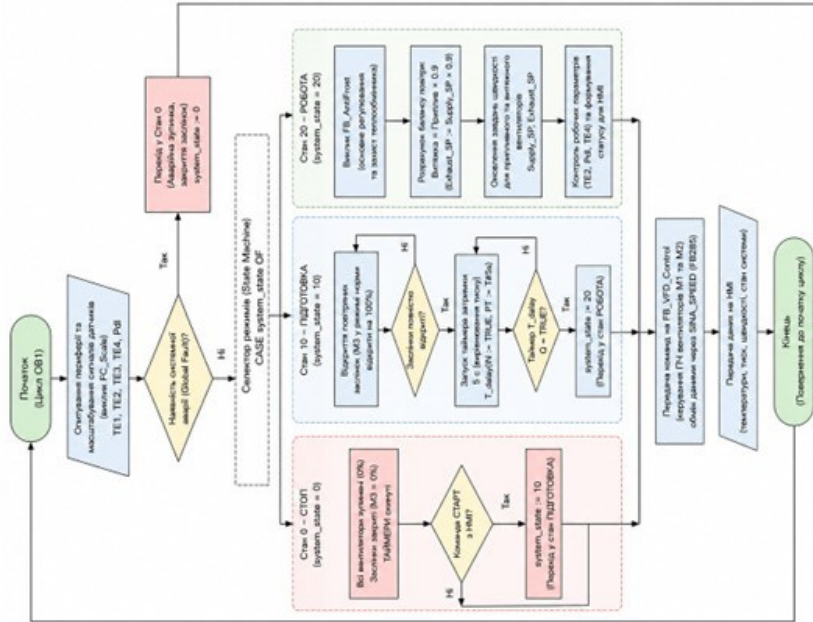
ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА СИСТЕМИ



АЛГОРИТМИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

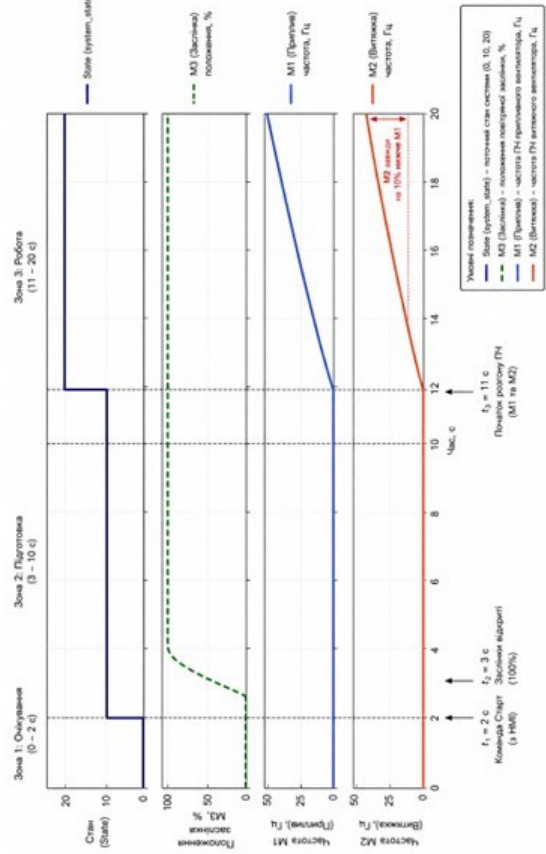


Алгоритм функціонального блоку ПІД-регулювання та антифризового захисту (FB_AntiFrost)

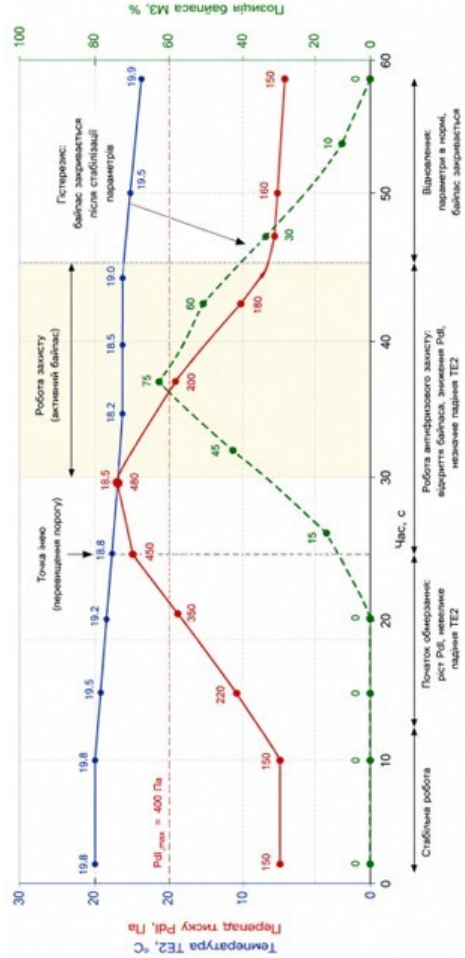


Алгоритм головного циклу координації та обробки аварійних станів

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ – ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Циклограма динаміки роботи системи вентиляції (алгоритм координації)



Динаміка роботи системи антифризового захисту рекуператора