

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

ННІ/факультет Навчально-науковий технологічний інститут
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
Форма навчання Заочна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Кійла Дмитра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система
керування електроприводами механізмів аспіраційної системи ливарних дворів
доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг

(повна назва теми)

за матеріалами ПАТ „АрселорМіттал Кривий Ріг”

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник ДОЦЕНТ, К.Т.Н.

(наук. ступінь, вчене звання)

Батарєєв В.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06.2026 № 398-ст

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступінь, вчене звання

Є.О. Модло

Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
ТЕХНОЛОГІЧНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
Кафедра Електричної інженерії та автоматизації

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« ____ » _____ 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ(КИ)

Кійла Дмитра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система керування електроприводами механізмів аспіраційної системи ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

керівник випускної роботи Батарєєв Віктор Володимирович, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року
№ 240-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 29.05.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

Об'єкт автоматизації - аспіраційна система ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; корисний об'єм ДП №8 - 2700 м³; добова продуктивність - до 6000 т чавуну; ексгаустери Мех.801/802 - 2×315 кВт, 6 кВ, діапазон регулювання швидкості 100–994,9 об/хв; аспіраційні клапани Мех.651–662 - 12 шт., 0,37 кВт, 380 В, приводи AUMA/Rotork, позиції 0°/60°/90°; установка пиловловлювання Мех.803 - 132 кВт, 6 кВ; конвеєр пилу Мех.806 - 4 кВт, 380 В; кількість сигналів - 224 DI, 64 DO, 24 AI, 4 AO; ГДК завислих частинок у повітрі робочої зони - 6 мг/м³; вимоги - трифазне фазове управління ексгаустерами, апаратні блокування клапанів, резервування ПЛК з перемиканням менше 300 мс, архівування параметрів 365 діб

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 4.1 Аналітична частина: Загальна характеристика підприємства та об'єкта

автоматизації. Технологічний процес аспіраційної системи та фази технологічного циклу. Склад та технічні характеристики обладнання (ексгаустери, клапани, пиловловлювання). Аналіз існуючої релейно-контакторної системи управління та обґрунтування необхідності модернізації. Енергетичний та екологічний аналіз недоліків існуючої системи. 4.2 Основна частина: Вибір та обґрунтування комплексу технічних засобів (контролер CPU 1515-2 PN, модулі ET 200MP, мережа PROFINET MRP). Алгоритмічне та програмне забезпечення: алгоритми управління ексгаустерами, клапанами, система захисних блокувань FC18, кінцевий автомат фаз FC20. Інтерфейс оператора та SCADA-система WinCC V7.5 SP2. Розрахунок надійності каналу вимірювання температури підшипника ексгаустера. Заходи з охорони праці: аналіз шкідливих чинників, засоби захисту, розрахунок захисного заземлення.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
 ВРБ.174.240-ст.04.Е7 - Схема аспіраційної системи ливарних дворів ДП №8;
 ВРБ.174.240-ст.04.Е1 - Структурна схема КТС автоматизованої системи управління аспіраційною системою ДП.№8; ВРБ.174.240-ст.04.Е2 - Функціональна схема АСУ аспіраційної системи ДП №8; ВРБ.174.240-ст.04.Е0.1 - Алгоритм управління ексгаустером Мех.801 (з функцією захисного відключення); ВРБ.174.240-ст.04.Е0.2 - Алгоритм управління аспіраційним клапаном (Мех.651-662); ВРБ.174.240-ст.04.Е0.3 - Алгоритм послідовного відкриття клапанів у Фазі 1 (покрокова діаграма).

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Батарєєв В.В.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Батарєєв В.В.	10.04.2026	10.04.2026

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	01.05.2026	
2.	Основна частина	25.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	27.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	28.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	29.05.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	22.06.2026	

Студент

(підпис)

Кійло Д.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Батарєєв В.В.

(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.				
1	A3	ВРБ.174.240-см.04.E7	Схема аспіраційної системи	1						
2			ливарних дворів ДП №8							
3	A3	ВРБ.174.240-см.04.E1	Структурна схема КТС	1						
4			автоматизованої системи							
5			управління аспіраційною							
6			системою ДП.№8							
7	A3	ВРБ.174.240-см.04.E2	Функціональна схема АСУ	1						
8			аспіраційної							
9			системи ДП №8							
10	A3	ВРБ.174.240-см.04.E0.1	Алгоритм управління	1						
11			ексгаустером Мех.801							
12			(з функцією захисного							
13			відключення)							
14	A3	ВРБ.174.240-см.04.E0.2	Алгоритм управління	1						
15			аспіраційним клапаном							
16			(Мех.651-662)							
17	A3	ВРБ.174.240-см.04.E0.3	Алгоритм послідовного	1						
18			відкриття клапанів							
19			у Фазі 1							
20			(покрокова діаграма)							
21	A4	ВРБ.174.240-см.04.ПЗ	Пояснювальна записка	62						
22										
23										
				ВРБ.174.240-см.04.ВР						
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система керування електроприводами механізмів аспіраційної системи ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» Відомість роботи		Літера		Аркуш	Аркушів
Розроб.		Кійло Д.С.							4	1
Пров.		Батарєєв В.В.								
Н.контр.		Батарєєв В.В.					ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА Гр.ЗАВ-23ск			
Затв.		Модло Є.О.								

РЕФЕРАТ

Бакалаврська кваліфікаційна робота містить: 62с., 11 рис., 14 табл., 14 джерел.

Об'єкт дослідження: технологічний комплекс аспіраційної системи ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що включає ексгаустери Мех.801, Мех.802, 12 аспіраційних клапанів Мех.651–662, установку пиловловлювання Мех.803 та конвеєр Мех.806.

Предмет дослідження: програмно-технічні засоби та алгоритми автоматизованого керування, що забезпечують дистанційне та автоматичне управління електроприводами механізмів аспіраційної системи.

Мета роботи: підвищення ефективності та надійності роботи аспіраційної системи шляхом впровадження системи автоматичного управління на базі програмованого контролера SIMATIC S7-1500 з частотним регулюванням ексгаустерів та SCADA-системою WinCC V7.5 SP2.

Методи дослідження: системний аналіз технологічного процесу; теорія автоматичного керування для синтезу регуляторів; порівняльний аналіз апаратних платформ автоматизації; інженерне проектування комплексів технічних засобів.

Основні результати:

- розроблено структуру КТС та функціональну схему АСУ на базі центрального контролера CPU 1515-2 PN та периферійних модулів ET 200MP;
- обґрунтовано використання мереж Industrial Ethernet та PROFINET з топологією «Кільце» (MRP);
- розроблено алгоритми управління технологічними фазами та систему аварійних блокувань;

Ключові слова: алгоритм управління, аспіраційна система, доменна піч, ексгаустер, клапан, PROFINET, пиловловлювання, SCADA, SIMATIC S7-1500, частотний перетворювач.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Загальна характеристика підприємства та об'єкта.....	10
1.2 Технологічний процес аспіраційної системи	11
1.3 Склад та технічні характеристики обладнання.....	14
1.3.1 Ексгаустери (Мех.801, Мех.802)	16
1.3.2 Клапани відбору газів (Мех.651–662).....	18
1.4 Аналіз існуючої системи управління та обґрунтування необхідності модернізації.....	19
1.5 Деталізований технічний аналіз недоліків системи управління та заходи з усунення	21
1.5.1 Відсутність архівування та наслідки для розслідування аварій на ДП №8	23
1.5.2 Енергетичний аналіз постійної роботи ексгаустерів на максимальній швидкості	24
1.6 Екологічне та економічне обґрунтування модернізації	25
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	26
2.1 Вибір та обґрунтування комплексу технічних засобів.....	26
2.1.1 Обґрунтування вибору контролера CPU 1515-2 PN.....	29
2.1.2 Розрахунок модулів вводу-виводу ET 200MP	30
2.1.3 Специфікація комплексу технічних засобів.....	32
2.2 Алгоритмічне та програмне забезпечення.....	33
2.2.1 Алгоритм управління системою у Фазі 1 (злив чавуну)	37

2.2.2 Мережева структура. Перехід з PROFIBUS на PROFINET з топологією «Кільце» (MRP).....	41
2.3 Інтерфейс оператора та візуалізація.....	42
2.3.1 Функції SCADA-системи WinCC V7.5 для управління аспірацією ...	45
2.3.2 Система мнемосхем та аварійної сигналізації	46
2.4 Розрахунок надійності каналу вимірювання температури підшипника ексгаустера	48
2.5 Охорона праці	53
2.5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників.....	53
2.5.2 Заходи з охорони праці та виробничої санітарії	54
2.5.3 Засоби індивідуального захисту	55
2.5.4 Пожежна безпека.....	56
2.5.5 Розрахунок захисного заземлення.....	57
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	61

ВСТУП

Актуальність теми. Металургійне виробництво є однією з найбільш пилонабезпечних галузей промисловості, а ливарні двори доменних печей - найбільш критичними з огляду на інтенсивність пиловиділення ділянками. Без безперервно діючої аспіраційної системи концентрація пилу в зоні дихання операторів може перевищувати гранично допустимі значення в десятки і навіть сотні разів, що ставить під загрозу як здоров'я персоналу, так і законність провадження виробництва відповідно до [1].

Провідні металургійні комбінати (ТМСС, Баостіл, ПОСКО) вже впровадили системи автоматизованого управління аспіраційними пристроями на базі сучасних ПЛК [2]. В Україні питання модернізації систем аспірації залишається відкритим через моральний та фізичний знос обладнання, відсутність цифрового архівування і неможливість реалізації енергоощадних режимів роботи екстаустерів.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності, надійності та енергоекономічності роботи аспіраційної системи ливарних дворів шляхом модернізації системи управління на базі контролера SIMATIC S7-1500 [6] з SCADA-системою WinCC V7.5 SP2 [7].

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) провести аналіз технологічного процесу аспірації як об'єкта автоматизації та виявити недоліки існуючої системи управління;
- 2) виконати огляд та порівняльний аналіз сучасних апаратних засобів автоматизації, обґрунтувати вибір контролера та периферійних модулів [6];
- 3) розробити алгоритми управління механізмами аспіраційної системи та структуру програмного забезпечення контролера;
- 4) спроектувати систему візуалізації та диспетчерського управління на базі SCADA-системи WinCC V7.5 SP2 [7];
- 5) розробити заходи з охорони праці та розрахунок захисного заземлення згідно з [8].

Об'єкт дослідження - технологічний процес аспірації ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Предмет дослідження - методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого управління електроприводами механізмів аспіраційної системи.

Методи дослідження. В основу роботи покладено методи системного аналізу технологічного процесу аспірації як об'єкта автоматизації, що дозволяють виявити причинно-наслідкові зв'язки між режимами роботи механізмів і якістю вловлювання пилу. Для синтезу алгоритмів управління застосовано апарат теорії автоматичного керування, зокрема методи проектування кінцевих автоматів із захисними блокуваннями. Вибір апаратної платформи здійснено на підставі порівняльного аналізу технічних характеристик сучасних промислових контролерів з урахуванням вимог надійності та перспектив розвитку системи. Проектні рішення розроблено відповідно до нормативно-технічної документації підприємства [1, 2, 3, 4].

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені технічні рішення призначені для впровадження на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у ході чергового капітального ремонту ДП №8 і забезпечують три взаємопов'язаних ефекти. Реалізація частотного регулювання екстаустерів за фазами технологічного циклу знижує споживання електроенергії на 15–20% [6]. Впровадження попереджувальної діагностики на базі WinCC переводить обслуговування обладнання з реактивного у плановий режим, скорочуючи витрати на аварійний ремонт на 30-40% [7]. Безперервний контроль запиленості повітря і автоматичне управління клапанами гарантують дотримання екологічних норм відповідно до [1], усуваючи ризик штрафних санкцій за перевищення ГДК.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальна характеристика підприємства та об'єкта

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є одним з найбільших інтегрованих металургійних комплексів Східної Європи з повним виробничим циклом: видобуток залізної руди, виробництво агломерату та окатишів, виплавка чавуну та сталі, прокатне виробництво [2]. Доменний цех підприємства включає вісім доменних печей, з яких ДП №8 є найбільшою.

ДП №8 є найбільшою піччю комплексу з корисним об'ємом 2700 м³ та добовою продуктивністю до 6000 т чавуну, що обумовлює і найбільш інтенсивне пиловиділення під час операцій зі зливу металу та шлаку. Концентрація пилу в газах ливарного двору при відкритій льотці без аспірації може сягати 500 мг/м³, що перевищує ГДК за [1] (6 мг/м³) у понад 80 разів. Ця кратність перевищення унеможливорює перебування обслуговувального персоналу на ливарному дворі без засобів захисту та означає, що зупинка або навіть часткова відмова аспіраційної системи є безпосередньою підставою для зупинки виробничого процесу органами екологічного нагляду відповідно до [1].

Таблиця 1.1

Технічні характеристики доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [1]

Параметр	Значення
1	2
Корисний об'єм	2700 м ³
Добова продуктивність	5500-6000 т чавуну/добу
Кількість льоток для чавуну	4 (2 на ЛД №1, 2 на ЛД №2)
Кількість льоток для шлаку	2 (по одній на ЛД №1 та ЛД №2)
Температура чавуну при випуску	1420–1480 °C

Продовження табл.1.1

1	2
Кількість випусків чавуну на добу	12–14
Тривалість одного випуску	60–90 хв
Концентрація пилу в газах ЛД без аспірації	до 500 мг/м ³
ГДК пилу в робочій зоні згідно з [1]	6 мг/м ³

1.2 Технологічний процес аспіраційної системи

Аспіраційна система ливарних дворів виконує функцію примусового відведення та первинного очищення запиленого повітря, що утворюється під час операцій зі зливу чавуну та шлаку через льотки [2]. Загальну компоновку системи наведено на рис. 1.1. Рушійною силою всього аспіраційного тракту слугують два відцентрові ексгаустери Mex.801 та Mex.802 - потужні промислові вентилятори з двигунами по 315 кВт кожен, що живляться від мережі 6 кВ та управляються через тиристорні частотні перетворювачі 801UZ1 та 802UZ1. Саме ексгаустери формують розрідження у газоходах, достатнє для відведення забрудненого повітря від усіх дванадцяти аспіраційних клапанів обох ливарних дворів. Очищення газу від пилу відбувається в електрофільтрі установки пиловловлювання Mex.803, а уловлений пил виводиться до збірної бункера ланцюговим конвеєром Mex.806.

Технологічний цикл аспіраційної системи поділяється на чотири фази, що відповідають різним стадіям процесу випуску чавуну та регламентовані технічною документацією підприємства [2] (табл. 1.2). Кожна фаза характеризується власним набором активних механізмів і конкретними значеннями частоти обертання ексгаустерів - саме від правильності та своєчасності чергування фаз безпосередньо залежить як ефективність пиловловлювання, так і збереження цілісності газоходів. Аналіз технологічного

процесу свідчить про те, що передчасне відкриття клапана шлакового жолоба до виходу ексгаустера на робочу частоту призводить до різкого стрибка розрідження та гідравлічного удару в газоході, здатного пошкодити гнучкі рукави та фланцеві з'єднання. Це обумовлює вимогу до системи управління: вона повинна гарантувати не лише сам факт відкриття або закриття кожного клапана, а й строгу часову та логічну узгодженість цих дій із фактичним станом ексгаустера.

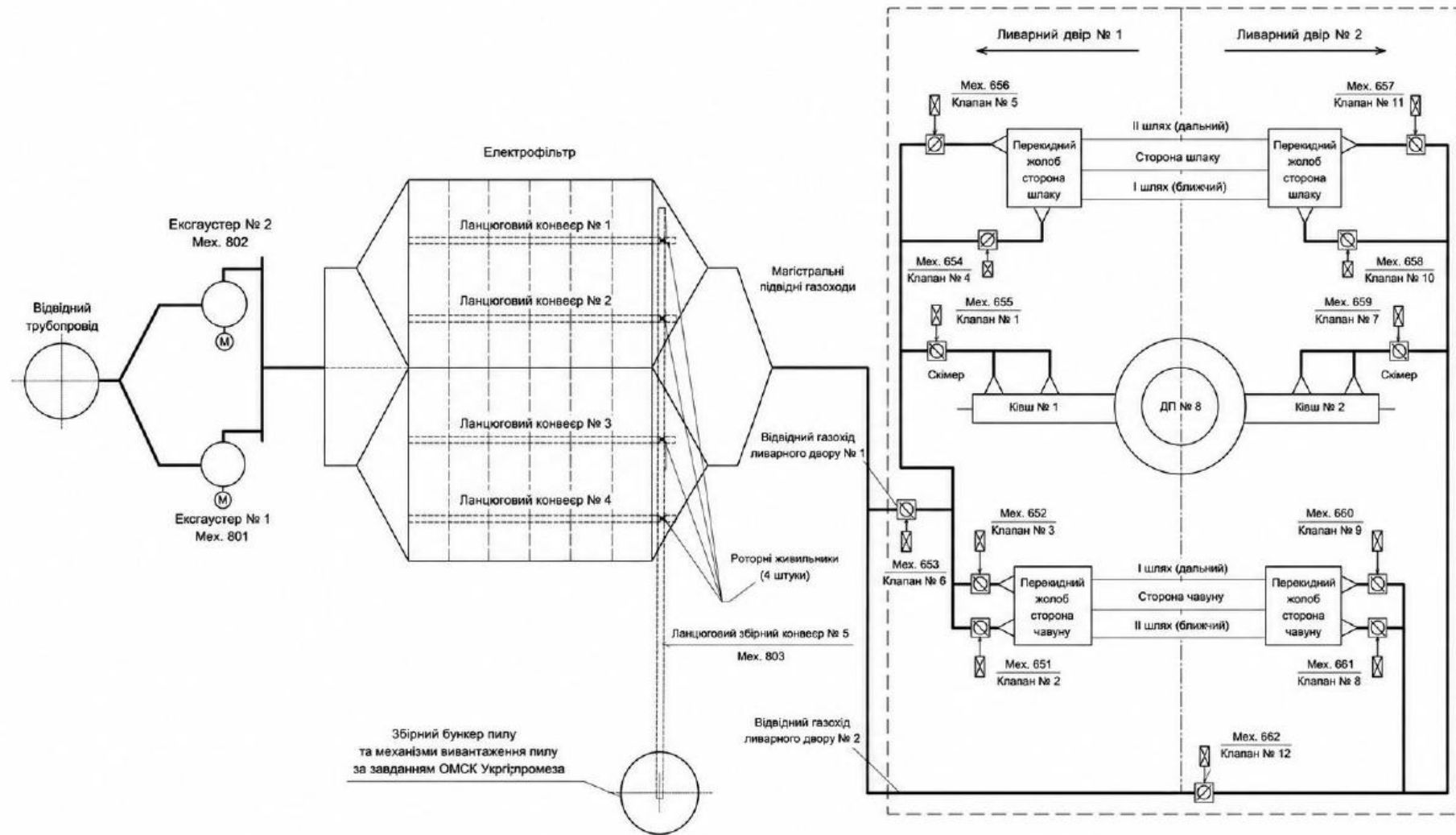


Рис. 1.1. Схема аспіраційної системи ливарних дворів ДП №8 [1]

(розроблено автором)

Фази технологічного циклу аспіраційної системи ливарних дворів ДП №8
[1, 2]

Фаза	Стан виробництва	Швидкість ексгаустерів	Стан клапанів
Фаза 0 (пауза)	Між випусками чавуну	100 об/хв	Всі закриті
Фаза 1 (злив чавуну)	Відкрита льотка, тече чавун	778 об/хв	Клапани чавунного жолоба + скімер відкриті
Фаза 2 (чавун + шлак)	Злив чавуну та шлаку одночасно	994,9 об/хв	Всі клапани поточного ЛД відкриті
Фаза 3 (закриття льотки)	Льотку закрито	994,9→778→100 об/хв	Закриваються у зворотному порядку

1.3 Склад та технічні характеристики обладнання

Аспіраційна система ДП №8 включає 16 технологічних механізмів: два ексгаустери, установку пиловловлювання, 12 клапанів в складі двох ливарних дворів та ланцюговий конвеєр для транспортування пилу [1]. Перелік механізмів з основними технічними характеристиками наведено в табл. 1.3.

Технічні характеристики технологічних механізмів аспіраційної системи**[1, 2]**

№	Найменування механізму	Позначення	Потужність, кВт	Напруга	Ливарний двір
1	2	3	4	5	6
1	Ексгаустер №1	Мех.801	2×315=630	6 кВ	—
2	Ексгаустер №2	Мех.802	2×315=630	6 кВ	—
3	АПУ В1 (пиловловлювання)	Мех.803	132	6 кВ	—
4	Клапан скімера льотки №1	Мех.655	0,37	380 В	№1
5	Клапан зливу чавуну льотки №1 (І шлях)	Мех.651	0,37	380 В	№1
6	Клапан зливу чавуну льотки №2 (ІІ шлях)	Мех.652	0,37	380 В	№1
7	Клапан зливу шлаку льотки №1 (І шлях)	Мех.654	0,37	380 В	№1
8	Клапан зливу шлаку льотки №2 (ІІ шлях)	Мех.656	0,37	380 В	№1
9	Клапан магістрального газопроводу	Мех.653	0,37	380 В	№1
10	Клапан скімера льотки №3	Мех.659	0,37	380 В	№2

1	2	3	4	5	6
11	Клапан зливу чавуну льотки №3 (І шлях)	Мех.661	0,37	380 В	№2
12	Клапан зливу чавуну льотки №4 (ІІ шлях)	Мех.660	0,37	380 В	№2
13	Клапан зливу шлаку льотки №3 (І шлях)	Мех.658	0,37	380 В	№2
14	Клапан зливу шлаку льотки №4 (ІІ шлях)	Мех.657	0,37	380 В	№2
15	Клапан магістрального газопроводу	Мех.662	0,37	380 В	№2
16	Конвеєр №5 ланцюговий збірний	Мех.806	4,0	380 В	—

1.3.1 Ексгаустери (Мех.801, Мех.802)

Ексгаустери є найвідповідальнішими та найенергоємнішими механізмами системи. Кожен являє собою потужний відцентровий вентилятор промислового класу з двигуном 315 кВт, що живиться від мережі 6 кВ через тиристорний перетворювач частоти 801UZ1 або 802UZ1 відповідно [1]. Застосування частотно-регульованого приводу зумовлено не лише вимогами енергоефективності, а й фізичною необхідністю плавного наростання розрідження в газоходах під час переходу між фазами: різкий пуск ексгаустера на номінальні оберти без попереднього відкриття клапанів спричинює кавітаційні явища та неприпустимі механічні навантаження на лопатки робочого колеса. Завдяки інтеграції частотно-регульованого приводу стає можливим не лише мінімізувати ризик гідроударів, а й реалізувати режим

мінімальної витрати у Фазі 0 (100 об/хв), що при майже нульовій споживаній потужності зберігає готовність системи до швидкого виходу на робочий режим. Параметри контролю температури та вібрації, що визначають критерії захисного відключення, наведено в табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Технічні параметри ексгаустерів аспіраційної системи ДП №8 [1]

Параметр	Значення
Виробник (країна)	Siemens (DE) / ABB (CH/SE)
Потужність двигуна	2×315 кВт
Напруга живлення	6 кВ
Перетворювач частоти (ПЧ)	801UZ1 / 802UZ1
Сигнал завдання швидкості	АО 0–10 В
Швидкість: Фаза 0 (пауза)	100 об/хв
Швидкість: Фаза 1 (злив чавуну)	778 об/хв
Швидкість: Фаза 2 (злив чавуну + шлаку)	994,9 об/хв
Поріг температури підшипника (попередження)	70 °С
Аварійне відключення за температурою підшипника	80 °С
Поріг температури статора (попередження)	120 °С
Аварійне відключення за температурою статора	130 °С
Максимальна вібрація (аварія)	50 мкм

1.3.2 Клапани відбору газів (Mex.651–662)

Дванадцять аспіраційних клапанів розподілено симетрично по шість на кожний з двох ливарних дворів. У складі кожного двору функціонують два клапани зливу чавуну, один клапан скімера, два клапани зливу шлаку та один магістральний клапан газопроводу [1]. Таке розподілення забезпечує незалежне управління аспірацією кожної льотки і можливість одночасного вловлювання пилу від різних джерел в межах одного двору. Клапани оснащені електромеханічними поворотними приводами AUMA або Rotork із часом повного ходу 60–68 секунд - конструктивна особливість, яка безпосередньо враховується при синтезі алгоритму послідовного відкриття. Принципово важливим є трипозиційне виконання: крім кінцевих положень «закрито» (0°) та «відкрито» (90°), кожен клапан має проміжну позицію 60°, що фіксується окремим кінцевим вимикачем. Саме ця проміжна позиція дозволяє реалізувати плавне нарощування перетину газоходу і уникнути стрибка розрідження, притаманного двопозиційному управлінню. Технічні параметри клапанів наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

Технічні параметри клапанів аспіраційної системи (Mex.651-662) [1]

Параметр	Значення
1	2
Виробник (країна)	AUMA (DE) / Rotork (UK)
Тип приводу	Електромеханічний поворотний привід
Час повного ходу	60–68 секунд
Кути фіксованих положень	0° (закрито), 60° (проміжне), 90° (відкрито)
Напруга двигуна приводу	380 В, 50 Гц

Продовження табл. 1.5

1	2
Потужність двигуна	0,37 кВт
Контроль положення	Кінцеві вимикачі SQ1 (відкрито), SQ2 (закрито)
Тепловий захист	Реле КК - сигнал до ПЛК
Режими управління	Місцевий (пульт 71ПУ), дистанційний (ПЛК), автоматичний
Ступінь захисту корпусу	IP54
Максимальне розрідження	-2500 Па

1.4 Аналіз існуючої системи управління та обґрунтування необхідності модернізації

На момент проектних робіт система управління аспіраційними механізмами ДП №8 базувалась на релейно-контакторній апаратурі - реле РП-25 та контакторах типів КЗ і КЕ - з жорсткою схемно-реалізованою логікою управління [1]. Вік встановленого обладнання перевищує 15 років, що значно перевищує розрахунковий ресурс реле РП-25 в умовах агресивного середовища ливарного двору з підвищеним рівнем запиленості, вологості та вібрації від ексгаустерів. Аналіз технологічного процесу свідчить про те, що будь-яке погіршення характеристик реле - збільшення часу спрацьовування, неповне замикання контакту, зниження ізоляційного опору - безпосередньо порушує часові співвідношення у ланцюгу послідовного відкриття клапанів і може спричинити гідравлічний удар або неповне вловлювання пилю. До цього додається той факт, що реле РП-25 знято з виробництва: заміна їх аналогами сторонніх виробників потребує переробки принципових схем управління через

відмінності у монтажних розмірах і характеристиках катушок, що фактично робить будь-який ремонт повноцінною реконструкцією.

Порівняльну характеристику існуючої та модернізованої систем управління наведено в табл. 1.6.

Таблиця 1.6

Порівняльна характеристика систем управління аспірацією ДП №8 [1, 6, 7]

Критерій	Існуюча система (реле РП-25)	Після модернізації (S7-1500, WinCC V7.5)
Апаратна база	Реле РП-25, КЗ, КЕ (знос >15 років)	CPU 1515-2 PN, модулі ET 200MP [6]
Кількість контрольних кабелів	~500 ліній до механізмів 651–662 [1]	2 шини PROFINET + Industrial Ethernet [9]
Час реакції системи	100–500 мс (час відпускання катушки)	OB1 ≤ 20 мс; захист ≤ 50 мс (OB35) [6]
Діагностика несправностей	Тільки візуальний огляд або прозвонка	Самодіагностика CPU + WinCC Alarm Logging [7]
Архівування подій	Відсутнє (тільки паперові журнали)	WinCC SQL-архів >1 рік, мітка часу 1 мс [7]
Регулювання екстаустерів 801/802	Пуск/стоп; постійно 994,9 об/хв	АО 0–10 В → ПЧ: за фазами; економія 15–20% [6]
Резервування	Відсутнє	Гаряче резервування CPU; перемикання <300 мс [6]
Доступність запчастин	Критична: реле РП-25 знято з виробництва	Siemens підтримує S7-1500 до 2040+ р. [6]
MTBF апаратної частини	~2000–5000 год (реле РП-25 у пилу)	Понад 50 000 год (SIMATIC, промисловий клас) [6]

1.5 Деталізований технічний аналіз недоліків системи управління та заходи з усунення

Проведений системний аналіз документації [1, 2] та умов експлуатації дозволив виявити і систематизувати десять технічних недоліків існуючої релейної системи управління (табл. 1.7). У своїй сукупності ці недоліки утворюють три взаємопов'язані проблемні вузли: моральний та фізичний знос апаратної бази, що унеможлиблює надійне відтворення логіки управління; відсутність цифрових засобів реєстрації та аналізу, що позбавляє інженерно-технічний персонал об'єктивної інформації про стан системи; та жорстка релейна логіка, яка не допускає жодної адаптації алгоритму управління без фізичного перемонтажу схеми. Сукупна дія цих факторів обумовлює не лише зниження надійності аспіраційної системи, а й принципову неможливість реалізації енергоощадних режимів роботи та сучасних функцій захисту і діагностики.

Таблиця 1.7

Деталізований технічний аналіз недоліків системи управління аспірацією ДП №8 [1, 2, 6, 7]

№	Недолік (технічна суть)	Наслідок для ДП №8	Технічний захід з усунення
1	2	3	4
1	Відмова реле РП-25 в агресивному середовищі (пил 50 мг/м ³ , вібрація експаустерів 801/802). Моральний знос системи перевищує 15 років [1]	Позапланові зупинки аспірації; ризик перевищення ГДК пилу понад 6 мг/м ³ [1]	ПЛК SIMATIC S7-1500, IP54: CPU 1515-2 PN, MTBF > 50 000 год [6]

Продовження табл. 1.7

1	2	3	4
2	Відсутність архівування подій. Неможливість розслідування аварій ексгаустерів 801/802 без хронологічних даних	При аварії неможливо встановити першопричину - перегрів підшипника чи збій у ланцюзі управління	WinCC Runtime: SQL-архів із точністю до мс; тренди AI-тегів 801PT 1/2 за 365 днів [7]
3	Відсутність апаратного резервування	Вихід з ладу одного реле зупиняє всю аспіраційну систему	Резервний контролер NKASL-R; синхронізація через PROFINET; перемикання <300 мс [6]
4	~500 контрольних кабелів між шафою NKASL та механізмами 651-662 [1]	Корозія кабелів в агресивних газах; обрив - до 24 год простою	PROFINET: один кабель на сегмент до 32 пристроїв; скорочення кабельних трас у 10-15 разів [9]
5	Жорстка логіка: зміна алгоритму вимагає перемонтажу проводів	Неможливо впровадити трипозиційне управління клапанами без тижневого простою	TIA Portal: зміна алгоритму FC1-FC12 за 2-4 год без монтажних робіт [6]
6	Ексгаустери 801/802 постійно на 994,9 об/хв. $P \sim n^3$	Надлишкові витрати електроенергії до 20% добового споживання у паузах між випусками	ПЧ 801UZ1/802UZ1 + АО 0-10 В: Фаза 0 - 100 об/хв; добова економія ~5856 кВт·год [6]
7	Відсутність НМІ: лише лампи на щитах 71ПУ-3.1.1 і 71ПУ-3.2.1	Оператор не може відстежувати 50+ індикаторів одночасно; запізнення виявлення аварії на 2-5 хв	WinCC Runtime V7.5 SP2: мнемосхема системи, тренди, журнал тривог [7]

Продовження табл. 1.7

1	2	3	4
8	Час реакції реле 100-500 мс	Захисне відключення ексгаустера при Тпідш. = 80°C із запізненням може пошкодити підшипник	ОВ35 (переривання 100 мс): захисне відключення < 50 мс [6]
9	Контроль клапанів 651- 662 лише в крайніх положеннях	Неможливо реалізувати трипозиційне управління (0°/60°/90°); гідравлічні удари	DI 655O 60 (реле K5): фіксація 60°; ПЛК реалізує три положення клапанів [1]
10	Відсутність вимірювання запиленості. Ризик перевищення ГДК та штрафних санкцій	Немає зворотного зв'язку за ефективністю аспірації	AI INDIC_ZAPYL (0–20 мА): попередження > 30 мг/м³; аварія > 50 мг/м³; архів WinCC [1, 7]

1.5.1 Відсутність архівування та наслідки для розслідування аварій на ДП №8

Відсутність архівування технологічних параметрів є одним з найкритичніших недоліків існуючої системи з погляду промислової безпеки. При існуючій релейній системі аварійне відключення ексгаустера Mex.801 через перегрів підшипника залишає технічний персонал без жодних об'єктивних даних про передісторію події [1]. Неможливо встановити, чи мала місце поступова деградація підшипника протягом кількох годин - що свідчило б про необхідність планового обслуговування, - чи перегрів виник раптово внаслідок перевантаження приводу або попадання стороннього тіла. Ця

невизначеність змушує технічний персонал щоразу проводити повне діагностування обладнання, збільшуючи час простою аспіраційної системи і, як наслідок, час роботи ливарного двору без аспірації [1].

У системі з WinCC Runtime журнал тривог фіксує: «03:44:23 - WARNING: 801PT1 = 72 °C (поріг 70 °C)», «03:47:11 - ALARM: 801PT1 = 81 °C - аварійне відключення». Така деталізація дозволяє розмежувати ситуацію із прогресуючою несправністю підшипника (тривалий процес підвищення температури) від випадкового перегріву. Завдяки SQL-архіву WinCC [7] хронологія подій зберігається до 365 днів.

1.5.2 Енергетичний аналіз постійної роботи ексгаустерів на максимальній швидкості

За законом подібності для турбомашин споживана потужність вентилятора пропорційна кубу частоти обертання: $P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3$. При зниженні швидкості ексгаустера з 994,9 об/хв до 100 об/хв (Фаза 0) відносна потужність становить:

$$P_0 / P_2 = (100/994,9)^3 = 0,001 \rightarrow P_0 = 0,1\% \text{ від } P_2 \quad (1.1)$$

де P_0 - споживана потужність у Фазі 0, кВт; P_2 - споживана потужність у Фазі 2 (при 994,9 об/хв), кВт.

Таким чином, добова економія від введення Фази 0 при тривалості пауз між випусками приблизно 10 хвилин на годину складає орієнтовно 5856 кВт·год лише на ексгаустерах - і це без урахування зниження витрат на охолодження та зменшення теплового навантаження на підшипникові вузли. Це обумовлює необхідність застосування частотного регулювання як невід'ємного та ключового елементу нової системи управління: будь-яка модернізація із

збереженням режиму постійної роботи на максимальних обертах залишала б основний енергетичний резерв незатребуваним.

1.6 Екологічне та економічне обґрунтування модернізації

Відповідно до [1], ГДК завислих твердих частинок у повітрі робочої зони ливарного двору не повинна перевищувати 6 мг/м^3 . Аналіз технологічного процесу свідчить про те, що без ефективного фазового управління аспіраційними клапанами - за умови несвоєчасного відкриття або порушення послідовності - реальна концентрація пилу в зоні дихання операторів може в 10-80 разів перевищувати допустимий рівень, що є прямим порушенням вимог [1] та підставою для зупинки виробництва і штрафних санкцій. Отже, надійність системи управління аспіраційними механізмами є питанням не лише технічним, а й правовим та економічним.

З економічної точки зору впровадження модернізованої системи управління забезпечує три незалежних та взаємно підсилювальних джерела ефекту. По-перше, реалізація режиму «управління за необхідністю» через частотне регулювання ексгаустерів за фазами циклу скорочує витрати на електроенергію на 15-20%, що при цілодобовій роботі ДП №8 складає тисячі кіловат-годин щодобово [6]. По-друге, перехід від реактивного до планово-попереджувального обслуговування завдяки WinCC-діагностиці скорочує витрати на аварійний ремонт на 30-40% і одночасно усуває ризик зупинки виробництва через відсутність запчастин для знятих з виробництва реле РП-25 [7]. По-третє, безперервний автоматичний контроль концентрації пилу виключає підставу для штрафних санкцій та примусової зупинки виробництва органами екологічного нагляду відповідно до законодавства України.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Вибір та обґрунтування комплексу технічних засобів

Вибір апаратної платформи для модернізованої системи управління здійснюється на підставі системного аналізу об'єкта управління, вимог технічного завдання [1, 2] та критеріїв надійності, що є визначальними для безперервних технологічних процесів металургійного виробництва. Структурну схему комплексу технічних засобів (КТЗ) наведено на рис. 2.1.

Систему побудовано за трирівневою ієрархічною архітектурою (рис. 2.2) [2], яка є загальноприйнятим стандартом для промислових систем управління безперервними технологічними процесами. Нижній рівень утворює польове обладнання безпосереднього виконання: дванадцять аспіраційних клапанів Mex.651–662, два ексгаустери Mex.801 та Mex.802 з частотними перетворювачами 801UZ1/802UZ1, датчики температури підшипників і статорів, датчики вібрації і запиленості, а також ланцюговий конвеєр Mex.806. Середній рівень представлений центральним контролером SIMATIC S7-1500 у виконанні CPU 1515-2 PN з розподіленою периферією ET 200MP - саме цей рівень реалізує всю логіку управління, захисні блокування та обмін між польовим обладнанням і верхнім рівнем. Верхній рівень реалізовано на базі SCADA-системи WinCC V7.5 SP2 [7] на промислових ПК SIMATIC Rack PC 547B з підключенням через Industrial Ethernet і забезпечує оперативну візуалізацію, дистанційне управління та довгострокове архівування технологічних параметрів.

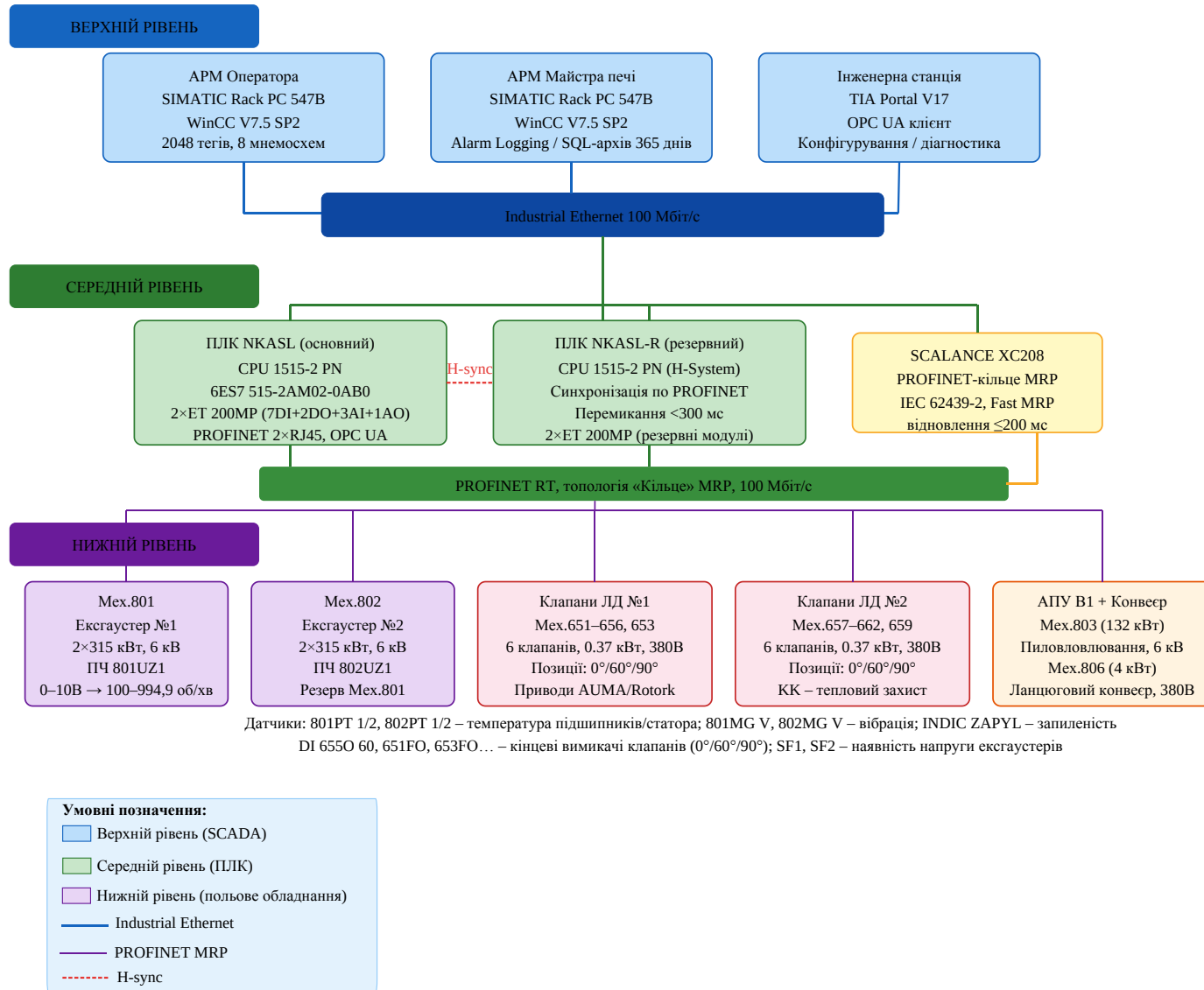


Рис. 2.1. Структурна схема КТС автоматизованої системи управління аспіраційною системою ДП №8
(розроблено автором)

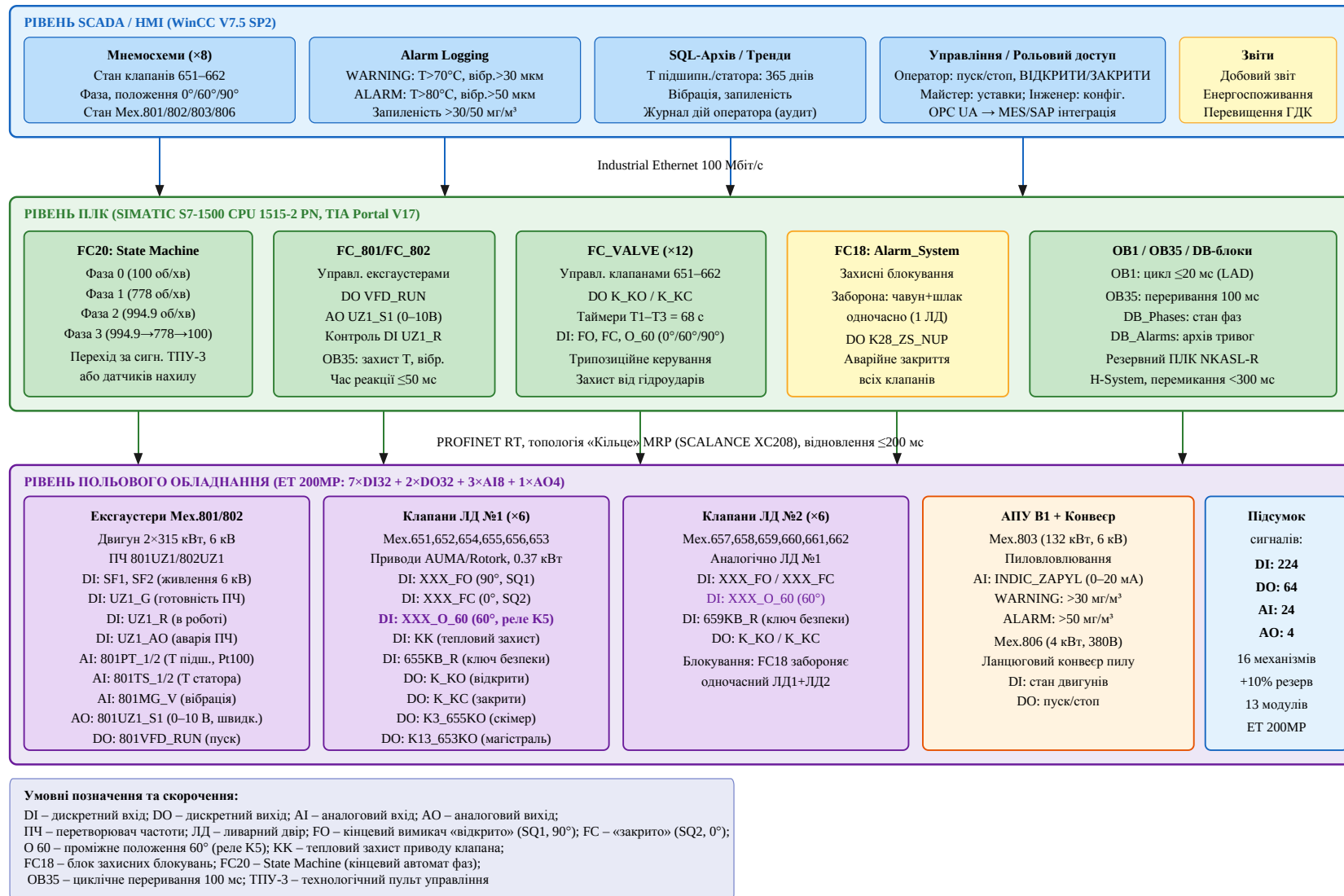


Рис. 2.2. Функціональна схема АСУ аспіраційної системи ДП №8
(розроблено автором)

2.1.1 Обґрунтування вибору контролера CPU 1515-2 PN

Перед обґрунтуванням вибору конкретної моделі контролера необхідно встановити вимоги до апаратної платформи, які формуються безпосередньо з аналізу об'єкта управління. Аспіраційна система ДП №8 формує понад 200 дискретних вхідних сигналів від кінцевих вимикачів клапанів та датчиків стану ексгаустерів, близько 24 аналогових каналів температури і вібрації, а також аналогові виходи для керування частотними перетворювачами. Для реалізації захисного відключення ексгаустера за перегрівом підшипника час реакції системи не може перевищувати 50 мс, що відповідає вимогам циклічного переривання OB35. Склад і типи сигналів об'єкта управління наведено у п. 2.1.2; тут важливо підкреслити, що загальна кількість каналів (~300 з урахуванням резерву) визначає необхідний клас центрального процесора і унеможливорює застосування компактних ЦП серії S7-1200. З огляду на наведені вимоги центральний процесор CPU 1515-2 PN є оптимальним вибором у модельному ряду SIMATIC S7-1500 [6]. Продуктивність процесора складає 0,001 мкс на бітову команду - у 50 разів більша, ніж у попередньому поколінні CPU 317-2 DP, - що гарантує виконання циклу OB1 зі стабільним часом не більше 20 мс навіть при повному навантаженні програми. Принципово важливою є нативна підтримка PROFINET RT/IRT без додаткових комунікаційних процесорів CP, а також вбудований OPC UA-сервер для майбутньої інтеграції із системами MES/ERP в рамках концепції Industry 4.0. Стратегічним аргументом на користь вибору є гарантована підтримка виробником до 2040+ року та наявність компонентів на українському ринку, що усуває ризик залежності від імпорту запчастин - ризик, який наочно проявився в ситуації з реле РП-25 існуючої системи.

Технічні характеристики вибраного контролера наведено в табл. 2.1.

Технічні характеристики центрального процесора CPU 1515-2 PN [6]

Параметр	Значення
Виробник (країна)	Siemens AG (DE)
Артикул	6ES7 515-2AM02-0AB0
Час обробки бітових команд	0,001 мкс
Робоча пам'ять програм	1 Мбайт
Робоча пам'ять даних	5 Мбайт
Інтерфейс PROFINET	2 × RJ45; RT/IRT
Підтримка OPC UA	Вбудований OPC UA-сервер
Сумісність TIA Portal	V17+
Час циклу (OB1, типовий)	≤ 20 мс
Час реакції захисного відключення (OB35)	≤ 50 мс
Гаряче резервування	H-System з CPU 1515-2 PN резервним
Ступінь захисту	IP20 (у шафі IP54)
MTBF	> 50 000 год
Підтримка виробника	До 2040+ р. [6]

2.1.2 Розрахунок модулів вводу-виводу ET 200MP

Склад та кількість модулів вводу-виводу визначаються з аналізу повного переліку сигналів об'єкта управління відповідно до технічної документації [1, 2]. Кожен з 12 аспіраційних клапанів формує щонайменше чотири дискретних входи (кінцеві вимикачі «відкрито» SQ1, «закрито» SQ2, «проміжне положення

60°» та тепловий захист приводу КК) і два дискретних виходи (команди «відкрити» та «закрити»). До цього додаються сигнали стану та управління обох ексгаустерів з їхніми частотними перетворювачами, установки пиловловлювання, ланцюгового конвеєра та ключів безпеки. Аналогові входи охоплюють канали температури підшипників і статорів ексгаустерів (по чотири канали PT100 на кожний агрегат), датчики вібрації та запиленості; аналогові виходи 0-10 В подаються на входи завдання швидкості перетворювачів 801UZ1 та 802UZ1. Розрахунок із 10% резервом, передбаченим для можливого розширення системи без заміни обладнання, наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Розрахунок модулів вводу-виводу ET 200MP для аспіраційної системи ДП

№8 [1, 6]

Тип сигналу	Потрібна к-ть	Сигналів на модуль	К-ть модулів (з резервом 10%)	Тип модуля ET 200MP
DI	~216	32	7 (224 DI)	DI 32×24VDC HF / 6ES7 521-1BL10-0AA0 [6]
DO	~36	32	2 (64 DO)	DQ 32×24VDC/0,5A ST / 6ES7 522-1BL10-0AA0 [6]
AI	~24	8	3 (24 AI)	AI 8×U/I/RTD/TC ST / 6ES7 531-7KF00-0AB0 [6]
AO	~4	4	1 (4 AO)	AQ 4×U/I ST / 6ES7 532-5HD00-0AB0 [6]
РАЗОМ	~280	—	13 модулів	4 стійки ET 200MP (по 3-4 модулі)

Таким чином, склад периферії становить 13 модулів вводу-виводу, розподілених на 4 стійки ET 200MP з інтерфейсними модулями IM 155-5 PN

ST. Розподіл по дві стійки у кожній із шаф NKASL (основний контролер) та NKASL-R (резервний) обумовлений двома міркуваннями: по-перше, рівномірне навантаження на обидві шини PROFINET унеможливорює ситуацію, коли відмова однієї шини залишає більшість каналів без зв'язку з ЦП; по-друге, фізична близькість модулів до обладнання кожного ливарного двору мінімізує довжину польових кабелів у агресивному середовищі і, відповідно, ймовірність кабельних несправностей [1].

2.1.3 Специфікація комплексу технічних засобів

Повну специфікацію апаратних засобів КТС модернізованої системи управління наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Специфікація КТС модернізованої системи управління аспірацією ДП №8 [1, 6, 7, 9]

№	Найменування / тип	Артикул	К- ть	Призначення
1	2	3	4	5
1	CPU 1515-2 PN (основний)	6ES7 515- 2AM02-0AB0	1	Центральний процесор; PROFINET (2 порти), 1 МБ пам'яті [6]
2	CPU 1515-2 PN (резервний)	6ES7 515- 2AM02-0AB0	1	Гаряче резервування; автоперемикавання <300 мс [6]
3	PM 70W 120/230VAC	6EP1 332- 4BA00	2	Живлення ЦП та локальних модулів; =24 В/3 А [6]
4	IM 155-5 PN ST	6ES7 155- 5AA00-0AB0	4	Підключення периферійних модулів по PROFINET [6]

Продовження табл. 2.3

1	2	3	4	5
5	DI 32×24VDC HF	6ES7 521- 1BL10-0AA0	7	32 DI кожен; 7×32 = 224 DI (покриває ~216 DI + резерв) [6]
6	DQ 32×24VDC/0.5A ST	6ES7 522- 1BL10-0AA0	2	32 DO кожен; 2×32 = 64 DO (покриває ~36 DO + резерв) [6]
7	AI 8×U/I/RTD/TC ST	6ES7 531- 7KF00-0AB0	3	8 AI кожен; підтримка 4–20 мА, Pt100, ±10 В [6]
8	AQ 4×U/I ST	6ES7 532- 5HD00-0AB0	1	4 АО; 0–10 В для ПЧ 801UZ1/802UZ1; 4–20 мА резерв [6]
9	SCALANCE XC208	6GK5 208- 0BA00-2AC2	2	PROFINET-кільце (MRP); 8 портів 100 Мбіт/с [9]
10	SITOP PSU100S 24V/20A	6EP1 436- 3BA00	2	Живлення модулів ET 200MP та клапанів; =24 В/20 А [6]
11	Rittal TS8 2000×800×600, IP54	TS8806.000	2	Шафи управління NKASL та NKASL-R [1]
12	SIMATIC Rack PC 547B	6ES7 647- 0CA10-0CX0	2	Робочі станції оператора та майстра печі [3]
13	WinCC V7.5 SP2 Runtime 2048 тегів	6AV6 381- 2CH07-0AX0	2	SCADA-система візуалізації та архівування [7]

2.2 Алгоритмічне та програмне забезпечення

Програмне забезпечення контролера NKASL розробляється в інтегрованому середовищі TIA Portal V17 мовою LAD (Ladder Diagram) - найпоширенішим стандартом програмування ПЛК у металургійній галузі, що забезпечує наочність логічних ланцюгів і полегшує подальше обслуговування персоналом підприємства. Архітектуру програмного забезпечення побудовано на принципі розмежування функцій за рівнем критичності та частотою

виконання. Основний організаційний блок ОВ1 виконується циклічно з часом циклу не більше 20 мс і реалізує логіку управління фазами, обробку команд оператора та формування завдань для клапанів і частотних перетворювачів. Для функцій захисту, де час реакції є визначальним, виділено окремий блок переривань ОВ35 з фіксованим циклом 100 мс: саме у ньому реалізовано моніторинг аналогових сигналів температури підшипників та статора ексгаустерів і вібрації, що гарантує виконання захисного відключення з часом реакції не більше 50 мс [6]. Такий поділ унеможлиблює ситуацію, коли тривала обробка логіки управління клапанами затримала б захисне відключення при аварійному перегріві.

Алгоритм управління фазами технологічного процесу реалізовано у вигляді кінцевого автомата (State Machine) у функціональному блоці FC20 - підхід, оптимальний для процесів із чітко визначеними стаціонарними станами та умовами переходів між ними. Кожен стан автомата відповідає одній з чотирьох фаз циклу (Фаза 0-3) і однозначно визначає набір активних виходів: задані значення швидкості ексгаустерів та команди відкриття/закриття для відповідних клапанів. Переходи між фазами ініціюються або командами оператора з пульта ТПУ-3, або автоматично за сигналами датчиків нахилу жолоба, що реєструють відкриття льотки. Принципово важливою властивістю реалізованого автомата є відмова від переходу до наступного кроку без підтвердження завершення попереднього: система не відкриє наступний клапан, доки не отримає сигнал від кінцевого вимикача або не спрацює контрольний таймер із формуванням відповідної аварійної тривоги.

Алгоритм управління ексгаустером Mex.801 наведено на рис. 2.3.

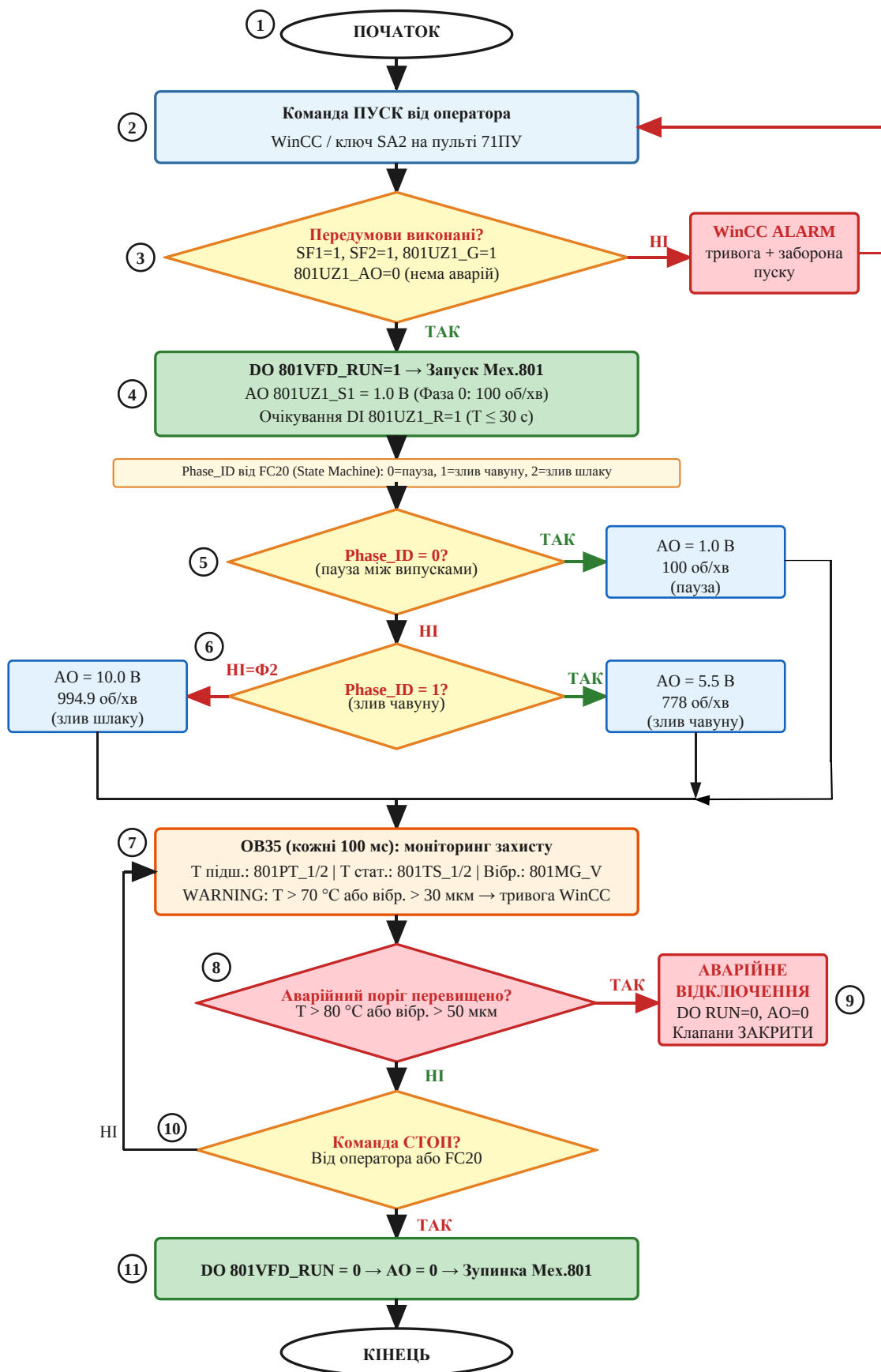


Рис. 2.3. Алгоритм управління ексгаустером Mex.801 (з функцією захисного відключення)
(розроблено автором)

Алгоритм управління аспіраційним клапаном (загальний для Мех.651–662) наведено на рис. 2.4.

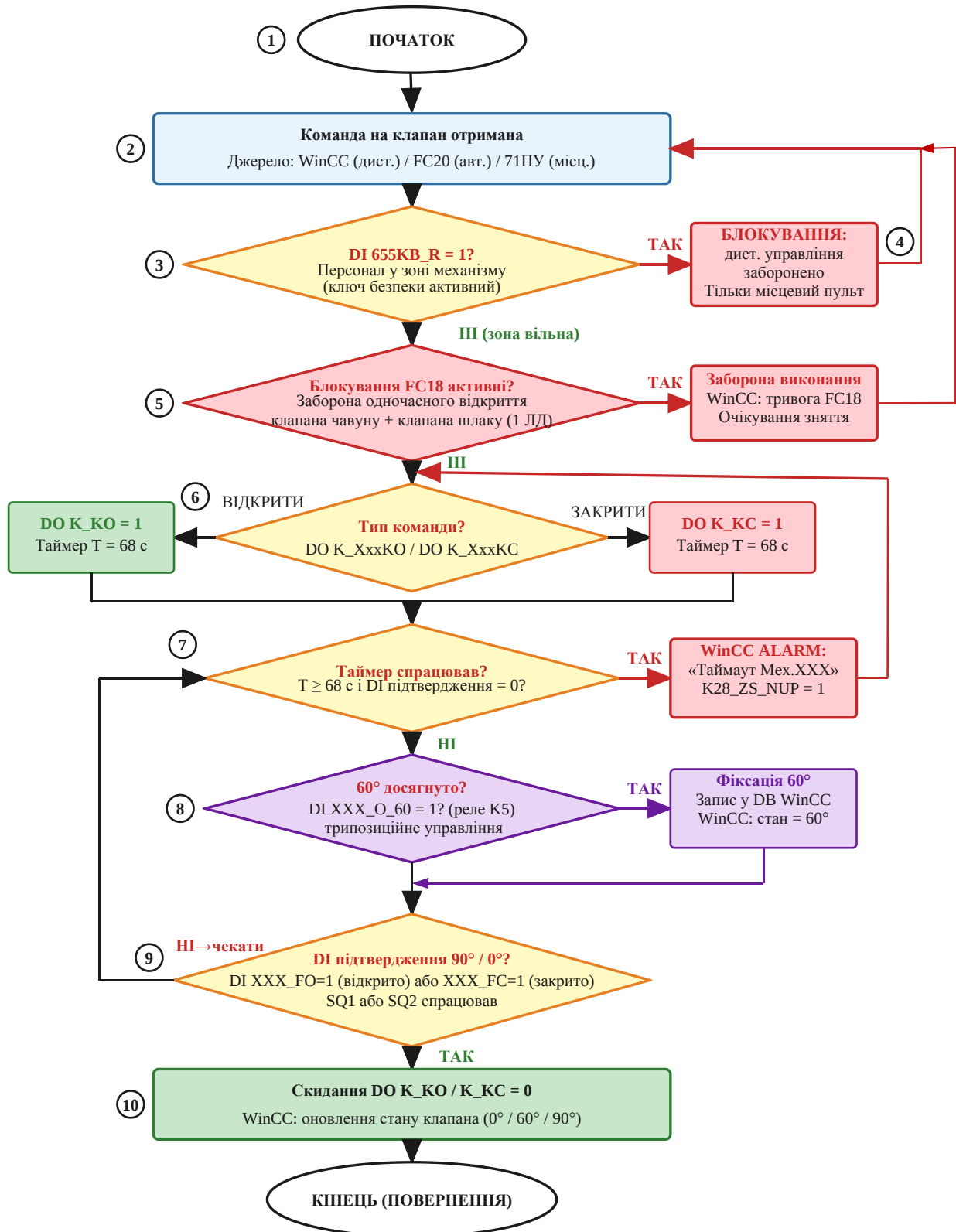


Рис. 2.4. Алгоритм управління аспіраційним клапаном (Мех.651-662)
(розроблено автором)

2.2.1 Алгоритм управління системою у Фазі 1 (злив чавуну)

Фаза 1 є першою активною фазою технологічного циклу та ініціюється подачею сигналу від датчика нахилу жолоба при відкритті льотки чавуну. Особливістю алгоритму є трипозиційне управління клапанами: послідовність включення передбачає попереднє переведення клапана у проміжне положення 60° з витримкою контрольного часу, і лише після підтвердження сигналу від відповідного кінцевого вимикача - подальше відкриття до 90° . Це технічне рішення є ключовим засобом запобігання гідравлічним ударам: поступове збільшення прохідного перетину газоходу не допускає різкого перепаду тиску при введенні кожного нового джерела відсмоктування. Алгоритм також забезпечує строгу послідовність включення механізмів - спочатку ексгаустер виходить на задану швидкість, і лише після цього дозволяється відкриття клапанів у регламентованому порядку. Деталізований покроковий алгоритм управління у Фазі 1 наведено в табл. 2.4 та проілюстровано на рис. 2.5.

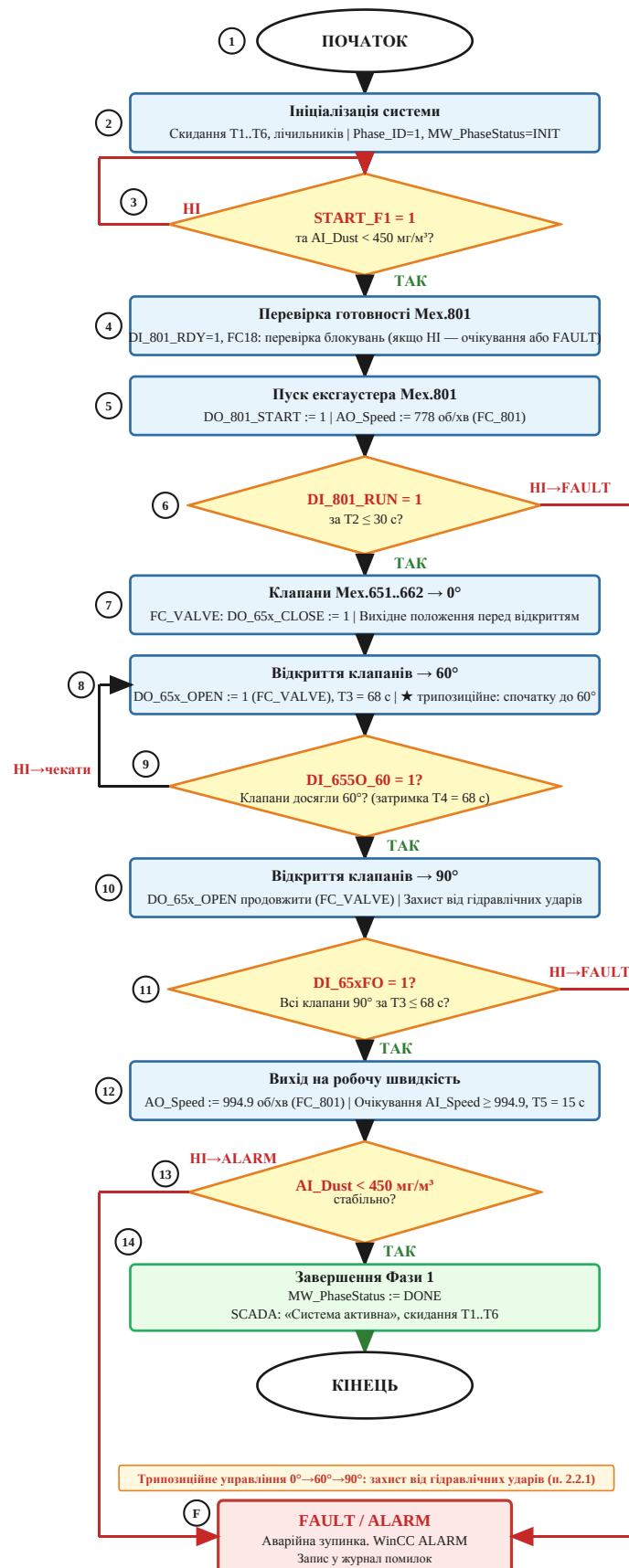


Рис. 2.5. Алгоритм послідовного відкриття клапанів у Фазі 1 (покрокова діаграма)
(розроблено автором)

**Алгоритм управління аспіраційною системою у Фазі 1 (злив чавуну,
льотка №1) [1]**

Крок	Подія / умова	Дія ПЛК	Контрольований параметр
1	2	3	4
1	Оператор обирає льотку №1 або №2 на WinCC / ключ SA2	ПЛК перевіряє передумови: наявність напруги (SF1/SF2), готовність ПЧ 801UZ1 (DI 801UZ1_G=1), відсутність аварій (DI 801UZ1_AO=0)	DI: SF1, SF2, 801UZ1_G, 801UZ1_AO
2	Всі передумови виконані	DO 801VFD_RUN=1 - запуск ексгаустера Мех.801; AO 801UZ1_S1 = 5,5 В (відповідає 778 об/хв)	AO 801UZ1_S1; DI 801UZ1_R (в роботі)
3	Фактична швидкість Мех.801 досягла 778 об/хв (DI 801UZ1_R=1)	DO K3_655KO=1 - відкрити клапан скімера Мех.655; таймер T1 = 68 с	DI 655FO (відкрито?), таймер T1
4	Мех.655 відкрився (DI 655FO=1) або досяг 60° (DI 655O_60=1)	DO K5_651KO=1 - відкрити клапан зливу чавуну Мех.651; таймер T2 = 68 с	DI 651FO, таймер T2

1	2	3	4
5	Мех.651 відкрився (DI 651FO=1)	DO K13_653KO=1 - відкрити магістральний клапан Мех.653; таймер Т3 = 68 с	DI 653FO, таймер Т3
6	Мех.653 відкрився (DI 653FO=1)	Фаза 1 активна. ПЛК переходить до режиму безперервного моніторингу (ОВ35 кожні 100 мс)	AI: 801PT_1/2, 801MG_V, INDIC_ZAPYL
7	Будь-який таймер Т1–Т3 спрацював без підтвердження (DI = 0)	DO аварійний сигнал K28_ZS_NUP=1; відповідна команда скасовується; WinCC тривога: «Таймаут клапану Мех.XXX»	WinCC Alarm Log
8	AI 801PT_1 > 80 °C або AI 801MG_V > 50 мкм	Аварійне відключення: DO 801VFD_RUN=0; всі клапани 651–662 отримують команду ЗАКРИТИ; WinCC тривога ALARM	DI 801UZ1_AO; WinCC Alarm Log

Система взаємних блокувань між клапанами реалізована у функціональному блоці FC18 (Alarm_System) і є невід'ємною частиною алгоритму безпечної роботи. Найбільш критичним є блокування одночасного відкриття клапана чавунного жолоба та протилежного шлакового жолоба одного ливарного двору: таке поєднання створювало б некероване розподілення

розрідження між газоходами, що унеможлиблює ефективне вловлювання в обох точках одночасно. Другим обов'язковим блокуванням є автоматичне закриття всіх клапанів при аварійному відключенні ексгаустера [1]: без цього відкриті газоходи створювали б неорганізовані підсоси повітря в систему і перешкоджали б відновленню роботи.

2.2.2 Мережева структура. Перехід з PROFIBUS на PROFINET з топологією «Кільце» (MRP)

У проєкті 2007 року польова мережа будувалась на базі PROFIBUS-DP з пропускною здатністю 12 Мбіт/с та лінійною топологією, яка на той час відповідала рівню вимог [1]. Модернізована система переходить на PROFINET RT з пропускною здатністю 100 Мбіт/с та топологією «Кільце» (MRP, IEC 62439-2) [9]. Перехід обумовлений не лише зростанням обсягів обміну даними, а й принциповою зміною підходу до мережевої надійності. При лінійній топології PROFIBUS єдиний обрив кабелю або відмова одного вузла призводить до повної втрати зв'язку з усіма пристроями нижче за точку пошкодження. В умовах агресивного середовища ливарного двору, де кабельні траси зазнають механічного впливу, теплового випромінювання та вібрації від ексгаустерів, ймовірність такого обриву є суттєвою.

Застосування протоколу MRP (Media Redundancy Protocol) у поєднанні з кільцевою топологією принципово усуває цю вразливість: при розриві кільця у будь-якій точці резервний менеджер кільця автоматично перемикає передачу даних на альтернативний шлях, відновлюючи зв'язок з усіма вузлами за час не більше 200 мс у конфігурації Fast MRP [9]. Завдяки цьому навіть пошкодження кабелю між двома стійками ET 200MP під час активного зливу чавуну не призведе до аварійного відключення аспірації. Кільце PROFINET MRP будується на керованих комутаторах SCALANCE XC208 (6GK5 208-0BA00-2AC2), де кожна стійка ET 200MP підключається до виділеного комутатора, замкненого у кільце з комутатором центрального контролера [9].

2.3 Інтерфейс оператора та візуалізація

Система диспетчерського управління та збору даних є невід'ємною складовою модернізованої АСУ: саме вона замикає цикл «контролер - оператор - контролер», без якого управління у ручному та дистанційному режимах принципово неможливе. Для аспіраційної системи ДП №8 SCADA-рівень реалізовано на базі SIMATIC WinCC V7.5 SP2 [7] - платформи, що є визнаним стандартом для металургійних підприємств України і нативно інтегрується з контролерами SIMATIC S7-1500 через OPC UA без додаткових драйверів. Дві ліцензії Runtime (2048 тегів кожна) встановлено на промислових ПК SIMATIC Rack PC 547B: перша - на робочому місці оператора ливарного двору для оперативного управління механізмами, друга - на посту майстра печі для контролю загального стану та перегляду аналітичних трендів. Зовнішній вигляд розроблених мнемосхем наведено на рис. 2.6-2.10.

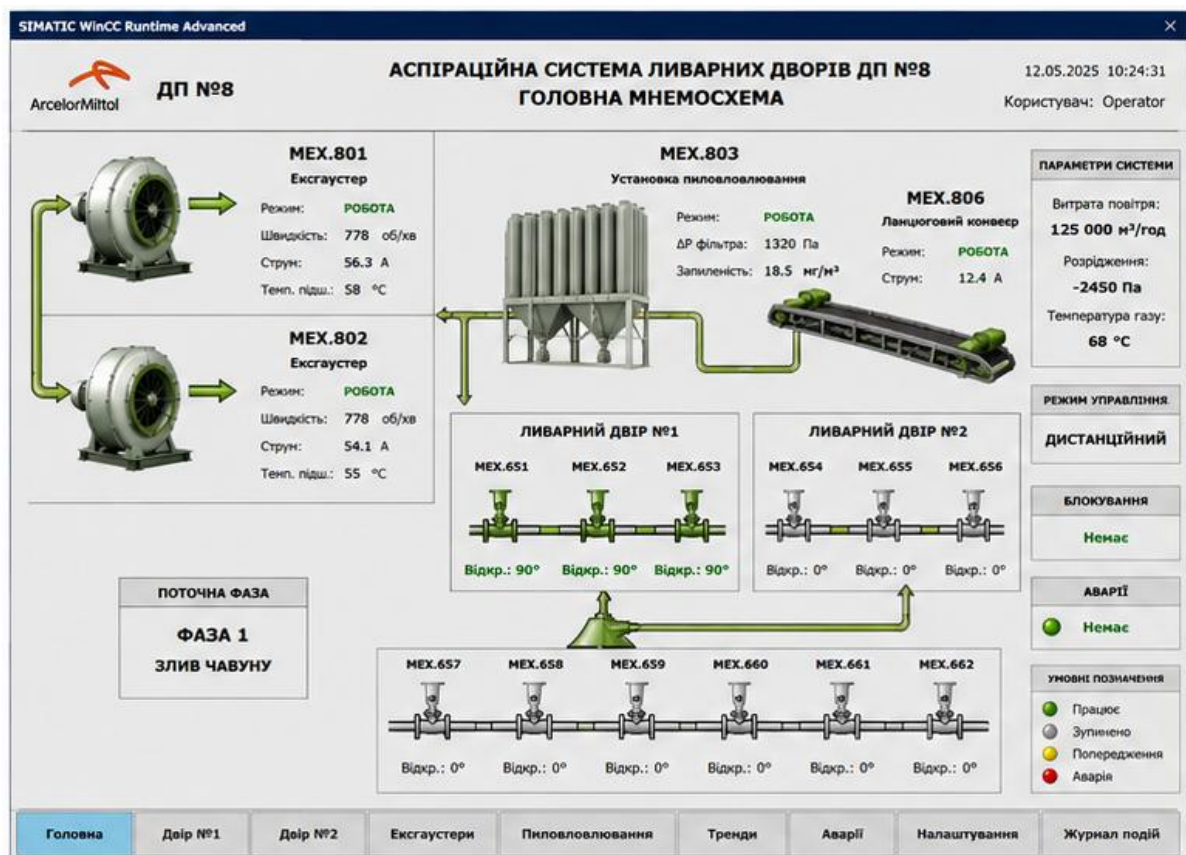


Рис. 2.6. Головна мнемосхема аспіраційної системи ливарних дворів ДП №8 (WinCC V7.5 SP2)
(розроблено автором)

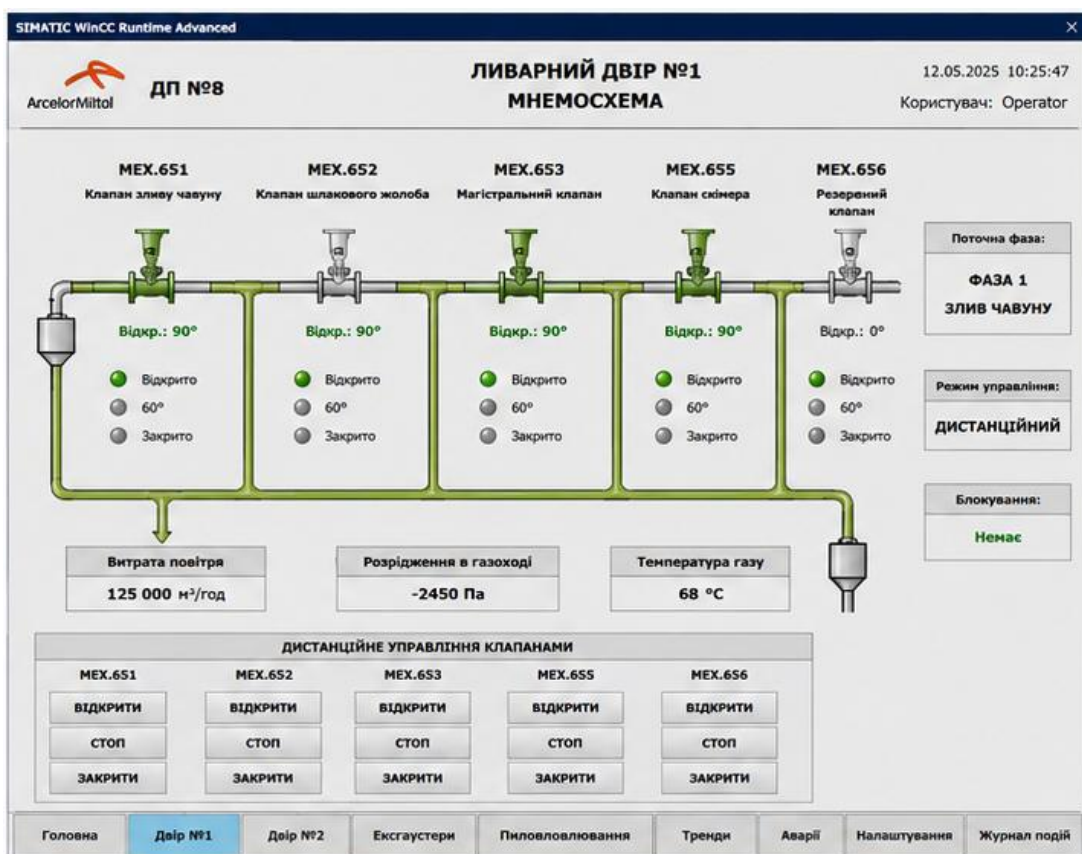


Рис. 2.7. Мнемосхема ливарного двору №1: стан клапанів Mex.651-656 у Фазі 1
(розроблено автором)

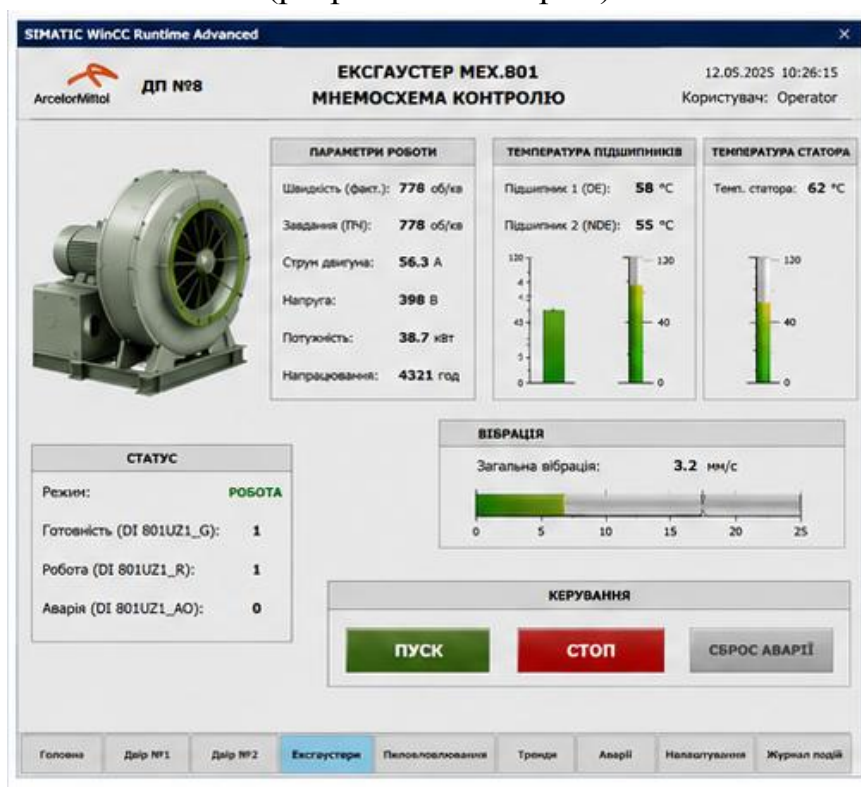


Рис. 2.8. Мнемосхема контролю параметрів екстаустера Mex.801
(розроблено автором)

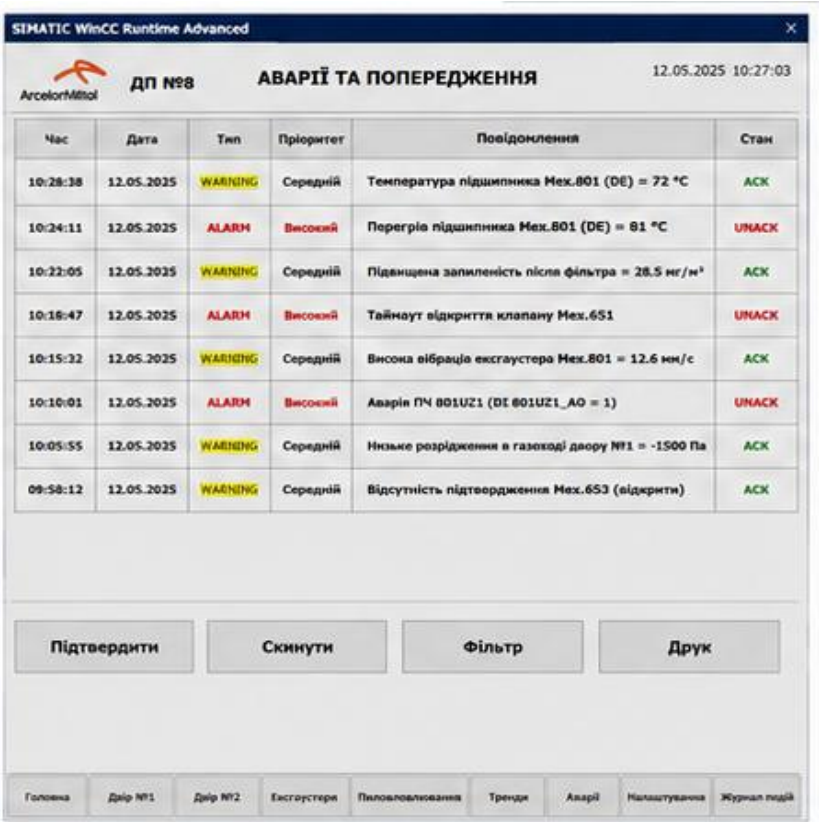


Рис. 2.9. Вікно аварій та попереджень Alarm Logging WinCC V7.5 SP2 (розроблено автором)

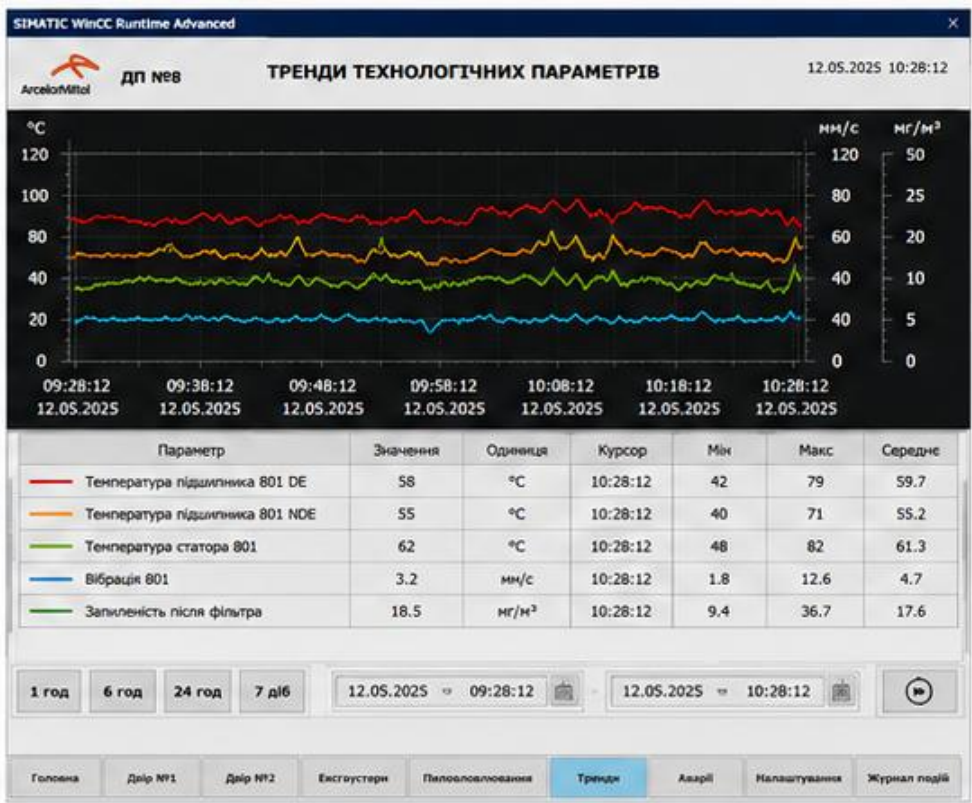


Рис. 2.10. Вікно трендів технологічних параметрів аспіраційної системи (розроблено автором)

2.3.1 Функції SCADA-системи WinCC V7.5 для управління аспірацією

WinCC V7.5 SP2 виконує комплекс взаємопов'язаних функцій, що забезпечують повний цикл управління аспіраційною системою [7]. Оперативна візуалізація реалізована через ієрархічну систему графічних мнемосхем. Головна мнемосхема (рис. 2.3) відображає загальний стан всієї аспіраційної системи ДП №8: поточну фазу технологічного циклу, режим і параметри роботи ексгаустерів Mex.801/802, установки пиловловлювання Mex.803 та конвеєра Mex.806, а також зведений стан клапанів обох ливарних дворів. Мнемосхема ливарного двору (рис. 2.4) забезпечує детальний контроль кожного з шести клапанів двору з відображенням поточного положення ($0^{\circ}/60^{\circ}/90^{\circ}$), режиму управління та кнопками дистанційного управління безпосередньо на екрані. Мнемосхема ексгаустера (рис. 2.5) відображає повний набір параметрів агрегату: швидкість, струм двигуна, напруга, потужність, температури обох підшипників і статора у вигляді гістограм, рівень вібрації, а також кнопки пуску, стопу та скидання аварії.

Дистанційне управління реалізовано з підтвердженням дії: команди відкриття або закриття для клапанів 651-662, пуск і зупинка ексгаустерів 801/802 та конвеєра Mex.806 виконуються лише за умови, що обраний режим управління дозволяє відповідну дію і ПЛК підтверджує відсутність блокувань. Вікно аварій та попереджень Alarm Logging (рис. 2.6) відображає хронологічний журнал усіх тривог із зазначенням часу, дати, типу (WARNING/ALARM), пріоритету та повідомлення, що суттєво спрощує розслідування інцидентів та аудит дій персоналу. Архівування технологічних параметрів ведеться у вбудованій SQL-базі даних з точністю мітки часу 1 мс і терміном зберігання до 365 днів для тегів температур підшипників, вібрації та запиленості. Вікно трендів (рис. 2.7) забезпечує одночасне відображення кількох параметрів в одному часовому вікні з можливістю вибору інтервалу від 1 години до 7 діб, що дозволяє виявляти повільні деградаційні процеси в обладнанні задовго до формування аварійного порогу. Рольова модель доступу

передбачає три рівні: Оператор - управління механізмами, Майстер - зміна технологічних уставок, Інженер - конфігурація системи та програм контролера. Щодобово система автоматично формує звіт про споживання електроенергії експаустерами та перевищення ГДК пилу для потреб екологічної звітності підприємства [7].

2.3.2 Система мнемосхем та аварійної сигналізації

Ієрархічна система мнемосхем WinCC V7.5 для аспіраційної системи ДП №8 складається з восьми екранів (табл. 2.5).

Таблиця 2.5

Перелік мнемосхем SCADA-системи WinCC V7.5 для аспіраційної системи ДП №8 [7]

№	Назва мнемосхеми	Відображуваний контент	Доступні дії оператора
1	2	3	4
1	Головна схема аспіраційної системи	Загальна схема з усіма механізмами 651–662, 801–803; кольорова індикація стану	Перехід до детальних екранів; квітування тривоги
2	ЛД №1 - детальний екран	Клапани 651–656, 653; фаза процесу; положення клапанів (0°/60°/90°); стан Мех.801	Команди ВІДКРИТИ / ЗАКРИТИ клапанів
3	ЛД №2 - детальний екран	Клапани 657–662, 659; фаза процесу; положення клапанів; стан Мех.802	Команди ВІДКРИТИ / ЗАКРИТИ клапанів

Продовження табл.2.5

1	2	3	4
4	Ексгаустер №1 (Мех.801)	Тренди температур підшипників, статора, вібрації, фактичної швидкості; режим роботи	Пуск / зупинка; задання швидкості
5	Ексгаустер №2 (Мех.802)	Аналогічно до Мех.801	Аналогічно до Мех.801
6	Газоочищення (Мех.803, Мех.806)	Стан АПУ В1; швидкість конвеєра; запиленість INDIC_ZAPYL; температура/тиск газу	Пуск / зупинка конвеєра
7	Журнал тривог (Alarm Logging)	Хронологічний список всіх тривог із датою/часом (мс), тегом, рівнем (WARNING/ALARM)	Квитування тривог; фільтрація; експорт до Excel
8	Журнал дій оператора	Фіксація всіх команд: дата/час, ім'я, команда, попередній та новий стан	Фільтрація; формування звіту для адміністратора

Система аварійної сигналізації WinCC Alarm Logging (рис. 2.6) реалізує дворівневу схему, що відповідає принципу «попередити - потім захистити» і дає персоналу можливість втрутитися у розвиток ситуації до настання аварійного відключення. На рівні WARNING фіксуються: температура підшипника більше 70 °С, рівень вібрації більше 30 мкм та запиленість більше 30 мг/м³. При отриманні попередження оператор зобов'язаний оцінити динаміку параметра, однак управління системою продовжується у штатному режимі - такий підхід запобігає невиправданим зупинкам аспірації під час активного

зливу металу через короткочасні флуктуації. На рівні ALARM (температура підшипника більше 80 °С, вібрація більше 50 мкм або запиленість більше 50 мг/м³) через блок OB35 ініціюється автоматичне захисне відключення відповідного ексгаустера та послідовне закриття всіх аспіраційних клапанів пов'язаного ливарного двору у порядку, зворотному до порядку відкриття [7]. Це рішення забезпечує збереження обладнання ціною тимчасового припинення аспірації - менший ризик порівняно з механічним руйнуванням підшипника ексгаустера.

2.4 Розрахунок надійності каналу вимірювання температури підшипника ексгаустера

Розрахунок показників надійності виконується для каналу вимірювання температури підшипника ексгаустера Mex.801 (тег 801PT1DE). Цей канал є одним з найвідповідальніших з погляду безпеки: за сигналом перевищення порогу 80 °С система автоматично відключає ексгаустер. Відмовою вважається вихід з ладу будь-якого одного елемента послідовного вимірювального ланцюга.

Канал вимірювання температури підшипника являє собою послідовно з'єднані елементи: термоперетворювач опору PT100 (801PT1DE) – екранований кабель – модуль аналогового вводу AI 8xRTD/TC ST (ET 200MP) –процесор CPU 1515-2 PN (функція обробки та порівняння з порогом у OB35). Загальну структуру ланцюга наведено на рис. 2.11.

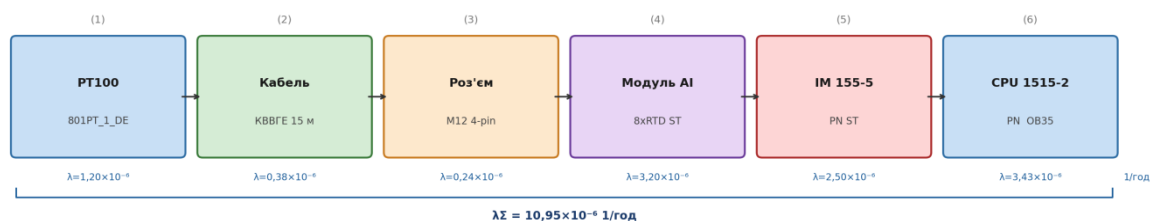


Рис. 2.11. Структура послідовного ланцюга каналу вимірювання температури підшипника 801PT1DE
(розроблено автором)

Характеристика елементів вимірювального ланцюга 801PT1DE [6, 14]

№	Елемент	Тип/модель	Кількість, шт.	$\lambda_i \times 10^{-6}$, 1/год	$n_i \times \lambda_i \times 10^{-6}$, 1/год
1	Термоперетворювач опору	PT100 (Клас А, 4-дроти)	1	1,20	1,20
2	Сполучний кабель (екранований, 15 м)	KVBGE 4×0,75	1	0,38	0,38
3	Роз'єм кабельний	M12, 4-pin	2	0,12	0,24
4	Модуль AI 8xRTD/TC ST (ET 200MP)	6ES7 134- 6JD00-0CA1	1	3,20	3,20
5	Інтерфейсний модуль PROFINET	IM 155-5 PN ST	1	2,50	2,50
6	Центральний процесор CPU 1515-2 PN	6ES7 515- 2AM02- 0AB0	1	3,43	3,43
		Разом:			10,95

Значення інтенсивностей відмов елементів прийнято відповідно до стандартів IEC 62380 та SN 29500 (Siemens Norm) для промислових умов експлуатації при температурі навколишнього середовища до 40 °С. Інтенсивність відмов CPU 1515-2 PN визначена з офіційного значення MTBF = 291 529 год, задекларованого Siemens [6]. Інтенсивність відмов кабельної лінії розраховано за нормативом $0,025 \times 10^{-6}$ 1/(год·м) для екранованого промислового кабелю [14]: $\lambda_{\text{каб}} = 0,025 \times 10^{-6} \times 15 = 0,38 \times 10^{-6}$ 1/год.

Інтенсивність відмов послідовного ланцюга вимірювального каналу обчислюється за формулою:

$$\lambda = \sum n_i \times \lambda_i \quad (2.1)$$

де λ – сумарна інтенсивність відмов ланцюга, 1/год; n_i – кількість елементів i -го типу; λ_i – інтенсивність відмов одного елемента i -го типу, 1/год.

Підставляємо числові значення з табл. 2.6:

$$\lambda = (1,20 + 0,38 + 0,24 + 3,20 + 2,50 + 3,43) \times 10^{-6} = 10,95 \times 10^{-6} \text{ 1/год} \quad (2.2)$$

Середній час безвідмовної роботи (наробіток на відмову) обчислюється за формулою:

$$T_{\text{ср}} = 1 / \lambda \quad (2.3)$$

де $T_{\text{ср}}$ – середній час безвідмовної роботи, год.

Підставляємо:

$$T_{\text{ср}} = 1 / (10,95 \times 10^{-6}) = 91\,324 \text{ год} \approx 10,4 \text{ року} \quad (2.4)$$

Отриманий результат є технічно обґрунтованим: він відповідає умовам тривалої безперервної роботи в агресивному середовищі ливарного двору та узгоджується з задекларованими Siemens значеннями MTBF для обладнання класу SIMATIC S7-1500.

Ймовірність безвідмовної роботи каналу визначається за формулою:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (2.5)$$

де $P(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи за час t ; t – час роботи, год.

Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи для практично значущих інтервалів часу (табл. 2.7):

Ймовірність безвідмовної роботи каналу вимірювання 801PT1DE

t, год	t, роки (прибл.)	P(t)
8 760	1	0,9085
17 520	2	0,8254
43 800	5	0,6190
87 600	10	0,3832
175 200	20	0,1468
262 800	30	0,0563

Залежність $P(t)$ від часу має виражений спадний характер, що відображає реальні умови роботи складного вимірювального ланцюга без резервування. За 1 рік ймовірність безвідмовної роботи складає 0,9085, за 5 років – 0,6190, за 10 років – 0,3832. Отримані значення є типовими для послідовних електронних ланцюгів на базі промислових контролерів і вказують на доцільність планового технічного обслуговування з інтервалом 1-2 роки.

Для порівняння: існуюча релейна система не має аналогічного вимірювального каналу температури підшипника. Контроль здійснювався лише непрямым чином - по тепловому реле з уставкою спрацьовування, час реакції якого при поступовому перегріві міг становити 10-15 хвилин проти гарантованих 50 мс у цифровій системі.

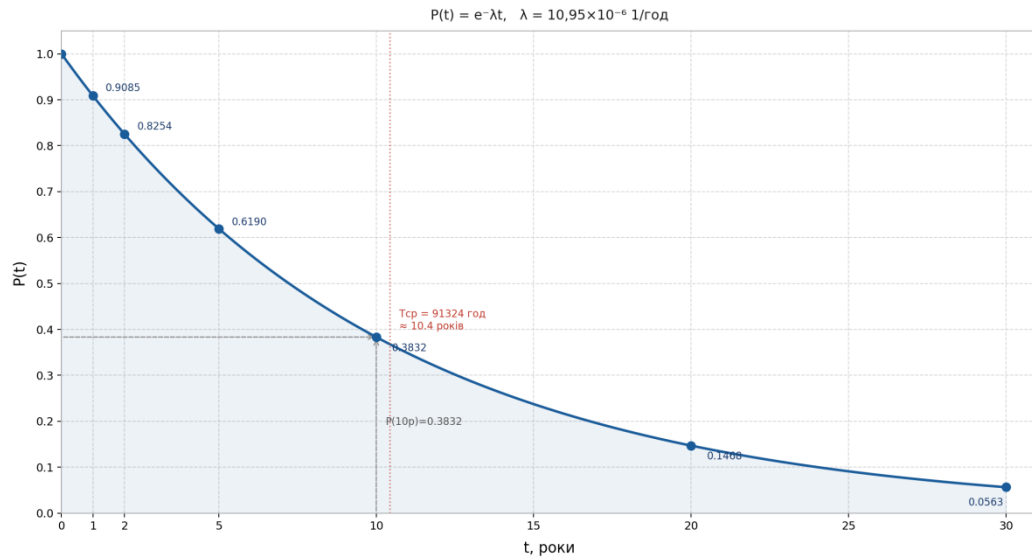


Рис. 2.12. Залежність імовірності $P(t)$ безвідмовної роботи каналу вимірювання температури підшипника 801PT1DE від часу (розроблено автором)

Таким чином, розрахунком показників надійності для каналу вимірювання температури підшипника ексгаустера Mex.801 встановлено: сумарна інтенсивність відмов ланцюга складає $\lambda = 10,95 \times 10^{-6} \text{ 1/год}$; наробіток на відмову – 91 324 год ($\sim 10,4$ року); ймовірність безвідмовної роботи протягом 1 року $P(8\,760) = 0,9085$. Результати свідчать про необхідність планового технічного обслуговування каналу з інтервалом не менше 1 року та підтверджують, що надійність обраної платформи є достатньою для виконання функцій захисту ексгаустерів протягом міжремонтного інтервалу.

2.5 Охорона праці

Ливарний двір доменної печі є одним з найбільш небезпечних виробничих приміщень металургійного підприємства: поєднання відкритих струменів розплавленого металу, інтенсивного теплового випромінювання, підвищеного рівня запиленості та шуму формує сукупність несприятливих факторів, які одночасно впливають на персонал. Характерна особливість цього об'єкта полягає в тому, що впроваджувана АСУ є не лише технологічним, а й безпосереднім засобом охорони праці: своєчасне відкриття клапанів і підтримання проектного розрідження у газоходах є єдиним технічним заходом, що утримує концентрацію пилу в зоні дихання операторів у нормативних межах. Нижче наведено аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів ливарного двору ДП №8 та комплекс технічних і організаційних заходів з охорони праці.

2.5.1 Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих чинників

Умови праці на ливарному дворі ДП №8 формуються під впливом комплексу шкідливих виробничих факторів, кількісна характеристика яких наведена в табл. 2.8. Зіставлення фактичних значень із нормативними наочно показує, що без ефективно функціонуючої аспіраційної системи жоден з основних показників умов праці не відповідає санітарним нормам.

Аналіз шкідливих виробничих чинників на ливарному дворі ДП №8 [1, 10, 11, 12]

Чинник	Нормативне значення	Фактичне значення (без аспірації)	Нормативний документ
Концентрація пилу (ГДК)	6 мг/м ³	до 500 мг/м ³	[1]
Рівень шуму на робочому місці	80 дБА	90-105 дБА (ексгаустери)	[10]
Рівень вібрації (загальної)	Категорія 3а, 92 дБ	95-100 дБ	[11]
Температура повітря (гаряча пора)	Не вище 32 °С	34-40 °С у зоні льоток	[1]
Напруга кіл управління (безпека)	≤ 42 В (змінн.) / 110 В (пост.)	220/380 В у силових колах	[8]

2.5.2 Заходи з охорони праці та виробничої санітарії

З метою забезпечення нормативних умов праці згідно з [1] проектом передбачено комплекс взаємодоповнювальних технічних та організаційних заходів. Первинним і найдієвішим заходом є автоматичне управління аспіраційними клапанами відповідно до фаз технологічного циклу, яке забезпечує вловлювання пилу безпосередньо у місці його утворення і підтримання концентрації у зоні дихання операторів на рівні, що не перевищує 6 мг/м³. Для безперервного контролю ефективності аспірації встановлюється датчик запиленості INDIC_ZAPYL: при перевищенні 30 мг/м³ формується

попередження WARNING у WinCC, при перевищенні 50 мг/м^3 - тривога ALARM з одночасним збільшенням завдання швидкості екстаустерів [7].

Зниження рівня шуму від екстаустерів Mex.801/802 до нормативного значення 80 дБА згідно з [10] досягається шумозаглушувальними кожухами на всмоктувальних та нагнітальних патрубках агрегатів. Теплове навантаження на персонал зменшується завдяки теплоізоляції чавунних жолобів та жолобів шлаку. Принципово важливим заходом безпеки є апаратне блокування дистанційного управління клапанами при перебуванні персоналу у зоні механізму: сигнал від ключа безпеки 655KB_R...662KB_R автоматично забороняє виконання команд ПЛК на відповідний клапан згідно з [12], унеможлиблюючи травмування рухомими частинами приводу.

2.5.3 Засоби індивідуального захисту

Незважаючи на комплекс колективних засобів захисту, передбачених проектом, умови праці на ливарному дворі залишаються такими, що вимагають обов'язкового застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) на весь час перебування персоналу у виробничій зоні. Склад і норми видачі ЗІЗ для персоналу ливарного двору встановлено відповідно до [12] і наведено в табл. 2.9. Застосування повного комплексу ЗІЗ є обов'язковою умовою допуску до роботи незалежно від наявності та стану колективних засобів захисту.

Таблиця 2.9

Засоби індивідуального захисту персоналу ливарного двору ДП №8 [12]

№	Найменування ЗІЗ	Стандарт	Термін носіння
1	2	3	4
1	Захисний комбінезон з вогнестійкої тканини	EN ISO 11612	12 місяців
2	Захисні окуляри або щиток зварювальний	EN166	12 місяців

Продовження табл.2.9

3	Каска захисна з підборіддям	EN397	24 місяці
4	Навушники антифонні ($SNR \geq 27$ дБ)	EN352-1	24 місяці
5	Напівреспіратор з фільтром P3 (від пилу)	EN149 FFP3	8 год. роботи
6	Рукавиці термостійкі	EN407	6 місяців
7	Чоботи з металевим підноском, термостійкі	EN ISO 20345	12 місяців

2.5.4 Пожежна безпека

Проектом передбачено комплекс заходів пожежної безпеки, адаптованих до специфіки об'єкта. Шафи управління NKASL та NKASL-R обладнуються порошковими вогнегасниками ОП-5 (два на кожен шафу) та автономними датчиками пожежної сигналізації з виведенням сигналу на загальнозаводську систему оповіщення. Кабельні лінії від шаф до механізмів клапанів виконуються кабелями з оболонкою, стійкою до поширення горіння, відповідно до [13] - це унеможливує поширення займання по кабельних трасах у разі локального спалаху. Найважливішим конструктивним рішенням є розміщення шаф управління поза зоною можливого попадання бризок розплавленого металу - у приміщенні пункту управління або в окремій секції електрощитового приміщення, відокремленій вогнестійкою перегородкою. Таке розміщення не лише знижує пожежний ризик, а й захищає чутливу електронну апаратуру від теплового випромінювання та механічних впливів зони льоток.

2.5.5 Розрахунок захисного заземлення

Захисне заземлення шаф NKASL, NKASL-R та периферійного обладнання виконується відповідно до [8]. Вихідні дані для розрахунку: мережа 0,4 кВ з ізольованою нейтраллю; питомий опір ґрунту (суглинок) $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; допустимий опір заземлювального пристрою $R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$ згідно з [8].

Струм замикання на землю для мережі 0,4 кВ:

$$I_z = U / (\sqrt{3} \times R_{\text{доп}}) = 400 / (1,732 \times 4) = 57,7 \text{ А} \quad (2.6)$$

де U - лінійна напруга мережі, В; $R_{\text{доп}}$ - допустимий опір заземлення, Ом.

Опір одиночного вертикального заземлювача (сталеві труба діаметром 50 мм, довжина 3 м, глибина залягання верхнього кінця 0,5 м) [8]:

$$R_v = (\rho / 2\pi \times L) \times (\ln(2L/d) + 0,5 \times \ln((4t+L)/(4t-L))) \quad (2.7)$$

де ρ - питомий опір ґрунту, Ом·м; L - довжина заземлювача, м; d - діаметр заземлювача, м; t - відстань від поверхні до середини заземлювача, м.

Підстановка числових значень ($\rho=100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $L=3 \text{ м}$, $d=0,05 \text{ м}$, $t=2 \text{ м}$):

$$R_v = (100 / (2 \times 3,14 \times 3)) \times (\ln(2 \times 3 / 0,05) + 0,5 \times \ln((4 \times 2 + 3) / (4 \times 2 - 3))) = 5,31 \times (\ln 120 + 0,5 \times \ln(11/5)) = 5,31 \times (4,787 + 0,394) = 27,5 \text{ Ом} \quad (2.8)$$

Необхідна кількість вертикальних заземлювачів при коефіцієнті використання $\eta_v = 0,62$ (розташування в ряд, відстань між електродами $a = 3L = 9 \text{ м}$):

$$n = R_B / (R_{\text{доп}} \times \eta_B) = 27,5 / (4 \times 0,62) = 27,5 / 2,48 \approx 11 \text{ шт.} \quad (2.9)$$

де η_B - коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів.

Розрахунковий опір заземлювального пристрою з 11 вертикальними заземлювачами та горизонтальними смугами зв'язку (сталеві смуги 40×4 мм, загальна довжина $L_G = 100$ м):

$$\begin{aligned} R_K &= (R_B \times R_G) / (n \times \eta_B \times R_G + R_B \times \eta_G) = (27,5 \times 8,2) / (11 \times 0,62 \times 8,2 + 27,5 \times 0,45) \\ &= 225,5 / (55,8 + 12,4) = 3,31 \text{ Ом} \quad (2.10) \end{aligned}$$

де R_G - опір горизонтальних електродів зв'язку, Ом; η_G - коефіцієнт використання горизонтального з'єднувача.

Результат: $R_K = 3,31 \text{ Ом} < R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$. Умова захисного заземлення виконана відповідно до вимог [8].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне проектування та обґрунтування технічних рішень з модернізації системи автоматизованого управління електроприводами механізмів аспіраційної системи ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Розроблені рішення дозволяють перейти від морально застарілої релейно-контакторної системи управління до сучасної цифрової платформи на базі SIMATIC S7-1500 з резервованою мережею PROFINET і SCADA-системою WinCC. Отримано такі основні результати:

1) Обґрунтовано вибір контролера CPU 1515-2 PN як центрального процесора модернізованої системи на основі трьох ключових переваг: швидкодія 0,001 мкс/команду (у 50 разів вища, ніж у CPU 317-2 DP), нативна підтримка PROFINET RT/IRT та OPC UA-сервера, підтримка виробника до 2040+ р. [6].

2) Виконано розрахунок складу модулів вводу-виводу ET 200MP: 7 модулів DI 32×24VDC (224 DI), 2 модулі DQ 32×24VDC (64 DO), 3 модулі AI 8×RTD/TC (24 AI), 1 модуль AQ 4×U/I (4 AO). Загальна кількість - 13 модулів, розподілених на 4 стійки [6].

3) Розроблено алгоритм управління у Фазі 1 (злив чавуну) з покроковою активацією екстаустера Mex.801 та клапанів Mex.655→Mex.651→Mex.653 з контролем за таймерами T1–T3 = 68 с та захисними блокуваннями у блоці FC18.

4) Обґрунтовано перехід з PROFIBUS-DP на PROFINET з топологією «Кільце» (MRP, IEC 62439-2) на базі комутаторів SCALANCE XC208; час відновлення зв'язку при розриві кільця ≤ 200 мс (Fast MRP) [9].

5) Описано структуру SCADA-системи WinCC V7.5 SP2 з ієрархією з 8 мнемосхем (рис. 2.3–2.7), дворівневою системою аварійної сигналізації (WARNING/ALARM), SQL-архівом до 365 днів та рольовою моделлю доступу з трьома рівнями [7].

6) Виконано розрахунок захисного заземлення ($R_k = 3,31 \text{ Ом} < R_{\text{доп}} = 4 \text{ Ом}$) відповідно до [8] та аналіз умов праці на ливарному дворі з розробкою заходів з охорони праці.

Розроблені технічні рішення орієнтовані на впровадження на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» під час чергового капітального ремонту ДП №8. Завдяки уніфікованій апаратній платформі SIMATIC S7-1500 та типовій структурі алгоритмічного забезпечення, розроблені матеріали можуть бути використані як основа для проектування аналогічних систем автоматизації аспіраційних установок інших доменних печей підприємства без принципових змін у складі обладнання.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технічне завдання. Принципові схеми контролера NKASL : альбом 02173-1ТО1 / ЗАТ «СТРУМ». - Харків : ЗАТ «СТРУМ», 2007. - 112 с.
2. Виготовлення НКУ : альбом 02173-1ТО3 ІЗМ / ЗАТ «СТРУМ». - Харків : ЗАТ «СТРУМ», 2007. - 76 с.
3. Програмне забезпечення : альбом 02173-1ПО / ЗАТ «СТРУМ». - Харків : ЗАТ «СТРУМ», 2007. - 248 с.
4. Кабельний журнал : альбом 02173-1ТО4 / ЗАТ «СТРУМ». - Харків : ЗАТ «СТРУМ», 2007. - 34 с.
5. Інформаційне забезпечення : альбом 02173-1ИО1 / ЗАТ «СТРУМ». - Харків : ЗАТ «СТРУМ», 2007. - 96 с.
6. Siemens AG. SIMATIC S7-1500 / ET 200MP Automation System : System Manual. - Nuremberg : Siemens AG, 2021. - 536 p. - URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 10.05.2025).
7. Siemens AG. WinCC V7.5 SP2 - System Description. - Nuremberg : Siemens AG, 2020. - 412 p. - URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 10.05.2025).
8. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. - Київ : Держнаглядохоронпраці, 2001. - 281 с.
9. PROFIBUS & PROFINET - Technology and Application : System Description / PROFIBUS International. - Karlsruhe : PI, 2014. - 148 p.
10. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку / МОЗ України. - Київ : МОЗ України, 1999. - 28 с.
11. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації / МОЗ України. - Київ : МОЗ України, 1999. - 32 с.
12. Наказ Держгірпромнагляду № 62 від 16.04.2009. Норми безплатної видачі спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів

індивідуального захисту працівникам металургійної промисловості. - Київ, 2009.

13. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. - Київ : Мінрегіон України, 2016. - 36 с. 14. Siemens AG. SIMATIC S7 Reliability and Maintenance Data / Siemens Industry Support. - Nuremberg : Siemens AG, 2022. - URL: <https://support.industry.siemens.com> (дата звернення: 15.05.2025).



Документ прийнятий

 ДОКУМЕНТ

Научный переводчик / Эксперт
Модло С.О.

ЦІ ДОКУМЕНТИ
334292908

III ОРГАНІЗАЦІЯ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

3BIT

Дата змиту
6/12/2026

Date of completion

Коэффициент подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Заверіть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.

1.97%

1.97%

1 תא

10092

Kunze et al. • *CaMKII α* Controls *CaMKII β* Activity in the Hippocampus

0.75%

0.75%

KLM

66135

KINSHIPS, CUMMINGS

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових слотворень. Ці слотворення в тексті можуть говорити про **МОЖЛИВІ** маніпуляції в тексті. Слотворення в тексті можуть мати навісний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		13
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		14

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копії тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

Копію тексту

10 найдовших фраз

КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ
(ФРАГМЕНТІВ)

4 НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)

1 http://pao.company/resheniya/siemens_simatic_s7_1500_manual.pdf

18 (0.18 %)

**ЗГОДА здобувача вищої освіти
Державного університету економіки і технологій про перевірку
кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії Університету**

Я, Кійко Дмитро Сергійович
(ПП),

підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота
Автоматизація металургійного виробництва. Автоматизована система керування електроприводами механізмів аспіраційної системи ливарних дворів доменної печі №8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомлений. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» зазначена робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ). З умовами такого розміщення ознайомлений.

01.06.2026

дата


підпис

Кійко Д.С.

ініціали, прізвище (власноруч)