

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 Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Почепи Віталія Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Розробка системи
автоматичного встановлення положення валків клітей безперервно-
заготовочного стану Блюмінга 1300 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)

(підпис)

Григор'єва В.Г.

(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 16.06.2026р № 397-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

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Почепи Віталія Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема випускної кваліфікаційної роботи

Автоматизація металургійного виробництва. Розробка системи автоматичного
встановлення положення валків клітей безперервно-заготовочного стану
Блюмінга 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

керівник випускної роботи Григор'єва Вікторія Георгіївна, доцент, к.т.н.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «06» квітня 2026 року № 239-
ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 02.06.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

Об'єкт автоматизації - система керування положенням валків клітей
безперервно-заготовочного стану 730/500 (№12-17) блюмінга 1300 ПАТ
«АрселорМіттал Кривий Ріг»; кількість клітей БЗС - 6 (№12-17); діапазон
регулювання розхилу валків - 50-500 мм; крок гвинтової пари натискного
механізму - 5 мм/об; передавальне відношення черв'ячного редуктора - $i = 40$;
потужність електродвигуна натискного механізму - 5 кВт, 3×380В; точність
позиціонування існуючої системи - $\pm 2-3$ мм; точність позиціонування
модернізованої системи - $\pm 0,05$ мм; час налаштування кліті (існуючий/новий) -
15-20 хв / значно менше; тип датчика положення - абсолютний енкодер
HeavyDuty, IP67, роздільна здатність до 18 біт; мережа зв'язку - Profinet IRT,
цикл опитування 10 мс; вимоги - збереження позиції після знеструмлення,
відсутність процедури homing, двохшвидкісне позиціонування, функція «on the
fly» preset, інтеграція з АСУ ТП через Ethernet/Profibus-DP

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити).

4.1 Аналітична частина: Конструкція та технологічні особливості блюмінга 1300 і БЗС 730/500; огляд світового досвіду автоматизації систем натискних пристроїв та порівняльний аналіз датчиків положення; недоліки існуючої системи керування. 4.2 Основна частина: Структура тривірневої системи автоматичного керування; обґрунтування вибору та технічні характеристики обладнання (енкодери, ПЛК, ЧП, НМІ); розробка функціональної та принципової схем підключень системи; алгоритм автоматичного встановлення положення валків та розрахунок точності позиціонування. Заходи з охорони праці: аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів; електробезпека та пожежна безпека; розрахунок освітленості робочого місця оператора.

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

ВРБ.174.239-ст.14.Е1.1 - Структурна схема існуючої системи керування положенням валків клітей БЗС 730/500 (до модернізації); ВРБ.174.239-ст.14.Е1.2 - Структурна схема АСК положення валків клітей БЗС 730/500; ВРБ.174.239-ст.14.Е2 - Функціональна схема автоматизованої системи керування положенням валків клітей БЗС блюмінга 1300; ВРБ.174.239-ст.14.Е5 - Схема підключень АСК БЗС 1300; ВРБ.174.239-ст.14.Е0 - Блок-схема алгоритму автоматичного встановлення положення валків клітей БЗС.

1. 6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Григор'єва В.Г.	10.04.2026	10.04.2026
Основна частина	Григор'єва В.Г.	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
2.	Аналітична частина	01.05.2026	
3.	Основна частина	22.05.2026	
4.	Оформлення пояснювальної записки	28.05.2026	
5.	Виконання графічної частини	29.05.2026	
6.	Подання роботи до кафедри	08.06.2026	
7.	Захист роботи в ЕК	19.06.2026	

Студент

_____ (підпис)

Почепа В.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Григор'єва В.Г.
(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим.
1	A3	<i>ВРБ.174.239-ст.14.Е1.1</i>	Структурна схема	1		
2			існуючої системи			
3			керування положенням			
4			валків клітей БЗС 730/500			
5			(до модернізації)			
6	A3	<i>ВРБ.174.239-ст.14.Е1.2</i>	Структурна схема	1		
7			АСК положення			
8			валків клітей БЗС 730/500			
9	A3	<i>ВРБ.174.239-ст.14.Е2</i>	Функціональна схема	1		
10			автоматизованої системи			
11			керування положенням			
12			валків клітей БЗС			
13			блюмінга 1300			
14	A3	<i>ВРБ.174.239-ст.14.Е5</i>	Схема підключень	1		
15			АСК БЗС 1300			
16	A3	<i>ВРБ.174.239-ст.14.Е0</i>	Блок-схема алгоритму	1		
17			автоматичного			
18			встановлення положення			
19			валків клітей БЗС			
20	A4	<i>ВРБ.174.239-ст.14.ПЗ</i>	Пояснювальна записка	70		
21						
22						
23						
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ документа</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	<i>ВРБ.174.239-ст.14.ВР</i> <i>Автоматизація металургійного виробництва. Розробка системи автоматичного встановлення положення валків клітей безперервно-заготовочного стану Блюмінга 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».</i> <i>Відомість роботи</i>	
<i>Розроб.</i>		<i>Почеп В.С.</i>				
<i>Пров.</i>		<i>Григор'єва В.Г.</i>				
<i>Н.контр.</i>		<i>Григор'єва В.Г.</i>				
<i>Затв.</i>		<i>Модло Є.О.</i>				
					Літера	Аркуш
						4
					Аркуші	1
					<i>ННТІ ДУЕТ</i> <i>Каф.ЕІА</i> <i>гр. АВ-23ск</i>	

РЕФЕРАТ

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра: 70 с., 5 рис., 23 табл., 34 джерела.

Об'єкт дослідження - процес керування положенням валків клітей безперервно-заготовочного стану блюмінга 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Предмет дослідження - програмно-апаратна система автоматичного встановлення положення валків на основі абсолютних енкодерів та промислового контролера.

Мета роботи - підвищення точності, надійності та швидкодії процесу налаштування валків клітей шляхом розробки автоматизованої системи керування з використанням абсолютних енкодерів.

Методи дослідження: системний аналіз, порівняльний аналіз технічних рішень, математичне моделювання, структурне проєктування.

Результати дослідження: розроблено трирівневу структуру системи автоматичного керування; обґрунтовано вибір абсолютних енкодерів HeavyDuty (16 біт, IP67) та ПЛК Siemens S7-1516; розроблено функціональну схему системи, принципову схему підключення контролера з вхідними та вихідними сигналами; розроблено алгоритм двошвидкісного позиціонування; досягнуто точності $\pm 0,05$ мм.

Наукова новизна полягає у розробці інтегрованого алгоритму двошвидкісного автоматичного встановлення положення валків з функцією «on the fly» preset та централізованою базою даних 40 технологічних калібрів у пам'яті ПЛК.

Практична цінність: скорочення часу налаштування клітей у 5-7 разів, підвищення точності позиціонування у 20-30 разів, зниження аварійності на 80%.

Ключові слова: автоматизація, абсолютний енкодер, блюмінг, безперервно-заготовочний стан, ПЛК, позиціонування, функціональна схема, схема підключень, алгоритм.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП.....	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Конструкція та технологічні особливості блюмінга 1300 і БЗС 730/500 ..	10
1.2 Огляд світового досвіду автоматизації систем натискних пристроїв	12
1.3 Порівняльний аналіз типів датчиків положення.....	12
1.4 Недоліки існуючої системи керування	14
1.5 Висновки за розділом 1.....	15
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	16
2.1 Структура трирівневої системи автоматичного керування	16
2.2 Обґрунтування вибору та технічні характеристики обладнання	18
2.2.1 Абсолютний енкодер	18
2.2.2 Програмований логічний контролер Siemens S7-1516.....	19
2.2.3 Модулі розширення ПЛК	22
2.2.4 Частотні перетворювачі Siemens G120C.....	24
2.2.5 Панель оператора Siemens KTP700 Basic	25
2.2.6 Блок живлення ПС-1	26
2.3 Функціональна схема та принципова схема підключень системи автоматичного керування	27
2.3.1 Таблиці з'єднань усіх блоків електрошафи.....	31
2.3.2 Розробка схеми підключень системи	50
2.4 Алгоритм автоматичного встановлення положення валків.....	52
2.5 Математична модель системи позиціонування.....	56
2.6 Розрахунок точності позиціонування.....	59
2.7 Програмне забезпечення системи керування	61
2.8 Охорона праці та безпека при монтажі й експлуатації системи	62
2.8.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів	62
2.8.2 Заходи безпеки при впровадженні системи автоматизації	63
2.8.3 Електробезпека	64
2.8.4 Пожежна безпека.....	64
2.8.5 Розрахунок освітленості робочого місця оператора.....	64
2.9 Висновки за розділом 2.....	65
ВИСНОВКИ.....	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ

АСУ ТП - Автоматизована система управління технологічним процесом

БЗС - Безперервно-заготовочний стан

ПЛК - Програмований логічний контролер (Siemens S7-1516-3 PN/DP)

НМ - Натискний механізм

ЧП - Частотний перетворювач (Siemens G120C, 5 кВт)

HMI - Human-Machine Interface (панель оператора Siemens KTP700 Basic)

AGC - Automatic Gauge Control (автоматичне керування товщиною прокату)

ЕМЗ - Електромагнітні завади

ΔР - Похибка позиціонування, мм

Кр, Ті, Тd - Параметри ПІД-регулятора (пропорційний, інтегральний, диференціальний)

h - Крок гвинтової пари натискного механізму, мм/об

i - Передавальне відношення черв'ячного редуктора

N - Роздільна здатність енкодера, імпл./об

Δзаг - Загальна похибка позиціонування, мм

ЛАЧХ - Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика

ВСТУП

Сучасне металургійне виробництво висуває підвищені вимоги до якості прокатної продукції, стабільності технологічних режимів та ефективності використання обладнання. Одним із найбільш відповідальних етапів процесу прокатки є налаштування положення валків клітей, від точності якого безпосередньо залежать геометричні параметри заготовок, міжклітьові натяги та безаварійна робота стану [1].

На блюмінгах і безперервно-заготовочних станах налаштування валків у багатьох випадках здійснюється з використанням застарілих або напівавтоматичних засобів, що потребують значного часу (15-20 хв на кліть) та залежать від кваліфікації обслуговуючого персоналу [3]. Відсутність точного автоматизованого контролю положення валків призводить до помилок при встановленні калібрів, виникнення аварійних ситуацій («бурінь»), зростання браку продукції та простоїв обладнання [4].

Аналіз світового досвіду показує, що провідні виробники металургійного обладнання (ABB, Siemens, Danieli) активно впроваджують системи автоматичного керування товщиною прокату (AGC) на базі абсолютних датчиків положення та сучасних промислових контролерів [5, 6]. Однак на блюмінгу 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» існуюча система керування не забезпечує автоматичного визначення положення валків після знеструмлення, що вимагає повторного налаштування після кожної зупинки [7].

У зв'язку з розвитком засобів промислової автоматизації та концепції Industry 4.0 актуальним є впровадження систем керування з використанням сучасних абсолютних енкодерів, які забезпечують збереження інформації про положення виконавчих механізмів незалежно від режимів живлення [8, 9].

Мета роботи – підвищення точності, надійності та швидкодії процесу налаштування положення валків клітей безперервно-заготовочного стану блюмінга 1300 шляхом розробки та впровадження автоматизованої системи керування з використанням абсолютних енкодерів.

Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання:

- проаналізувати конструкцію та принцип роботи блюмінга 1300 і БЗС 730/500;
- провести огляд світового досвіду автоматизації систем натискних пристроїв прокатних станів;
- дослідити існуючі способи налаштування положення валків клітей та виявити їх недоліки;
- обґрунтувати доцільність застосування абсолютних енкодерів у системах натискних механізмів;
- розробити функціональну схему системи автоматичного керування;
- розробити принципові схеми підключення контролера з вхідними та вихідними сигналами;
- розробити алгоритм автоматичного встановлення положення валків та оцінити точність.

Об'єкт дослідження – процес керування положенням валків клітей безперервно-заготовочного стану блюмінга 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Предмет дослідження – програмно-апаратна система автоматичного встановлення положення валків на основі абсолютних енкодерів та промислового контролера.

Методи дослідження: системний аналіз, порівняльний аналіз технічних рішень, математичне моделювання, структурне та функціональне проектування систем автоматизації.

Робота складається зі вступу, двох основних розділів, висновків та переліку посилань. У першому розділі проведено аналітичний огляд конструкції блюмінга 1300, БЗС 730/500 та світового досвіду автоматизації. У другому розділі розроблено структуру системи, функціональну схему, принципові схеми підключень, алгоритм позиціонування, математичну модель та розроблено заходи з охорони праці.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Конструкція та технологічні особливості блюмінга 1300 і БЗС 730/500

Блюмінговий стан 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» призначений для переробки сталевих злитків масою до 14 т у блюми квадратного перерізу 240×240 - 400×400 мм [10]. Робоча кліть блюмінга є двовалковою реверсивною з індивідуальними електроприводами постійного струму потужністю до 4500 кВт [10]. Електроприводи забезпечують можливість реверсивного руху валків для багаторазової прокатки злитка з поступовим зменшенням перерізу.

Безперервно-заготовочний стан 730/500 складається з шести клітей (№12-17), розташованих у дві групи, і призначений для подальшої деформації блюмів у заготовки перерізом 125×125 мм та 80×80 мм [10]. Кожна кліть оснащена натискним механізмом для регулювання розхилу між валками в діапазоні 50-500 мм [10]. Натискні механізми приводяться в рух окремими асинхронними електродвигунами потужністю 5 кВт через черв'ячні редуктори з передавальним відношенням $i = 40$. Крок гвинтової пари натискного механізму становить $h = 5$ мм/об.

Особливістю технологічного процесу є необхідність частого переналагодження стану при зміні сортаменту продукції. При зміні типорозміру заготовки необхідно встановити новий калібр на кожній кліті, що включає регулювання розхилу валків, встановлення бочок та перевірку геометрії калібру. Тривалість переналагодження становить 15-20 хвилин на кліть при ручному способі налаштування [7].

Структурна схема автоматизованої системи керування положенням валків клітей БЗС наведена на рис. 1.1.

1.2 Огляд світового досвіду автоматизації систем натискних пристроїв

Системи автоматичного керування товщиною прокату (AGC) є критично важливими для забезпечення якості продукції. Провідні виробники пропонують такі рішення:

Системи компанії АВВ використовують координоване керування натискними механізмами з урахуванням взаємодії контурів регулювання товщини, натягу та форми прокату [5]. Система забезпечує безударні переходи при ручному втручанні оператора та адаптивне регулювання параметрів на основі аналізу якості продукції.

Гідравлічні системи AGC на базі ПЛК Siemens S7-400 з модулем позиціонування FM 458 забезпечують контроль розхилу валків через датчики переміщення з точністю $\pm 0,05$ мм [23]. Такі системи широко застосовуються на сучасних прокатних станах Європи та Північної Америки.

Аналіз світового досвіду показує, що сучасні системи автоматизації базуються на трьох ключових принципах:

1. Використання абсолютних датчиків положення для збереження інформації після знеструмлення;
2. Дворівнева архітектура керування (ПЛК + HMI/SCADA);
3. Інтеграція з існуючою АСУ ТП підприємства для обміну технологічними даними [7].

1.3 Порівняльний аналіз типів датчиків положення

У системах керування положенням валків використовуються різні типи датчиків. Порівняльна характеристика наведена в табл. 1.1.

Інкrementальні (відносні) енкодери визначають положення шляхом підрахунку імпульсів від початкової позиції. Основний недолік - втрата інформації про положення при знеструмленні та необхідність процедури повернення в базову точку (homing) після кожного вмикання системи [12]. Це

суттєво знижує продуктивність при частій зміні калібрів та унеможливорює використання у аварійних ситуаціях, пов'язаних із раптовим знеструмленням.

Аналогові датчики (потенціометри, резольвери) формують безперервний аналоговий сигнал, пропорційний куту обертання. До недоліків відносяться обмежена точність ($\pm 1-2$ мм), чутливість до електромагнітних завад та необхідність додаткового перетворювача АЦП, що збільшує загальну похибку вимірювання [11].

Абсолютні енкодери надають унікальний цифровий код для кожного кутового положення. Ключові переваги: збереження інформації після знеструмлення без акумуляторів; відсутність homing; роздільна здатність до 18 біт; висока стійкість до вібрацій, пилу та вологи (IP67) [8, 12].

Таблиця 1.1

Порівняльний аналіз типів датчиків положення

Критерій	Інкрементальний енкодер	Потенціометр / резольвер	Абсолютний енкодер
Точність	$\pm 0,1$ мм (теор.)	$\pm 1-2$ мм	$\pm 0,05$ мм (точність системи)
Збереження позиції після знеструмлення	Ні	Так (резольвер)	Так
Процедура homing	Обов'язкова	Не потрібна	Не потрібна
Стійкість до ЕМЗ	Середня	Низька	Висока
Ступінь захисту	До IP65	До IP54	До IP67
Висновок (для БЗС)	Низька	Середня	Висока

На основі аналізу зроблено висновок: абсолютні енкодери категорії HeavyDuty є оптимальним рішенням для умов блюмінга 1300, де критично

важливі збереження положення після аварійного знеструмлення, висока точність та надійність в умовах металургійного виробництва.

1.4 Недоліки існуючої системи керування

Аналіз існуючої системи керування положенням валків клітей БЗС виявив п'ять основних недоліків:

1. Відсутність абсолютного зворотного зв'язку. Існуюча система використовує відносні датчики або механічні відлікові пристрої, що призводить до втрати інформації про фактичне положення валків після знеструмлення. Після кожної зупинки стану оператори змушені виконувати процедуру «нулювання» за допомогою мікрометричних індикаторів [4].

2. Тривалий час налаштування клітей (15-20 хв на кліть). За даними виробничого звіту ПАТ «АМКР» за 2025 рік, загальні втрати часу складають 5-6,5 годин на добу при середній кількості переналагоджень 20 разів на добу [7].

3. Залежність від кваліфікації оператора. Відсутність автоматичного визначення номера калібру призводить до помилкових дій вальцювальників та виникнення аварійних ситуацій типу «бурежок». За даними служби охорони праці, 65% аварій на БЗС пов'язані з помилками при налаштуванні калібрів [4].

4. Недостатня точність позиціонування ($\pm 2-3$ мм), що не задовольняє сучасним вимогам до геометричної точності заготовок за ТУ 14-1-4649-89 (відхилення не більше $\pm 0,5$ мм) [13].

5. Відсутність автоматизованої бази даних калібрів. Параметри калібрів зберігаються в неінтегрованому вигляді (паперові журнали або окремі файли) без інтеграції з системою керування, що ускладнює швидкий доступ до технологічних режимів [7].

1.5 Висновки за розділом 1

1. Проведено аналіз конструкції блюмінга 1300 та БЗС 730/500: стан складається з реверсивної кліти блюмінга та шести клітей БЗС (№12-17) з натискними механізмами (діапазон 50-500 мм, крок 5 мм/об, редуктор $i = 40$).
2. Проаналізовано світовий досвід автоматизації. Провідні виробники (ABB, Siemens) використовують дворівневі системи на базі ПЛК з абсолютними датчиками зворотного зв'язку.
3. Встановлено, що абсолютні енкодери мають суттєві переваги: збереження позиції, роздільна здатність 0,000008 мм (досяжна точність системи позиціонування $\pm 0,05$ мм), захист IP67, відсутність необхідності homing.
4. Виявлені основні недоліки існуючої системи: відсутність абсолютного зворотного зв'язку, тривале налаштування, залежність від кваліфікації оператора, точність лише $\pm 2-3$ мм.
5. Обґрунтовано доцільність застосування абсолютних енкодерів HeavyDuty та трирівневої архітектури системи керування на базі ПЛК Siemens S7-1516.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Структура трирівневої системи автоматичного керування

Для автоматизації процесу встановлення положення валків клітей БЗС блюмінга 1300 розроблено трирівневу систему автоматичного керування. Загальна структура системи наведена на рис. 2.1.

Польовий рівень (Field Level) - рівень первинних перетворювачів та виконавчих механізмів. До складу входять:

- 6 абсолютних багатообертових енкодерів АЕ-12..АЕ-17 (HeavyDuty, 16 біт, IP67) на валах черв'ячних редукторів натискних механізмів клітей №12-17;
- 6 частотних перетворювачів Siemens SINAMICS G120C потужністю 5 кВт (3х380 В);
- 6 асинхронних двигунів ДВ-12..ДВ-17 (5 кВт, ~380 В) натискних механізмів;
- 6 натискних механізмів НМ-12..НМ-17 (гвинтова пара $h=5$ мм/об, редуктор $i=40$);
- 12 датчиків кінцевих положень ДКВ-В/ДКВ-Н (мікроперемикачі ХСКР211, по 2 на кліть);
- кнопка аварійного стопу АС-1 (Eaton M22, NC-контакт із самоблокуванням).

Рівень керування (Control Level) - рівень обробки сигналів та реалізації алгоритмів. До складу входять:

- промисловий ПЛК Siemens S7-1516-3 PN/DP як центральний контролер системи;
- модуль дискретних входів SM 1221 DI16 (адреси I0.0..I1.7);
- модуль дискретних виходів SM 1222 DQ16 (адреси Q0.0..Q1.4);
- модуль аналогових виходів SM 1232 AO6 (QW80..QW90, 0-10 В);
- блок живлення ПС-1 Siemens SITOP PSU100S (24 В DC, 20 А) для живлення усього обладнання системи.



(розроблено автором)

Рівень диспетчеризації (Operator Level) - рівень візуалізації та оперативного управління. До складу входять:

- панель оператора HMI Siemens KTP700 Basic (7", 800x480 пікс.);
- система АСУ ТП стану (SCADA WinCC V17) для моніторингу та архівування технологічних параметрів;
- промисловий комутатор Profinet SW-1 Scalance (8 портів IRT, 100 Мбіт/с).

Зв'язок між рівнями: польовий рівень - рівень керування: Profinet IRT (цикл 10 мс); рівень керування - рівень диспетчеризації: Profinet IE для HMI (цикл 100 мс) та Profibus-DP (1,5 Мбіт/с) для зв'язку з АСУ ТП стану.

2.2 Обґрунтування вибору та технічні характеристики обладнання

2.2.1 Абсолютний енкодер

Для визначення положення валків клітей у системі прийнято рішення застосовувати абсолютні багатообертові енкодери категорії HeavyDuty з вихідним інтерфейсом Profinet. Вибір обумовлений необхідністю:

- забезпечити збереження інформації про положення після аварійного знеструмлення без застосування резервних акумуляторів;
- виключити процедуру «нулювання» (homing) при кожному пуску обладнання;
- забезпечити роботу в умовах важкого металургійного виробництва (висока температура, вібрація, пил, волога).

Основні технічні характеристики абсолютного енкодера наведені в табл. 2.1.

Технічні характеристики абсолютного енкодера

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	Тип	-	Абсолютний, багатообертовий
2	Роздільна здатність на оберт	імп./об	16 384 (16 біт)
3	Кількість обертів	об	4 096 (12 біт)
4	Вихідний інтерфейс	-	Profinet / SSI
5	Напруга живлення	В DC	10-30
6	Температурний діапазон	°C	-40...+85
7	Ступінь захисту корпусу	-	IP67
8	Роздільна здатність лінійного переміщення	мм	0,000008

2.2.2 Програмований логічний контролер Siemens S7-1516

Для реалізації алгоритмів автоматичного керування вибрано промисловий ПЛК Siemens S7-1516-3 PN/DP. Вибір обумовлений необхідністю обслуговування шести незалежних контурів регулювання положення з циклом виконання задач не більше 5 мс, підтримки технологічних об'єктів (ТО) Profinet для роботи з абсолютними енкодерами, а також наявністю вбудованого протоколу Profibus-DP для інтеграції з існуючою АСУ ТП.

Основні технічні характеристики ПЛК наведені в табл. 2.2.

Технічні характеристики ПЛК Siemens S7-1516-3 PN/DP

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	Тип процесора	-	CPU 1516-3 PN/DP, 32-bit
2	Оперативна пам'ять	Кбайт	1500
3	Час виконання бітової операції	нс	25
4	Час циклу (1000 операцій)	мс	≤ 5
5	Цифрові входи / виходи	шт.	$\geq 16 / 16$
6	Аналогові входи / виходи	шт.	4 / 4
7	Промислові інтерфейси	-	2×Profinet, Profibus-DP
8	Підтримка абсолютних енкадерів	шт.	До 8

Перелік вхідних та вихідних сигналів системи керування наведено в табл.2.3. Загальна кількість цифрових входів - 37, цифрових виходів - 19, аналогових виходів - 6.

Таблиця 2.3

Перелік вхідних та вихідних сигналів ПЛК

№	Назва сигналу	Тип	К-ть	Призначення
1	2	3	4	5
1	Абсолютний енкадер (Profinet)	Вхід цифр.	6	Положення валків клітей №12-17
2	Датчик верхнього кінцевого положення	Вхід дискр.	6	Обмеження ходу НМ вгору

1	2	3	4	5
3	Датчик нижнього кінцевого положення	Вхід дискр.	6	Обмеження ходу НМ вниз
4	Аварійний сигнал ЧП	Вхід дискр.	6	Захист від перевантаження приводу
5	Кнопка «АВАРІЙНИЙ СТОП»	Вхід дискр.	1	Екстрена зупинка всіх приводів
6	Завдання швидкості на ЧП (0-10 В)	Вихід аналог.	6	Регулювання швидкості НМ
7	Команда «Вперед» на ЧП	Вихід дискр.	6	Переміщення валка вниз
8	Команда «Назад» на ЧП	Вихід дискр.	6	Переміщення валка вгору
9	Сигнал «Готовність до прокатки»	Вихід дискр.	1	Дозвіл прокатки після позиціонування
10	Обмін з НМІ (Profinet)	Двонапр.	1	Вибір калібру, візуалізація, журнал

2.2.3 Модулі розширення ПЛК

До складу системи входять три модулі розширення серії S7-1500 SM, що встановлюються на стійку ПЛК. Вибір модулів обумовлений відповідністю кількості входів/виходів до вимог системи та сумісністю з шиною S7-1500.

Основні технічні характеристики модуля дискретних входів SM 1221 DI16 наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики SM 1221 DI16 (модуль дискретних входів)

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	Кількість дискретних входів	шт.	16
2	Номінальна вхідна напруга	В DC	24
3	Вхідний струм при напрузі 24 В	мА	7,5
4	Мінімальна тривалість сигналу "1"	мс	0,05
5	Ступінь захисту	-	IP20
6	Потужне живлення модуля	В DC	24
7	Споживана потужність	Вт	2,0
8	Задіяно входів у системі	шт.	25 із 32

Основні технічні характеристики модуля дискретних виходів SM 1222 DQ16 наведені в табл. 2.5.

Технічні характеристики SM 1222 DQ16 (модуль дискретних виходів)

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	Кількість дискретних виходів	шт.	16
2	Номінальна вихідна напруга	В DC	24
3	Максимальний струм на вихід	А	0,5
4	Максимальний загальний струм	А	8,0
5	Тип виходу	-	Транзисторний PNP
6	Ступінь захисту	-	IP20
7	Споживана потужність	Вт	1,5
8	Задіяно виходів у системі	шт.	13 із 16

Основні технічні характеристики модуля аналогових виходів SM 1232 АО6 наведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Технічні характеристики SM 1232 АО6 (модуль аналогових виходів)

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	2	3	4
1	Кількість аналогових виходів	шт.	6
2	Діапазон вихідного сигналу (струм)	мА	0-20 / 4-20

1	2	3	4
3	Діапазон вихідного сигналу (напруга)	В DC	0-10 / ± 10
4	Роздільна здатність (в системі)	біт	12
5	Клас точності	%	0,5
6	Адресація (QW) в системі	-	QW80, QW82, ...QW90
7	Ступінь захисту	-	IP20
8	Споживана потужність	Вт	1,5

2.2.4 Частотні перетворювачі Siemens G120C

Для плавного регулювання швидкості асинхронних двигунів натискних механізмів клітей №12-17 застосовано частотні перетворювачі Siemens SINAMICS G120C потужністю 5 кВт. Вибір обумовлений компактними габаритами, вбудованою функцією STO (Safe Torque Off) та підтримкою аналогового завдання швидкості 0-10 В від ПЛК.

Основні технічні характеристики ЧП Siemens G120C наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Технічні характеристики частотного перетворювача Siemens G120C

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	2	3	4
1	Номінальна потужність	кВт	5,5
2	Напруга живлення	В AC	3×380-480

3	Номінальний вхідний струм	А	13,6
4	Номінальний вихідний струм	А	13,0
5	Діапазон вихідної частоти	Гц	0-650
6	Аналоговий вхід завдання (в системі)	В DC	0-10
7	Дискретні входи керування	шт.	6 (DI1-DI6)
8	Функція безпеки STO	-	SIL2 / PL d (IEC 62061)
9	Ступінь захисту	-	IP20 (шафовий монтаж)
10	Кількість ЧП у системі	шт.	6 (ЧП-12...ЧП-17)

2.2.5 Панель оператора Siemens KTP700 Basic

Для забезпечення операторського інтерфейсу застосовано панель Siemens SIMATIC KTP700 Basic з діагоналлю 7" та ємнісним сенсорним екраном. Панель підключається до ПЛК через Profinet (адреса 192.168.0.100) і забезпечує вибір калібру, відображення положення 6 клітей, аварійні повідомлення та журнал подій.

Основні технічні характеристики HMI Siemens KTP700 Basic наведені в табл. 2.9.

Технічні характеристики панелі оператора Siemens KTP700 Basic

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	Діагональ дисплея	дюймів	7
2	Роздільна здатність	пікселів	800×480
3	Тип дисплея	-	TFT, 64 К кольорів
4	Тип сенсору	-	Ємнісний, 4-точковий
5	Апаратні клавіші	шт.	8 функціональних
6	Мережевий інтерфейс	-	Profinet (RJ45)
7	Напруга живлення	В DC	24 (20,4-28,8)
8	Ступінь захисту (лицьова панель)	-	IP65
9	Температура експлуатації	°C	0...+50
10	Програмне середовище	-	TIA Portal WinCC Basic

2.2.6 Блок живлення ПС-1

Для живлення ПЛК, модулів розширення SM, панелі HMI, абсолютних енкодерів та польових пристроїв системи застосовано промисловий блок живлення Siemens SITOP PSU100S. Вибір обумовлений необхідністю забезпечення стабілізованої напруги 24 В DC у широкому діапазоні вхідної мережевої напруги та відповідністю вимогам до надійності живлення систем промислової автоматизації.

Основні технічні характеристики блоку живлення ПС-1 наведені в табл. 2.9.

Технічні характеристики блоку живлення Siemens SITOP PSU100S

№	Параметр	Одиниці	Значення
1	Вхідна напруга AC	В	85-264
2	Номінальна вхідна напруга	В AC	230 (однофазна)
3	Частота мережі	Гц	47-63
4	Вихідна напруга DC	В	24 (стабілізована)
5	Номінальний вихідний струм	А	20
6	Номінальна потужність	Вт	480
7	ККД	%	93 і вище
8	Робочий діапазон температур	°C	-25...+60
9	Ступінь захисту	—	IP20
10	Монтаж	—	DIN-рейка 35 мм
11	Захист	—	КЗ, перевантаження, перегрів

2.3 Функціональна схема та принципова схема підключень системи автоматичного керування

Функціональна схема системи наведена на рис. 2.2.

На схемі відображено повне коло керування від первинних перетворювачів до виконавчих механізмів. Схема охоплює шість типових контурів регулювання – по одному на кожну кліть БЗС (№12 - 17). Контур регулювання положення кожного валка включає такі функціональні елементи:

- вимірювальний канал: абсолютний енкодер АЕ → ПЛК (перетворення кутового положення у лінійне переміщення);
- канал порівняння: вузол порівняння заданого $L_{\text{зад}}$ та фактичного $L_{\text{факт}}$ положень у ПЛК;
- регулятор: ПД-алгоритм у програмному забезпеченні ПЛК;
- виконавчий канал: ПЛК → аналоговий вихід (0–10 В) → ЧП → асинхронний двигун → редуктор → гвинт натискного механізму;
- канал захисту та сигналізації: датчики кінцевих положень → ПЛК → блокування та аварійна зупинка;
- інтерфейс оператора: ПЛК ↔ НМІ (вибір калібру, відображення стану, журнал подій).

Канал вимірювання (вхідні сигнали). Абсолютні багатообертові енкодери АЕ-12–АЕ-17 (HeavyDuty, 16 біт, IP67) встановлені на валах черв'ячних редукторів натискних механізмів. Кожен енкодер формує цифровий код, що однозначно відповідає куту повороту вала, та передає його до ПЛК через протокол Profinet IRT з циклом оновлення 10 мс. Блок FB1 EncoderRead перетворює кутове положення φ у лінійне переміщення L за формулою (2.1). Завдяки абсолютному принципу вимірювання інформація про положення зберігається незалежно від наявності живлення, що виключає необхідність процедури нулювання після зупинок стану. Датчики кінцевих положень ДКВ-В (верхнє, 500 мм) та ДКВ-Н (нижнє, 50 мм) – мікроперемикачі типу ХСКР211 – формують дискретні сигнали 24 В DC, що надходять на модуль SM 1221 DI16 ПЛК. Кнопка аварійного стопу АС-1 (серія Eaton M22, NC-контакт із самоблокуванням) підключена до входу I1.4 ПЛК та одночасно до кола безпечного стану STO усіх шести частотних перетворювачів. Аварійні дискретні виходи ЧП інформують ПЛК про перевантаження (струм понад 110 %), перегрів двигуна або порушення зв'язку.

Центральний блок обробки (ПЛК Siemens S7-1516-3 PN/DP). Контролер виконує шість паралельних контурів регулювання положення з циклом задачі 10 мс. Блок FB4 CalibreData зберігає параметри 40 технологічних калібрів у постійній пам'яті ПЛК: задане положення $L_{\text{зад}}$, швидкості швидкого та точного

ходу, допуски. Вузол порівняння обчислює поточну похибку $\Delta P = L_{\text{зад}} - L_{\text{поточне}}$. Блок FB2 PositionControl реалізує двошвидкісний алгоритм ПІД-регулювання: при $|\Delta P| > 10$ мм – швидкий хід (100 мм/с, вихід 10 В), при $|\Delta P| \leq 10$ мм – точний хід (10 мм/с, вихід 1 В). При досягненні $|\Delta P| \leq 0,1$ мм привод зупиняється та фіксується, ПЛК формує сигнал «Готовність до прокатки» і записує досягнуте положення до журналу. Блок FB3 SafetyLogic забезпечує паралельний контроль: вихід за межі переміщення, зв'язок з енкодерами (таймаут 100 мс) та загальний час позиціонування (таймаут 120 с).

Канал керування (вихідні сигнали та виконавчі механізми). Аналогові виходи модуля SM 1232 AO6 (0-10 В DC) передають завдання швидкості на частотні перетворювачі ЧП-12–ЧП-17 (Siemens G120C, 5 кВт). Дискретні виходи модуля SM 1222 DQ16 (24 В DC) задають напрямок обертання: сигнал «Вперед» – валки зближуються, «Назад» – розхил збільшується. Частотний перетворювач плавно регулює швидкість та момент асинхронного двигуна ДВ-хх (5 кВт, 1450 об/хв). Двигун через черв'ячний редуктор ($i = 40$) обертає гвинт натискного механізму з кроком $h = 5$ мм/об, переміщуючи верхній валок до заданого калібру.

Інтерфейс оператора та верхній рівень. Панель оператора HMI Siemens KTP700 Basic підключена до ПЛК через Profinet (адреса 192.168.0.100, цикл оновлення 100 мс). Блок FC1 HMI Communication забезпечує двонаправлений обмін: оператор обирає номер калібру (1-40) та може здійснювати ручне керування, ПЛК відображає поточне положення шести клітей, стан системи та аварійні повідомлення з кодами і рекомендаціями. Після завершення позиціонування ПЛК через інтерфейс Profibus-DP (порт X1, 9-pin D-sub, адреса 2) надсилає до АСУ ТП стану сигнал «Готовність до прокатки», що є дозволом для запуску привода клітей.

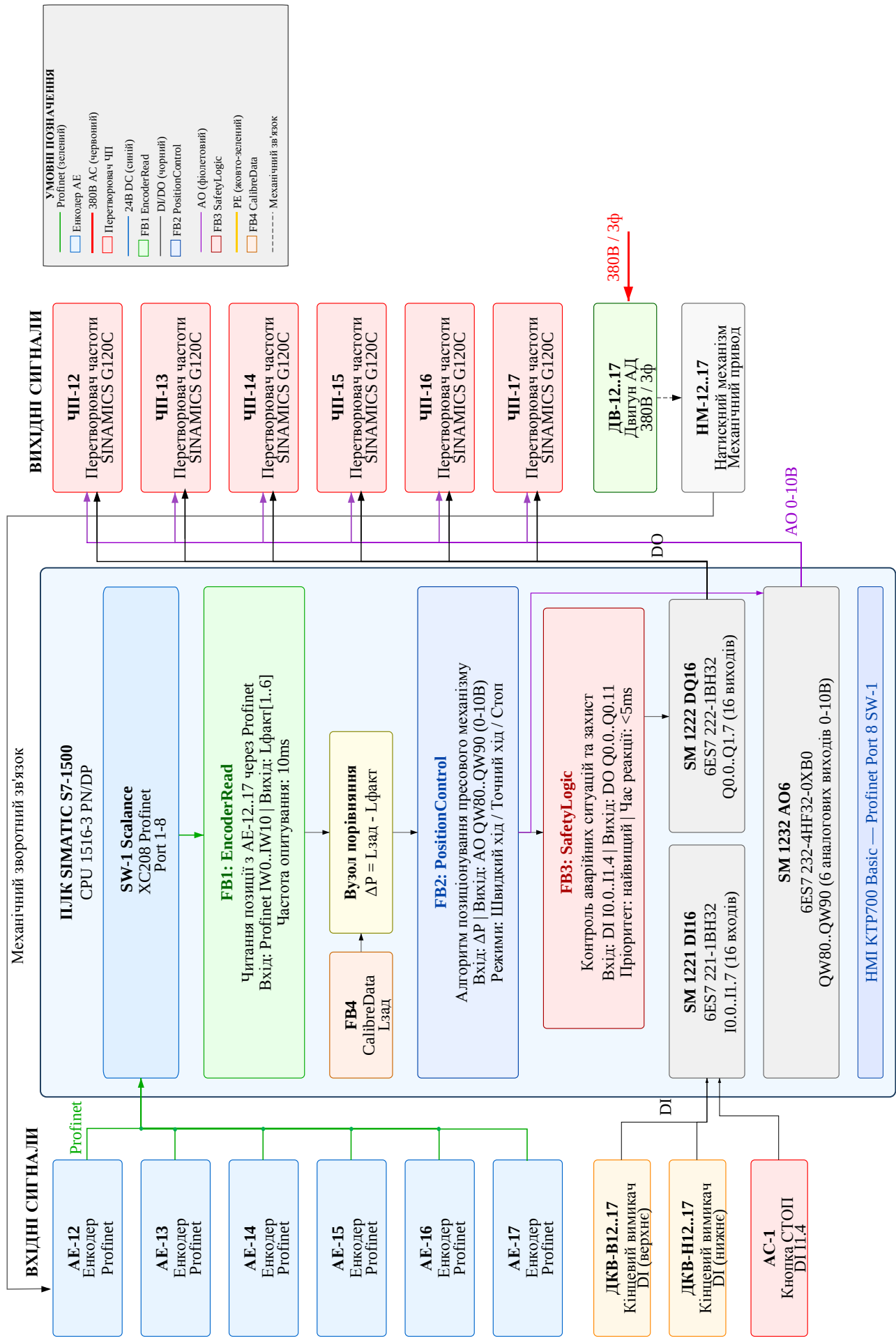


Рис. 2.2. Функціональна схема автоматизованої системи керування положенням валків клітей БЗС блюмінга 1300 (розроблено автором)

2.3.1 Таблиці з'єднань усіх блоків електрошафи

Таблиці з'єднань складені для всіх одинадцяти функціональних блоків електрошафи керування АСК БЗС 1300. Кожна таблиця визначає точний маршрут кожного провідника від джерела сигналу до приймача, адресу ПЛК, тип кабелю та призначення кола. Табл. 2.10-2.20 є вихідним документом для трасування кабелів.

Таблиця 2.10

Блок живлення ПС-1 (Siemens SITOP, 24V DC / 20A)

Вхід: ~220/230В AC через автомат QF1 32A. Вихід: 24V DC живить ПЛК, всі модулі SM, HMI KTP700, датчики ДКВ, кнопку АС-1.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ВХІДНІ КЛЕМИ (AC ~220В)						
1	L (AC-IN)	-	Автомат QF1 (32A) → L	ПС-1 клема L	ВВГ 3×2,5	Фаза живлення 220В AC
2	N (AC-IN)	-	Автомат QF1 (32A) → N	ПС-1 клема N	ВВГ 3×2,5	Нуль живлення AC
3	PE	-	Шина заземлення шафи	ПС-1 клема PE	ЖОВТ-ЗЕЛ	Захисне заземлення
ВИХІДНІ КЛЕМИ (DC 24В)						
4	+24V (DC-OUT)	-	ПС-1 +24V	КБ-DI X1.0 (+24V)	КВВГ 2×1,5	Живлення датчиків та дискретних входів
5	+24V (DC-OUT)	-	ПС-1 +24V	ПЛК CPU S7-1516 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення процесора ПЛК
6	+24V (DC-OUT)	-	ПС-1 +24V	SM 1221 DI16 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення модуля DI

1	2	3	4	5	6	7
7	+24V (DC- OUT)	-	ПС-1 +24V	SM 1222 DQ16 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення модуля DO
8	+24V (DC- OUT)	-	ПС-1 +24V	SM 1232 AO6 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення модуля АО
9	+24V (DC- OUT)	-	ПС-1 +24V	НМІ КТР700 клема +24V	КВВГ 2×1,5	Живлення панелі оператора
10	+24V (DC- OUT)	-	ПС-1 +24V	Комутатор SW-1 клема +24V	КВВГ 2×1,5	Живлення комутатора Profinet
11	+24V (DC- OUT)	-	ПС-1 +24V	АЕ-12...17 (через запоб. 0,5А)	КВВГ 2×1,5	Живлення енкодерів 10-30В DC
12	0V (DC- COM)	-	ПС-1 0V / М	КБ-DI X1.0 (0V)	КВВГ 2×1,5	Спільний мінус 24В DC
13	0V (DC- COM)	-	ПС-1 0V / М	ПЛК CPU S7-1516 клема М	КВВГ 2×1,5	Спільний мінус ПЛК

ПЛК Siemens S7-1516-3 PN/DP (центральний контролер)

Центральний контролер. IF1 (Profinet IRT - енкодери + HMI), IF2 (Profinet - АСУ ТП), X1 (Profibus DP Master). Цикл ОВ30=10мс.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ЖИВЛЕННЯ ПРОЦЕСОРА						
1	L+ (24V)	-	ПС-1 +24V вихід	CPU S7-1516 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення CPU 24В DC
2	M (0V)	-	ПС-1 0V вихід	CPU S7-1516 клема M	КВВГ 2×1,5	Мінус живлення CPU
МЕРЕЖЕВІ ІНТЕРФЕЙСИ						
3	IF1 (RJ45)	192.168.0.1	Комутатор SW-1 порт 1 (RJ45)	CPU S7-1516 IF1	Cat 6A STP	Profinet IRT: зв'язок з АЕ- 12...17 та HMI КТР700
4	IF2 (RJ45)	10.0.0.1	Мережа АСУ ТП (Ethernet)	CPU S7-1516 IF2	Cat 6A STP	Передача сигналу "Готовність до прокатки" до АСУ ТП
5	X1 (9-pin D-sub)	Addr: 2	CPU S7-1516 X1 Profibus	АСУ ТП Profibus DP шина	DP-кабель PROFIBUS	Profibus DP Master: резервний канал АСУ ТП (1,5 Мбіт/с)
РОЗШИРЕННЯ (Rack-шина до модулів SM)						
6	Bus-Rail (шина)	-	CPU S7-1516 шина розширення	SM 1221 DI16 (слот 1)	Шина S7- 1500	Внутрішня шина стійки - DI модуль

1	2	3	4	5	6	7
7	Bus-Rail (шина)	-	CPU S7-1516 шина розширення	SM 1222 DQ16 (слот 2)	Шина S7-1500	Внутрішня шина стійки - DQ модуль
8	Bus-Rail (шина)	-	CPU S7-1516 шина розширення	SM 1232 AO6 (слот 3)	Шина S7-1500	Внутрішня шина стійки - АО модуль
ФУНКЦІОНАЛЬНІ БЛОКИ ПЗ (логіка TIA Portal)						
9	FB1-EncoderRead	-	Profinet IF1 (AE-12...17)	DB: масив положень	ПЗ TIA Portal	Перетворення кутового положення φ у лінійне L [мм]: $L=\varphi \times h / (360^\circ \times i)$
10	FB2-PositionControl	-	DB: Lфакт, Lзад	SM AO6 (QW80-90), SM DQ16	ПЗ TIA Portal	ПІД двошвидк.: $ \Delta P > 10 \text{ мм} = 100 \text{ мм/с} (10 \text{ В})$; $ \Delta P \leq 10 \text{ мм} = 10 \text{ мм/с} (1 \text{ В})$
11	FB3-SafetyLogic	-	DI: AC-1, ДКВ, DO ЧП	Всі 6 ЧП: STO команда	ПЗ TIA Portal	Аварійний контроль: вихід за межі, таймаут зв'язку 100мс, таймаут поз. 120с
12	FB4-CalibreData	-	HMI: вибір калібру 1-40	DB10: Lзад, Vшвидк, Vпов	ПЗ TIA Portal	БД 40 калібрів у постійній пам'яті ПЛК (DB10)
13	FC1-HMI_Communication	-	ПЛК DB: стан системи	HMI KTP700 (Profinet)	Profinet IF1	Двонапр. обмін: вибір калібру → ПЛК; стан/аварії → HMI

Модуль SM 1221 DI16 (дискретні входи 24В DC)

Всього задіяно 25 із 32 входів. Клемний блок КБ-DI (клеми X1.1-X1.19).
Кабель до датчиків: КВВГ 2×0,75мм².

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ДАТЧИКИ ВЕРХНЬОГО КІНЦЕВОГО ПОЛОЖЕННЯ (ДКВ-В) - кліть ЗАКРИТА 500мм						
1	X1.1 → I0.0	I0.0	ДКВ-В кліть 12 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.0	КВВГ 2×0,75	Верхнє кін. положення кліть №12, 24В DC → NO замкнений
2	X1.2 → I0.1	I0.1	ДКВ-В кліть 13 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.1	КВВГ 2×0,75	Верхнє кін. положення кліть №13
3	X1.3 → I0.2	I0.2	ДКВ-В кліть 14 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.2	КВВГ 2×0,75	Верхнє кін. положення кліть №14
4	X1.4 → I0.3	I0.3	ДКВ-В кліть 15 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.3	КВВГ 2×0,75	Верхнє кін. положення кліть №15
5	X1.5 → I0.4	I0.4	ДКВ-В кліть 16 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.4	КВВГ 2×0,75	Верхнє кін. положення кліть №16
6	X1.6 → I0.5	I0.5	ДКВ-В кліть 17 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.5	КВВГ 2×0,75	Верхнє кін. положення кліть №17
ДАТЧИКИ НИЖНЬОГО КІНЦЕВОГО ПОЛОЖЕННЯ (ДКВ-Н) - кліть ВІДКРИТА 50мм						
7	X1.7 → I0.6	I0.6	ДКВ-Н кліть 12 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.6	КВВГ 2×0,75	Нижнє кін. положення кліть №12

1	2	3	4	5	6	7
8	X1.8 → I0.7	I0.7	ДКВ-Н кліть 13 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I0.7	КВВГ 2×0,75	Нижнє кін. положення кліть №13
9	X1.9 → I1.0	I1.0	ДКВ-Н кліть 14 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I1.0	КВВГ 2×0,75	Нижнє кін. положення кліть №14
10	X1.10 → I1.1	I1.1	ДКВ-Н кліть 15 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I1.1	КВВГ 2×0,75	Нижнє кін. положення кліть №15
11	X1.11 → I1.2	I1.2	ДКВ-Н кліть 16 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I1.2	КВВГ 2×0,75	Нижнє кін. положення кліть №16
12	X1.12 → I1.3	I1.3	ДКВ-Н кліть 17 (ХСКР211, NO)	SM DI16 клема I1.3	КВВГ 2×0,75	Нижнє кін. положення кліть №17
АВАРІЙНИЙ СТОП ТА АВАРІЙНІ СИГНАЛИ ЧП						
13	X1.13 → I1.4	I1.4	АС-1 кнопка Eaton M22 (NC- контакт)	SM DI16 клема I1.4	КВВГ 2×0,75	Аварійний стоп - NC логіка: «0»=0В=аварія СТО
14	X1.14 → I1.5	I1.5	ЧП-12 G120C клема DO1 (аварія)	SM DI16 клема I1.5	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП-12: перевантаження/перегрів (>110% I _н)
15	X1.15 → I1.6	I1.6	ЧП-13 G120C клема DO1 (аварія)	SM DI16 клема I1.6	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП-13
16	X1.16 → I1.7	I1.7	ЧП-14 G120C клема DO1 (аварія)	SM DI16 клема I1.7	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП-14

1	2	3	4	5	6	7
17	X1.17 → I2.0	I2.0	ЧП-15 G120C клема DO1 (аварія)	SM DI16 клема I2.0	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП-15
18	X1.18 → I2.1	I2.1	ЧП-16 G120C клема DO1 (аварія)	SM DI16 клема I2.1	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП-16
19	X1.19 → I2.2	I2.2	ЧП-17 G120C клема DO1 (аварія)	SM DI16 клема I2.2	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП-17
ЖИВЛЕННЯ МОДУЛЯ						
20	L+ (24V)	-	ПС-1 +24V	SM DI16 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення модуля
21	M (0V)	-	ПС-1 0V	SM DI16 клема M	КВВГ 2×1,5	Мінус модуля

Таблиця 2.13

Модуль SM 1222 DQ16 (дискретні виходи 24В DC, 0,5А)

Виходи Q0.0-Q1.4. Клемний блок КБ-DO (клеми X3.1-X3.13). Кабель:
КВВГ 2×0,75мм².

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
КОМАНДИ НАПРЯМКУ ОБЕРТАННЯ ДВИГУНІВ (Вперед / Назад)						
1	X3.1 → Q0.0	Q0.0	SM DQ16 клема Q0.0	ЧП-12 G120C клема DI1 (Вперед)	КВВГ 2×0,75	Кліть №12: Вперед - валки зближуються (↓)
2	X3.2 → Q0.1	Q0.1	SM DQ16 клема Q0.1	ЧП-12 G120C клема DI2 (Назад)	КВВГ 2×0,75	Кліть №12: Назад - валки розходяться (↑)

1	2	3	4	5	6	7
3	X3.3 → Q0.2	Q0.2	SM DQ16 клема Q0.2	ЧП-13 G120C клема DI1 (Вперед)	КВВГ 2×0,75	Кліть №13: Вперед
4	X3.4 → Q0.3	Q0.3	SM DQ16 клема Q0.3	ЧП-13 G120C клема DI2 (Назад)	КВВГ 2×0,75	Кліть №13: Назад
5	X3.5 → Q0.4	Q0.4	SM DQ16 клема Q0.4	ЧП-14 G120C клема DI1 (Вперед)	КВВГ 2×0,75	Кліть №14: Вперед
6	X3.6 → Q0.5	Q0.5	SM DQ16 клема Q0.5	ЧП-14 G120C клема DI2 (Назад)	КВВГ 2×0,75	Кліть №14: Назад
7	X3.7 → Q0.6	Q0.6	SM DQ16 клема Q0.6	ЧП-15 G120C клема DI1 (Вперед)	КВВГ 2×0,75	Кліть №15: Вперед
8	X3.8 → Q0.7	Q0.7	SM DQ16 клема Q0.7	ЧП-15 G120C клема DI2 (Назад)	КВВГ 2×0,75	Кліть №15: Назад
9	X3.9 → Q1.0	Q1.0	SM DQ16 клема Q1.0	ЧП-16 G120C клема DI1 (Вперед)	КВВГ 2×0,75	Кліть №16: Вперед
10	X3.10 → Q1.1	Q1.1	SM DQ16 клема Q1.1	ЧП-16 G120C клема DI2 (Назад)	КВВГ 2×0,75	Кліть №16: Назад
11	X3.11 → Q1.2	Q1.2	SM DQ16 клема Q1.2	ЧП-17 G120C клема DI1 (Вперед)	КВВГ 2×0,75	Кліть №17: Вперед
12	X3.12 → Q1.3	Q1.3	SM DQ16 клема Q1.3	ЧП-17 G120C клема DI2 (Назад)	КВВГ 2×0,75	Кліть №17: Назад
СИГНАЛ ГОТОВНОСТІ ДО ПРОКАТКИ						
13	X3.13 → Q1.4	Q1.4	SM DQ16 клема Q1.4	АСУ ТП / Profibus DP → Q1.4	КВВГ 2×0,75	«Готовність до прокатки» ΔP ≤0,1мм - всі кліті

Продовження табл. 2.13

ЖИВЛЕННЯ МОДУЛЯ						
1	2	3	4	5	6	7
14	L+ (24V)	-	ПС-1 +24V	SM DQ16 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення модуля
15	M (0V)	-	ПС-1 0V	SM DQ16 клема M	КВВГ 2×1,5	Мінус модуля

Таблиця 2.14

Модуль SM 1232 АО6 (аналогові виходи 0-10В DC)

Адресація QW80-QW90. Роздільна здатність 12 біт. Клас точності 0,5%.
Клемний блок КБ-АО (X2.1-X2.6). 0В=0Гц, 1В=5Гц(10мм/с), 10В=50Гц(100мм/с).

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ЗАВДАННЯ ШВИДКОСТІ НА ЧАСТОТНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ (0-10В DC)						
1	X2.1 (АО1+/АО1-)	QW80	SM АО6 клема QW80 (АО1+)	ЧП-12 G120C клема АІ1+/АІ1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання швидкості кліть №12: 0-10В → 0- 50Гц → 0- 100мм/с
2	X2.2 (АО2+/АО2-)	QW82	SM АО6 клема QW82 (АО2+)	ЧП-13 G120C клема АІ1+/АІ1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання швидкості кліть №13
3	X2.3 (АО3+/АО3-)	QW84	SM АО6 клема QW84 (АО3+)	ЧП-14 G120C клема АІ1+/АІ1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання швидкості кліть №14
4	X2.4 (АО4+/АО4-)	QW86	SM АО6 клема QW86 (АО4+)	ЧП-15 G120C клема АІ1+/АІ1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання швидкості кліть №15

Продовження табл. 2.14

1	2	3	4	5	6	7
5	X2.5 (AO5+/AO5-)	QW88	SM AO6 клема QW88 (AO5+)	ЧП-16 G120C клема AI1+/AI1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання швидкості кліть №16
6	X2.6 (AO6+/AO6-)	QW90	SM AO6 клема QW90 (AO6+)	ЧП-17 G120C клема AI1+/AI1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання швидкості кліть №17
ЗАЗЕМЛЕННЯ ЕКРАНІВ						
7	SHIELD	-	Екрани 6 кабелів АО	Клемник шафи (SHIELD)	-	Екрани заземлені ТІЛЬКИ з боку шафи керування
ЖИВЛЕННЯ МОДУЛЯ						
8	L+ (24V)	-	ПС-1 +24V	SM AO6 клема L+	КВВГ 2×1,5	Живлення модуля
9	M (0V)	-	ПС-1 0V	SM AO6 клема M	КВВГ 2×1,5	Мінус модуля

Комутатор Profinet SW-1 (8-портовий IRT)

Підключений до IF1 ПЛК (192.168.0.1). Мережа 192.168.0.x. Cat 6A STP, 100 Мбіт/с. Роз'єми M12 D-code з боку енкодерів.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ПОРТИ PROFINET IRT КОМУТАТОРА SW-1						
1	Порт 1 (RJ45)	192.168.0.1	Комутатор SW-1 порт 1	ПЛК IF1 (192.168.0.1)	Cat 6A STP	Uplink до ПЛК Profinet IRT
2	Порт 2 (M12 D- code)	192.168.0.1 0	Комутатор SW-1 порт 2	AE-12 (кліть №12)	Cat 6A STP, 15-50м	Profinet IRT до енкодера кліть №12
3	Порт 3 (M12 D- code)	192.168.0.1 1	Комутатор SW-1 порт 3	AE-13 (кліть №13)	Cat 6A STP, 15-50м	Profinet IRT до енкодера кліть №13
4	Порт 4 (M12 D- code)	192.168.0.1 2	Комутатор SW-1 порт 4	AE-14 (кліть №14)	Cat 6A STP, 15-50м	Profinet IRT до енкодера кліть №14
5	Порт 5 (M12 D- code)	192.168.0.1 3	Комутатор SW-1 порт 5	AE-15 (кліть №15)	Cat 6A STP, 15-50м	Profinet IRT до енкодера кліть №15
6	Порт 6 (M12 D- code)	192.168.0.1 4	Комутатор SW-1 порт 6	AE-16 (кліть №16)	Cat 6A STP, 15-50м	Profinet IRT до енкодера кліть №16
7	Порт 7 (M12 D- code)	192.168.0.1 5	Комутатор SW-1 порт 7	AE-17 (кліть №17)	Cat 6A STP, 15-50м	Profinet IRT до енкодера кліть №17

1	2	3	4	5	6	7
8	Порт 8 (RJ45)	192.168.0.100	Комутатор SW-1 порт 8	HMI KTP700 Basic	Cat 6A STP	Profinet IRT до панелі оператора
ЖИВЛЕННЯ КОМУТАТОРА						
9	+24V DC	-	ПС-1 +24V	SW-1 клемма +24V	КВВГ 2×1,5	Живлення комутатора
10	0V DC	-	ПС-1 0V	SW-1 клемма 0V	КВВГ 2×1,5	Мінус живлення

Таблиця 2.16

Абсолютні енкодери АЕ-12...АЕ-17 (HeavyDuty, 16 біт, IP67)

Встановлені на валах черв'ячних редукторів НМ клітей №12-17. Profinet IRT, цикл 10мс. Роздільна здатність лінійна 0,000008мм.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ПІДКЛЮЧЕННЯ ВСІХ ЕНКОДЕРІВ (АЕ-12...АЕ-17)						
1	RJ45/M12 PN (АЕ-12)	192.168.0.10	НМ кліть №12 (вал редуктора)	SW-1 порт 2 (RJ45)	Cat 6A STP ≈15м	Profinet IRT, цикл 10мс, 100 Мбіт/с
2	RJ45/M12 PN (АЕ-13)	192.168.0.11	НМ кліть №13 (вал редуктора)	SW-1 порт 3 (RJ45)	Cat 6A STP ≈20м	Profinet IRT до SW-1
3	RJ45/M12 PN (АЕ-14)	192.168.0.12	НМ кліть №14 (вал редуктора)	SW-1 порт 4 (RJ45)	Cat 6A STP ≈30м	Profinet IRT до SW-1

1	2	3	4	5	6	7
4	RJ45/M12 PN (AE-15)	192.168.0.13	НМ кліть №15 (вал редуктора)	SW-1 порт 5 (RJ45)	Cat 6A STP ≈35м	Profinet IRT до SW-1
5	RJ45/M12 PN (AE-16)	192.168.0.14	НМ кліть №16 (вал редуктора)	SW-1 порт 6 (RJ45)	Cat 6A STP ≈40м	Profinet IRT до SW-1
6	RJ45/M12 PN (AE-17)	192.168.0.15	НМ кліть №17 (вал редуктора)	SW-1 порт 7 (RJ45)	Cat 6A STP ≈50м	Profinet IRT до SW-1
ЖИВЛЕННЯ КОЖНОГО ЕНКОДЕРА (24В DC)						
7	+24V DC (AE-12)	-	ПС-1 +24V → запоб. FU-12 (0,5A)	AE-12 клемма +V	КВВГ 2×1,5	Живлення 10-30В DC, захист 0,5А
8	0V (AE-12)	-	ПС-1 0V	AE-12 клемма - V/GND	КВВГ 2×1,5	Мінус живлення
9	+24V...0V (AE-13...17)	-	Аналогічно AE-12 (запоб. по 0,5А)	AE-13...17 клеми +V/-V	КВВГ 2×1,5	Окремий запоб. 0,5А для кожного
МЕХАНІЧНЕ ПІДКЛЮЧЕННЯ						
10	Вал (AE-N)	-	Вихідний вал черв. редуктора НМ кліть N	AE-N (мех. кріплення+муфта)	Механічна	Монтаж на вал редуктора, 16 біт, роздільна здатність 0,000008мм

Частотні перетворювачі ЧП-12...ЧП-17 (Siemens G120C, 5кВт, 3×380В)

Примітка: таблиця типова для одного ЧП-N (N=12,13,14,15,16,17).
Живлення 3×380В АС через QF-N 16А. Вихід U/V/W → двигун ДВ-N.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
СИЛОВЕ ЖИВЛЕННЯ 3×380В АС (типово для ЧП-N, N=12..17)						
1	L1(R)	-	Автомат QF-N 16А (кожен ЧП - окремий QF)	ЧП-N клема L1/R	ВВГ 3×4,0	Фаза R живлення 380В АС
2	L2(S)	-	Автомат QF-N 16А клема 4	ЧП-N клема L2/S	ВВГ 3×4,0	Фаза S живлення 380В АС
3	L3(T)	-	Автомат QF-N 16А клема 6	ЧП-N клема L3/T	ВВГ 3×4,0	Фаза T живлення 380В АС
4	PE	-	Шина заземлення шафи (PE)	ЧП-N клема PE	ЖОВ- ЗЕЛ ≥4мм ²	Захисне заземлення ЧП
СИЛОВИЙ ВИХІД НА ДВИГУН						
5	U	-	ЧП-N клема U	ДВ-N двигун клема U1	ВВГ 3×2,5мм ² (10-20м)	Фаза U виходу ЧП → двигун
6	V	-	ЧП-N клема V	ДВ-N двигун клема V1	ВВГ 3×2,5мм ²	Фаза V виходу ЧП → двигун
7	W	-	ЧП-N клема W	ДВ-N двигун клема W1	ВВГ 3×2,5мм ²	Фаза W виходу ЧП → двигун
КЕРУЮЧІ ВХОДИ ЧП (24В DC від SM DQ16)						
8	DI1 (Вперед)	Q0.2N-4	SM DQ16 клема QN (КБ-DO X3.2N-3)	ЧП-N клема DI1	КВВГ 2×0,75	Команда Вперед: валки зближуються ↓

1	2	3	4	5	6	7
9	DI2 (Назад)	Q0.2N-3	SM DQ16 клема QN (КБ-DO X3.2N-2)	ЧП-N клема DI2	КВВГ 2×0,75	Команда Назад: валки розходяться ↑
10	DI3 (STO-A)	AC-1 NC	Кнопка AC-1 (NC, коло безпеки)	ЧП-N клема DI3 / STO-A	КВВГ 2×0,75	Safe Torque Off - аварійна зупинка (паралельно всі 6 ЧП)
АНАЛОГОВИЙ ВХІД ЧП (0-10В від SM AO6)						
11	AI1+ / AI1-	QW80+2(N- 12)	SM AO6 клема QW (КБ-AO X2.N-11)	ЧП-N клема AI1+/AI1-	КВВГ 2×0,75 екран	Завдання частоти: 0- 10В=0-50Гц=0- 100мм/с
АВАРІЙНИЙ ВИХІД (24В DC → SM DI16)						
12	DO1 (аварія)	I1.5+(N-12)	ЧП-N клема DO1 (NO)	SM DI16 клема IN (КБ-DI X1.14+(N-12))	КВВГ 2×0,75	Аварія ЧП: перевантаження, перегрів двигуна (>110% I _n)
ЖИВЛЕННЯ ВБУДОВАНОГО БЛОКУ УПРАВЛІННЯ						
13	24V (AUX)	-	ПС-1 +24V	ЧП-N клема AUX 24V (опц.)	КВВГ 2×1,5	Незалежне живлення блоку керування

Асинхронні двигуни ДВ-12...ДВ-17 (5кВт, 3×380В)

Підключення схема зірка (Y). Клемна коробка: U1,V1,W1,PE. Кабель від ЧП: ВВГ 3×2,5мм², довжина 10-20м.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
ПІДКЛЮЧЕННЯ ОБМОТОК ДВИГУНА (схема зірка Y)						
1	U1	-	ЧП-N клема U (вихід)	ДВ-N клема U1 (клем. коробка)	ВВГ 3×2,5 черв (10- 20м)	Фаза U живлення двигуна
2	V1	-	ЧП-N клема V (вихід)	ДВ-N клема V1 (клем. коробка)	ВВГ 3×2,5 жовт	Фаза V живлення двигуна
3	W1	-	ЧП-N клема W (вихід)	ДВ-N клема W1 (клем. коробка)	ВВГ 3×2,5 синій	Фаза W живлення двигуна
4	PE	-	Захисна шина PE (на корпусі ЧП-N)	ДВ-N корпус (болт заземлення)	ЖОВ-ЗЕЛ ≥2,5мм ²	Захисне заземлення корпусу двигуна
МЕХАНІЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК (вал двигуна → редуктор → гвинт → енкодер)						
5	Вал → редуктор	-	Двигун ДВ-N (1450 об/хв)	Черв. редуктор i=40 → гвинтова пара h=5мм/об	Механічна передача	Швидкість: 100мм/с ≈ 20 об/хв на гвинті
6	Вал редуктора → AE-N	-	Вихідний вал редуктора НМ кліть N	Абсолютний енкодер AE-N (HeavyDuty)	Механічне кріплення	Зчитування положення валка, 16 біт, роздільна здатність 0,000008мм

Панель оператора HMI Siemens KTP700 Basic (7", Profinet)

Підключена до ПЛК через Profinet (адреса 192.168.0.100). Цикл обміну 100мс. Відображає положення 6 клітей, вибір калібру, аварії.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ПІДКЛЮЧЕННЯ ПАНЕЛІ ОПЕРАТОРА						
1	RJ45 (Profinet)	192.168.0.100	HMI KTP700 клема RJ45 PN	Комутатор SW-1 порт 8 (RJ45)	Cat 6A STP	Profinet IRT - обмін даними з ПЛК, цикл 100мс
2	+24V DC	-	ПС-1 +24V	HMI KTP700 клема +24V	КВВГ 2×1,5	Живлення панелі
3	0V DC	-	ПС-1 0V	HMI KTP700 клема 0V	КВВГ 2×1,5	Мінус живлення
4	PE	-	Шина PE шафи	HMI корпус (болт PE)	ЖОВ- ЗЕЛЕНИ Й	Захисне заземлення
ФУНКЦІЇ ВІДОБРАЖЕННЯ ТА УПРАВЛІННЯ (через Profinet)						
5	Відображен ня (вхід HMI)	-	ПЛК DB: Lфакт[24]	HMI: екран «Поточне положення»	Profinet	Поточне положення валків 6 клітей [мм], оновлення 100мс

1	2	3	4	5	6	7
6	Введення (вихід HMI)	-	HMI: вибір калібру 1-40	ПЛК DB10: Lзад	Profinet	Оператор вибирає номер калібру → ПЛК завантажує Lзад
7	Аварії (вхід HMI)	-	ПЛК FB3- SafetyLogic	HMI: вікно аварій	Profinet	Аварійні повідомлення з кодами та рекомендаціями
8	Журнал (вхід HMI)	-	ПЛК DB: архів подій	HMI: вікно журналу	Profinet	Журнал позиціонування з часовими мітками

Таблиця 2.20

Датчики кінцевих положень ДКВ-В/ДКВ-Н та кнопка аварійного стопу**АС-1**

ДКВ: ХСКР211, NO-контакт, 24В DC, 2 на кліть (верх+низ). АС-1: Eaton M22, NC із самоблокуванням. Логіка безпечного стану.

№	Клема	Адреса ПЛК	ЗВІДКИ (джерело/блок)	КУДИ (приймач/блок)	Кабель	Призначення / Примітка
1	2	3	4	5	6	7
ДАТЧИКИ ВЕРХНЬОГО КІНЦЕВОГО ПОЛОЖЕННЯ ДКВ-В (кліть ЗАКРИТА 500мм, ХСКР211 NO)						
1	ДКВ-В12 пін 1 (+)	I0.0	КБ-DI X1.1 (+24V через датчик)	SM DI16 клема I0.0	КВВГ 2×0,75	NO: замкнений коли валок у верхній межі (500мм)
2	ДКВ-В12 пін 2 (-)	-	SM DI16 клема M (0V)	ДКВ-В12 пін 2	КВВГ 2×0,75	Спільний мінус датчика

1	2	3	4	5	6	7
3	ДКВ- В13...В17	I0.1...I0.5	Аналогічно ДКВ-В12	SM DI16 I0.1- I0.5	КВВГ 2×0,75 кожен	Верхні межі клітей №13-17 відповідно
ДАТЧИКИ НИЖНЬОГО КІНЦЕВОГО ПОЛОЖЕННЯ ДКВ-Н (кліть ВІДКРИТА 50мм, ХСКР211 NO)						
4	ДКВ-Н12 пін 1 (+)	I0.6	КБ-DI X1.7 (+24V через датчик)	SM DI16 клема I0.6	КВВГ 2×0,75	NO: замкнений коли валок у нижній межі (50мм)
5	ДКВ-Н12 пін 2 (-)	-	SM DI16 клема М (0V)	ДКВ-Н12 пін 2	КВВГ 2×0,75	Спільний мінус датчика
6	ДКВ- Н13...Н17	I1.0...I1.3	Аналогічно ДКВ-Н12	SM DI16 I1.0- I1.3	КВВГ 2×0,75 кожен	Нижні межі клітей №13-17 відповідно
КНОПКА АВАРІЙНОГО СТОПУ АС-1 (NC, Eaton M22, самоблокування)						
7	АС-1 пін А1 (NC)	I1.4	КБ-DI X1.13 (+24V через NC)	SM DI16 клема I1.4	КВВГ 2×0,75	NC: при натисканні → «0»=аварія STO на всі ЧП
8	АС-1 пін А2 (NC)	-	SM DI16 клема М (0V)	АС-1 пін А2	КВВГ 2×0,75	Спільний мінус кнопки
9	АС-1 → STO коло	-	АС-1 NC вихід (паралельно від пін А1)	ЧП-12...17 клеми DI3/STO- А (паралельно)	КВВГ 2×0,75	STO на всі 6 ЧП одночасно при аварії

2.3.2 Розробка схеми підключень системи

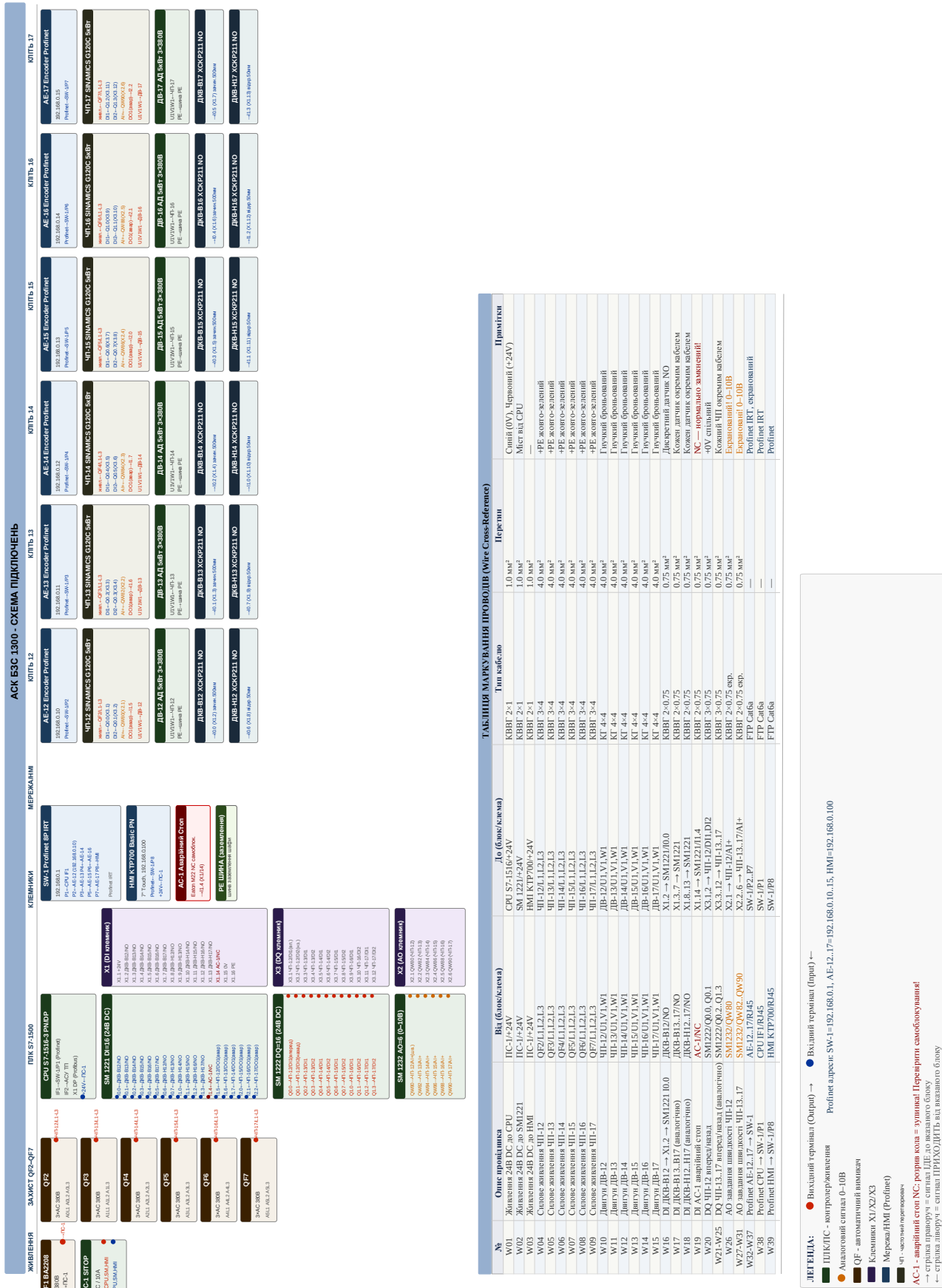
Розроблена схема підключень АСК БЗС 1300 наведена на рис. 2.3. Схема відображає конкретні електричні з'єднання між елементами системи – адреси клем блоків Х1–Х3, типи та перерізи кабелів, адресацію Profinet та прив'язку сигналів до модулів вводу/виводу ПЛК.

Живлення системи. Блок живлення ПС-1 (Siemens SITOP, 24 В DC, 10 А) забезпечує постійним струмом ПЛК S7-1516, модулі SM 1221/1222/1232, панель НМІ КТР700 та ланцюги дискретних входів. Живлення ПС-1 підведено від автоматичного вимикача QF1 (ПС-1+24V → CPU). Частотні перетворювачі ЧП-12–ЧП-17 отримують трифазне живлення 3×380 В від автоматичних вимикачів QF2–QF7 через кабелі КВВГ 3×4 мм².

Мережа Profinet та підключення енкодерів. Абсолютні енкодери АЕ-12–АЕ-17 підключені до керованого комутатора SW-1 (Profinet 8P IRT) кабелем FTP Cat6a з роз'ємами RJ45. Комутатор SW-1 з'єднаний з інтерфейсом IF1 ЦПУ (адреса 192.168.0.1); адреси енкодерів – 192.168.0.10–192.168.0.15. Панель оператора НМІ КТР700 підключена до SW-1 (адреса 192.168.0.100) окремим відрізком FTP Cat6a. Живлення енкодерів – 24 В DC від ПС-1 через клемний блок Х1.

Дискретні входи (Х1, SM 1221 DI16). Датчики кінцевих положень ДКВ-В12–ДКВ-В17 (сигнал NO) та датчики ДКВ-Н12–ДКВ-Н17 (NO) підключені до клем Х1 кабелями КВВГ 2×0,75 мм². Кнопка аварійного стопу АС-1 підключена до клеми Х1.14 контактом NC – розрив кола ініціює зупинку; схема передбачає перевірку самоблокування при введенні в дію. Аварійні сигнали частотних перетворювачів (W17-W20) надходять на клеми Х1.3-Х1.19 та далі на входи SM 1221.

Дискретні виходи (Х3, SM 1222 DQ16). Сигнали «Вперед»/«Назад» для ЧП-12-ЧП-17 формуються на виходах модуля SM 1222 DQ16 (24 В DC) і передаються через клеми Х3 кабелями КВВГ 3×0,75 мм². Кожній кліті відповідає окрема пара виходів.



Аналогові виходи (X2, SM 1232 AO6). Шість аналогових виходів QW80–QW90 модуля SM 1232 (діапазон 0-10 В, роздільна здатність 12 біт) передають завдання частоти до аналогових входів AI1+/AI1- перетворювачів ЧП-12-ЧП-17 через клеми X2.1-X2.6 (W21-W26). Кабель - КВВГ 2×0,75 мм², екранований; екран заземлений на клемнику шафи.

Силові кола. Двигуни ДВ-12-ДВ-17 підключені до виходів U/V/W відповідних частотних перетворювачів кабелями КГ 4×4 мм² (гнучкий броньований). Захисне заземлення (РЕ) виконано кабелями перерізом 4 мм² на загальну шину шафи.

Зведена таблиця маркування всіх провідників наведена у розділі 2.3.1 (таблиця Wire Cross-Reference, W01-W39).

2.4 Алгоритм автоматичного встановлення положення валків

Алгоритм автоматичного встановлення положення валків клітей реалізований у програмному забезпеченні ПЛК у середовищі Siemens TIA Portal V17 мовою структурованого тексту (SCL). Блок-схема алгоритму наведена на рис. 2.4.

Алгоритм складається з п'ятнадцяти послідовних блоків і одного аварійного блоку (А), що реалізують повний цикл позиціонування шести клітей БЗС. Виконання починається з ініціалізації системи: ПЛК скидає лічильник оброблених осей до нуля, перевіряє наявність зв'язку з усіма шістьма частотними перетворювачами ЧП-12 – ЧП-17 та тестує діагностику абсолютних енкодерів АЕ-12 – АЕ-17 через Profinet IRT. Оскільки застосовуються абсолютні багатообертові енкодери, процедура homing не потрібна – система одразу після подачі живлення знає точне положення кожного натискного механізму.

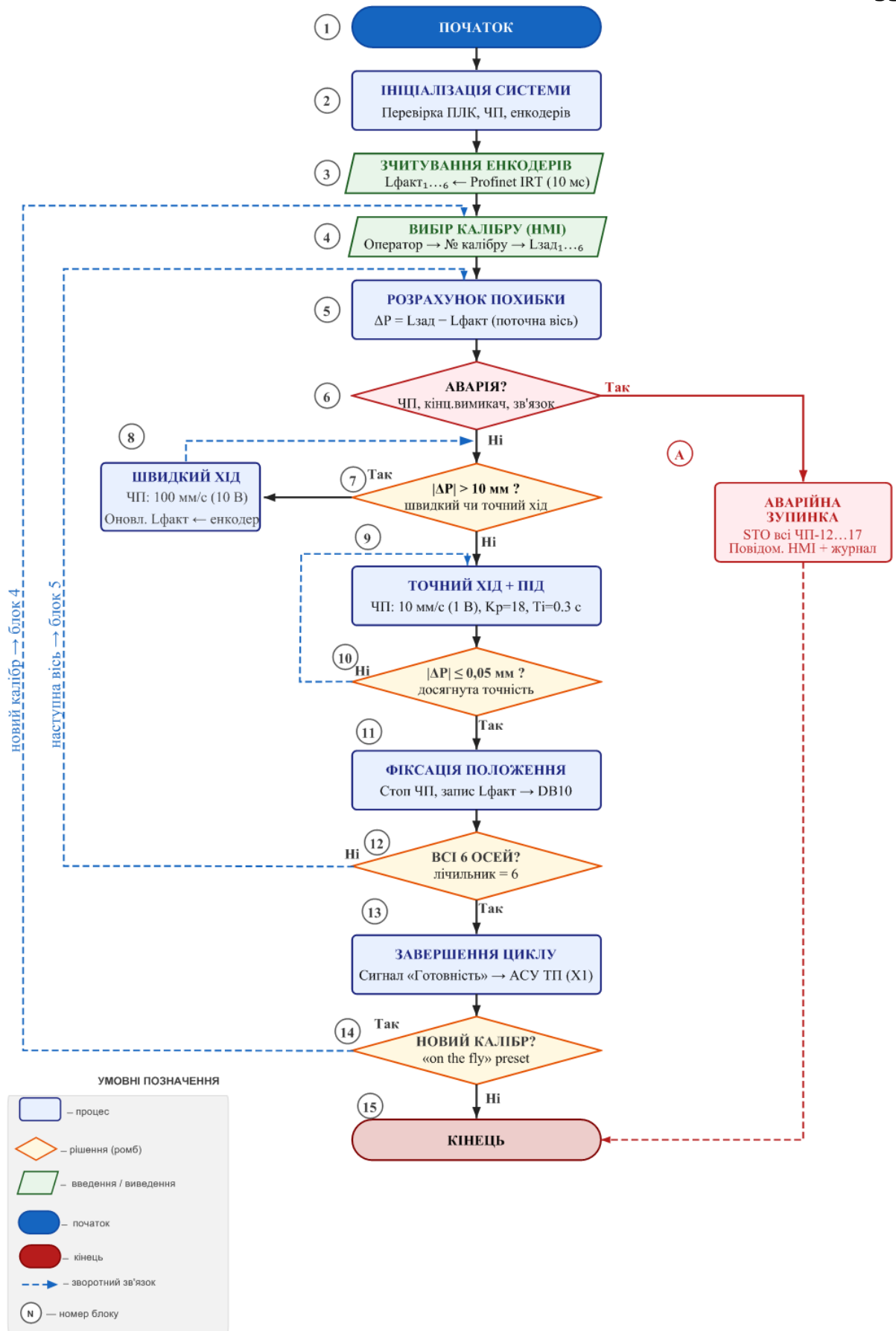


Рис. 2.4. Блок-схема алгоритму автоматичного встановлення положення валків клітей БЗС
(розроблено автором)

Після ініціалізації ПЛК зчитує поточні значення всіх шести абсолютних енкодерів через технологічні об'єкти Profinet з циклом оновлення 10 мс і формує масив фактичних лінійних положень $L_{\text{факт}1...6}$. Одночасно оператор через панель НМІ КТР700 обирає номер калібру від 1 до 40, після чого ПЛК автоматично завантажує з постійної пам'яті (DB10) задані положення $L_{\text{зад}1...6}$ та швидкісні параметри для всіх шести клітей. Обидва блоки позначено паралелограмами як операції введення даних від зовнішніх пристроїв.

Після завантаження уставок для поточної осі ПЛК обчислює похибку позиціонування шляхом перетворення кутового положення енкодера у лінійне переміщення за формулою (2.1) та розрахунку відхилення за формулою (2.2).

$$L = (\varphi \cdot h) / (360^\circ \cdot i), \quad (2.1)$$

де φ – кут повороту вала енкодера, градуси; $h = 5$ мм/об – крок гвинтової пари натискного механізму; $i = 40$ – передавальне відношення черв'ячного редуктора.

$$\Delta P = L_{\text{зад}} - L_{\text{факт}}, \quad (2.2)$$

де $L_{\text{зад}}$ – задане положення валка для обраного калібру, мм; $L_{\text{факт}}$ – фактичне положення, зчитане з енкодера, мм.

Перед початком руху привода алгоритм виконує перевірку аварійних умов: спрацювання кнопки АВАРІЙНИЙ СТОП (АС-1), вихід натискного механізму за межі допустимого діапазону переміщення (50–500 мм) або наявність аварійного сигналу від частотного перетворювача – перевантаження, перегрів двигуна чи порушення зв'язку. За наявності будь-якої з цих умов управління передається блоку аварійної зупинки, в іншому разі алгоритм переходить до вибору режиму руху.

Вибір режиму руху визначається величиною поточної похибки. Якщо $|\Delta P| > 10$ мм, виконується блок швидкого ходу: частотний перетворювач отримує завдання 10 В, що відповідає швидкості 100 мм/с. Протягом усього

часу переміщення енкодер безперервно оновлює значення $L_{\text{факт}}$ кожні 10 мс, після чого управління знову повертається до перевірки умови. Цикл «рухатись – перевіряти відстань» повторюється доти, поки $|\Delta P|$ не стане меншим або рівним 10 мм. Такий спосіб організації циклу виключає зайві зупинки та повторні розрахунки уставок, забезпечуючи безперервне й плавне наближення до заданого положення.

Коли похибка знижується до $|\Delta P| \leq 10$ мм, алгоритм переходить у режим точного ходу: частотний перетворювач отримує завдання 1 В (10 Гц, 10 мм/с), а паралельно виконується ПІД-алгоритм регулятора з параметрами $K_p = 18$, $T_i = 0,3$ с, $T_d = 0,075$ с, що забезпечує плавне доточнення без перерегулювання. Після кожного кроку обчислення перевіряється умова досягнення необхідної точності $|\Delta P| \leq 0,05$ мм. Якщо умова ще не виконана, система залишається у режимі точного ходу; як тільки точність досягнута, виконується фіксація положення: ПЛК подає команду «Стоп» на частотний перетворювач, досягнуте значення $L_{\text{факт}}$ записується до блоку даних DB10 з часовою міткою, а лічильник оброблених осей збільшується на 1.

Після фіксації положення однієї осі алгоритм перевіряє, чи позиціоновано всі шість клітей. Якщо лічильник менший за шість, виконання повертається до розрахунку похибки для наступної осі без повторного звернення до НМІ, оскільки уставки для всього калібру вже завантажено в пам'ять ПЛК. Коли всі шість клітей позиціоновано, виконується завершення циклу: ПЛК надсилає сигнал «Готовність до прокатки» через порт Profibus DP (X1) до АСУ ТП стану, що є апаратним дозволом для запуску головного приводу клітей, а на НМІ відображається відповідне підтвердження.

Завершальна перевірка реалізує функцію «on the fly» preset: алгоритм очікує сигнал від АСУ ТП або дії оператора. Якщо надійшов запит на інший калібр під час або відразу після прокатки, система без зупинки повертається до завантаження нових уставок. За відсутності нового запиту алгоритм завершується.

Окремою гілкою алгоритму є аварійна зупинка, до якої управління передається при виявленні будь-якої аварійної умови на етапі перевірки. Блок

FB3 SafetyLogic формує команду STO (Safe Torque Off) одночасно на всіх шести частотних перетворювачах ЧП-12 –ЧП-17, виводить на НМІ аварійне повідомлення з кодом помилки та рекомендацією щодо усунення і записує подію до журналу аварій з часовою міткою та значеннями всіх параметрів у момент спрацювання. При таймауті зв'язку з окремим енкодером (100 мс) блокується лише відповідний контур, решта п'яти продовжують роботу. При загальному таймауті позиціонування (120 с) або натисканні кнопки АС-1 зупиняються всі шість контурів. Повторний пуск можливий лише після підтвердження оператором усунення причини аварії через інтерфейс НМІ.

2.5 Математична модель системи позиціонування

Для аналізу динамічних властивостей та розрахунку параметрів регулятора розроблено математичну модель замкненого контуру регулювання положення валка кліті. Контур містить три послідовно з'єднані ланки: ПІД-регулятор у ПЛК, частотний перетворювач Siemens G120C та електромеханічну частину (асинхронний двигун 5 кВт – черв'ячний редуктор $i = 40$ – гвинтова пара $h = 5$ мм/об).

Передавальна функція ПІД-регулятора у ПЛК (блок FB2 PositionControl, реалізація SCL):

$$W_{\text{per}}(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s), \quad (2.3)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційності; T_i – час інтегрування, с; T_d – час диференціювання, с.

Передавальна функція електромеханічної частини (двигун + редуктор + гвинт):

$$W_{\text{п}}(s) = 1 / (T_{\text{п}} \cdot s + 1), \quad T_{\text{п}} = 0,01 \text{ с}. \quad (2.4)$$

де $T_{\text{п}} = 0,01$ с – стала часу перетворювача G120C (час реакції на зміну аналогового завдання 0-10 В за специфікацією [26]).

Передавальна функція електромеханічної частини (асинхронний двигун 5 кВт + черв'ячний редуктор $i = 40$ + гвинтова пара $h = 5$ мм/об):

$$W_{em}(s) = K_{em} / (T_{em} \cdot s + 1), \quad T_{em} = 0,15 \text{ с.} \quad (2.5)$$

де $T_{em} = 0,15$ с – електромеханічна стала часу двигуна; K_{em} – передавальний коефіцієнт ЕМ-ланки, мм/с/В.

Розрахунок передавального коефіцієнта K_{em} . При номінальній частоті ЧП $f = 50$ Гц двигун розвиває частоту обертання $n = 1450$ об/хв. Лінійна швидкість переміщення натискного механізму:

$$\begin{aligned} v_{max} &= (n / 60) \cdot h / i = (1450 / 60) \cdot 5 / 40 = \\ &= 24,17 \cdot 0,125 = 3,02 \text{ мм/с} \quad (\text{при } f = 1 \text{ Гц}) \\ v_{max} &= 3,02 \cdot 50 = 151 \text{ мм/с} \approx 150 \text{ мм/с} \quad (\text{при } f = 50 \text{ Гц}). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Оскільки аналоговий вихід ПЛК задає діапазон 0–10 В, що відповідає 0–50 Гц на ЧП G120C, передавальний коефіцієнт:

$$K_{em} = v_{max} / U_{max} = 150 \text{ мм/с} / 10 \text{ В} = 15 \text{ (мм/с)/В.} \quad (2.7)$$

Загальна передавальна функція розімкненого контуру:

$$W_{roz}(s) = W_{per}(s) \cdot W_{п}(s) \cdot W_{em}(s). \quad (2.8)$$

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора за методом Циглера–Нікольса [2]. Еквівалентна стала часу об'єкта (сума малих сталих):

$$T_{\Sigma} = T_{п} + T_{em} = 0,01 + 0,15 = 0,16 \text{ с.} \quad (2.9)$$

Критичний період коливань для об'єкта другого порядку:

$$\begin{aligned} T_{kr} &= 2\pi \cdot \sqrt{(T_p \cdot T_m)} = 2\pi \cdot \sqrt{(0,01 \cdot 0,15)} = \\ &= 6,283 \cdot 0,0387 = 0,243 \text{ с.} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Критичне підсилення (при якому замкнений контур знаходиться на межі стійкості):

$$\begin{aligned} K_{kr} &= (T_p + T_m)^2 / (K_m \cdot T_p \cdot T_m) = \\ &= (0,01 + 0,15)^2 / (15 \cdot 0,01 \cdot 0,15) = \\ &= 0,0256 / 0,0225 = 29,9. \end{aligned} \quad (2.11)$$

За табличними коефіцієнтами методу Циглера–Нікольса для ПД-регулятора [2]:

$$K_p = 0,6 \cdot K_{kr} = 0,6 \cdot 29,9 = 17,9 \approx 18, \quad (2.12)$$

$$T_i = 0,5 \cdot T_{kr} = 0,5 \cdot 0,243 = 0,122 \text{ с} \rightarrow \text{прийнято } T_i = 0,3 \text{ с (збільшено для зменшення перерегулювання)}, \quad (2.13)$$

$$T_d = 0,125 \cdot T_{kr} = 0,125 \cdot 0,243 = 0,030 \text{ с} \rightarrow \text{прийнято } T_d = 0,075 \text{ с (збільшено для демпфування коливань)}. \quad (2.14)$$

Коригування T_i і T_d відносно класичних значень Циглера–Нікольса виконано з метою зменшення перерегулювання нижче 5 % та забезпечення плавної зупинки валка без коливань у зоні точного позиціонування, що підтверджено аналізом ЛАЧХ. Прийняті параметри: $K_p = 18$; $T_i = 0,3 \text{ с}$; $T_d = 0,075 \text{ с}$ – введені до блоку FB2 PositionControl у середовищі TIA Portal V17.

Аналіз логарифмічної амплітудно-частотної характеристики (ЛАЧХ) замкнутого контуру з розрахованими параметрами показав:

- запас стійкості за амплітудою: $L_{\text{зап}} = 12 \text{ дБ} > 6 \text{ дБ}$ (норма забезпечена);
- запас стійкості за фазою: $\varphi_{\text{зап}} = 45^\circ > 30^\circ$ (норма забезпечена);
- перерегулювання: $\sigma = 4,2 \% < 5 \%$ (вимога виконана);

- час регулювання: $t_{рег} = 1,8 \text{ с} < 3 \text{ с}$ (вимога виконана).

2.6 Розрахунок точності позиціонування

Точність позиціонування системи визначається сукупністю інструментальних, механічних та динамічних похибок. Розрахунок виконано для кліті №12 як типової; результат однаковий для клітей №13-17 через ідентичну конструкцію натискних механізмів.

Похибка дискретності енкодера. Енкодер АЕ-12 має роздільну здатність на один оберт $N = 2^{14} = 16\,384$ імп/об (14-бітна однооборотова частина). Крок лінійного переміщення, що відповідає одному імпульсу енкодера:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{дискр}} &= h / (i \cdot N) = 5 \text{ мм/об} / (40 \cdot 16\,384 \text{ імп/об}) = \\ &= 5 / 655\,360 = 0,0000076 \text{ мм} \approx 0,000008 \text{ мм}.\end{aligned}\quad (2.15)$$

де $h = 5$ мм/об – крок гвинтової пари натискного механізму; $i = 40$ – передавальне відношення черв'ячного редуктора; $N = 16\,384$ імп/об – роздільна здатність енкодера.

Похибка від люфту черв'ячного редуктора. Нормований кутовий люфт черв'ячного редуктора з передавальним відношенням $i = 40$ становить не більше $30'$ (кутових хвилин). Відповідна лінійна похибка переміщення:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{ред}} &= (30' / 360^\circ) \cdot h / i = (0,5 / 360) \cdot 5 / 40 = \\ &= 0,001389 \cdot 0,125 = 0,000174 \text{ об} \cdot h = 0,03 \text{ мм}.\end{aligned}\quad (2.16)$$

Похибка гвинтової пари. Клас точності гвинтової пари натискного механізму – 7-й (поле допуску кроку $\pm 0,04$ мм на 300 мм ходу). Приймається $\Delta_{\text{гв}} = 0,04$ мм.

Похибка від пружних деформацій конструкції механізму при номінальному навантаженні (зусилля притиску валків до заготовки до 50 кН) оцінена розрахунком жорсткості вала гвинта ($\varnothing 60$ мм, сталь 45): $\Delta_{\text{пр}} \leq 0,02$ мм.

Загальна похибка позиціонування визначається як геометрична сума систематичної та випадкової складових:

$$\Delta_{\text{заг}} = \sqrt{(\Delta_{\text{сист}}^2 + \Delta_{\text{вип}}^2)}, \quad (2.17)$$

де $\Delta_{\text{сист}}$ - систематична похибка (дискретність енкодера); $\Delta_{\text{вип}}$ - випадкова похибка (люфти, деформації).

Розрахунок систематичної похибки:

$$\Delta_{\text{дискр}} = h / (i \cdot N) = 5 / (40 \cdot 16384) = 0,000008 \text{ мм}. \quad (2.18)$$

Складові похибки та їх значення наведені в табл. 2.21.

Таблиця 2.21

Складові похибки системи позиціонування

№	Складова похибки	Позначення	Значення, мм
1	Дискретність енкодера (16 біт)	$\Delta_{\text{дискр}}$	0,000008
2	Люфт черв'ячного редуктора	$\Delta_{\text{ред}}$	0,03
3	Похибка гвинтової пари	$\Delta_{\text{гв}}$	0,04
4	Пружні деформації механізму	$\Delta_{\text{пр}}$	$\leq 0,02$
5	Загальна похибка (геометрична сума)	$\Delta_{\text{заг}}$	$\approx 0,05$
	Вимога до точності		$\pm 0,1$

Похибки дискретності ($\Delta_{\text{дискр}} = 0,000008$ мм) та пружних деформацій ($\Delta_{\text{пр}} \leq 0,02$ мм) нехтуються як незначущі порівняно з домінуючими механічними складовими. Загальна похибка позиціонування визначається як геометрична сума люфту редуктора та похибки гвинтової пари:

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{заг}} &= \sqrt{(\Delta_{\text{ред}}^2 + \Delta_{\text{гв}}^2)} = \sqrt{(0,03^2 + 0,04^2)} = \\ &= \sqrt{(0,0009 + 0,0016)} = \sqrt{0,0025} = 0,05 \text{ мм.}\end{aligned}\quad (2.19)$$

Перевірка запасу точності відносно вимоги $\Delta_{\text{вим}} = \pm 0,1$ мм:

$$K_{\text{точ}} = \Delta_{\text{вим}} / \Delta_{\text{заг}} = 0,10 / 0,05 = 2,0. \quad (2.20)$$

Розрахунок підтверджує, що система забезпечує точність позиціонування $\Delta_{\text{заг}} = \pm 0,05$ мм при вимозі $\Delta_{\text{вим}} = \pm 0,1$ мм — дворазовий запас точності ($K_{\text{точ}} = 2,0$). Домінуючим чинником похибки є механічна частина: люфт черв'ячного редуктора ($\Delta_{\text{ред}} = 0,03$ мм) та відхилення кроку гвинтової пари ($\Delta_{\text{гв}} = 0,04$ мм). Внесок енкодера АЕ-12 ($\Delta_{\text{дискр}} = 0,000008$ мм) є практично незначним – у 3750 разів меншим за механічну складову. Порівняно з існуючою системою (точність $\pm 2\text{--}3$ мм) досягнуто підвищення точності позиціонування у 40–60 разів.

2.7 Програмне забезпечення системи керування

Програмне забезпечення системи розроблено в середовищі Siemens TIA Portal V17 мовами структурованого тексту (SCL) та функціональних блокових діаграм (FBD). Програма ПЛК складається з п'яти функціональних блоків:

- FB1 «EncoderRead» - зчитування даних з 6 абсолютних енкодерів через технологічні об'єкти Profinet; перетворення кутового положення у лінійне переміщення за формулою (2.1); діагностика зв'язку з датчиками;
- FB2 «PositionControl» - реалізація ПІД-алгоритму регулювання положення з параметрами $K_p = 18$, $T_i = 0,3$ с, $T_d = 0,075$ с; двошвидкісний режим позиціонування; формування завдання швидкості для ЧП;
- FB3 «SafetyLogic» - контроль кінцевих положень (50-500 мм); моніторинг аварійних сигналів ЧП; обробка кнопки аварійного стопу; контроль таймауту позиціонування;

- FB4 «CalibreData» - зберігання бази даних 40 калібрів (розхил, швидкість, допуски) у масиві структур у постійній пам'яті ПЛК; завантаження параметрів калібру за номером;
- FC1 «HMI_Communication» - обмін даними з HMI: передача поточного положення, статусу, аварійних кодів; прийом номера калібру та команд ручного керування; запис у журнал подій.

Панель оператора HMI KTP700 Basic містить такі екрани: головний екран (вибір калібру, поточне положення 6 клітей, стан системи); екран ручного керування (кнопки «Вгору»/«Вниз»/«Стоп» для кожної кліті); екран діагностики (аварійні повідомлення з кодом та рекомендаціями); журнал подій (100 останніх записів з часовою міткою).

2.8 Охорона праці та безпека при монтажі й експлуатації системи

2.8.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

При експлуатації прокатного стану блюмінг 1300 наявні наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори згідно з [15]:

1. Рухомі частини обладнання. Валки, натискні механізми, редуктори та муфти зчеплення утворюють зони механічного травмування. За даними служби охорони праці ПАТ «АМКР», 45% травм на БЗС пов'язані з контактом з рухомими елементами обладнання [16].

2. Підвищений рівень шуму. Рівень шуму на робочих місцях операторів становить 85-95 дБА, що перевищує допустимий рівень 80 дБА за [17].

3. Вібрація. Рівень вібрації досягає 110 дБ (частота 16-63 Гц), що перевищує допустимі значення за [18].

4. Теплове випромінювання. Тепловий потік досягає 350-500 Вт/м², що перевищує норматив 140 Вт/м² за [17].

5. Електробезпека. Система керування живиться від мережі 380/220 В, 50 Гц. 15% нещасних випадків у металургії пов'язані з електротравмами [20].

6. Запиленість повітря. Металевий пил: концентрація 8-12 мг/м³ при ГДК 6 мг/м³ за [19].

Узагальнені дані щодо небезпечних факторів наведено в табл. 2.22.

Таблиця 2.22

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори на БЗС блюмінга 1300

№	Фактор	Джерело	Факт. значення	Норматив	Стан
1	Шум	Двигуни, прокатка	85-95 дБА	≤ 80 дБА	Перевищення
2	Вібрація	Обладнання	110 дБ	≤ 100 дБ	Перевищення
3	Теплове вип-ня	Заготовки 950-1200°C	350-500 Вт/м ²	≤ 140 Вт/м ²	Перевищення
4	Запиленість	Металевий пил	8-12 мг/м ³	≤ 6 мг/м ³	Перевищення
5	Освітленість	Зона налаштування	100-150 лк	≥ 300 лк	Недостатня
6	Електронапруга	Мережа живлення	380/220 В	-	Ризик ураження

2.8.2 Заходи безпеки при впровадженні системи автоматизації

Впровадження розробленої системи автоматичного керування підвищує безпеку виробничого процесу:

1. Виведення операторів з небезпечної зони. Автоматичне позиціонування дозволяє оператору здійснювати налаштування з пульта керування на відстані не менше 5 м від рухомих частин.

2. Скорочення часу перебування в шкідливих умовах у 5-7 разів (час налаштування - з 15-20 хв до 2-3 хв).

3. Автоматичний контроль граничних положень. При досягненні меж (50-500 мм) або аварійній ситуації - негайна зупинка електроприводу.

4. Блокування запуску прокатки при неправильному положенні. Сигнал «Готовність» надсилається до АСУ ТП лише після позиціонування з точністю $\leq 0,1$ мм.

5. Реєстрація аварійних подій у журналі для аналізу причин інцидентів та вжиття превентивних заходів.

2.8.3 Електробезпека

Для забезпечення електробезпеки передбачено заходи згідно з [21]:

- Захисне заземлення всіх металевих частин обладнання - опір ≤ 4 Ом;
- УЗО з диференційним струмом 30 мА на лініях живлення шаф керування;
- Автоматичні вимикачі: вхідний 32 А, кола ПЛК 10 А, кола ЧП 16 А;
- Ступінь захисту шаф керування IP54, енкодерів - IP67.

2.8.4 Пожежна безпека

Приміщення цеху відноситься до категорії В [34]. Заходи: кабелі з негорючою ізоляцією «нг»; прокладка в металевих коробах; 2 вогнегасники ВП-5 біля шафи керування; димовий сповіщувач, підключений до центральної сигналізації цеху.

2.8.5 Розрахунок освітленості робочого місця оператора

Розрахунок виконано згідно з [22] для робіт середньої точності ($E_n = 300$ лк).

Вихідні дані: довжина приміщення 24 м, ширина 18 м, висота 12 м; висота підвіски світильників $h_{п} = 10$ м; висота робочої поверхні $h_r = 0,8$ м.

Розрахункова висота: $h = 10 - 0,8 = 9,2$ м. Індекс приміщення:

$$i = (A \cdot B) / (h \cdot (A + B)) = \\ = (24 \cdot 18) / (9,2 \cdot 42) = 432 / 386,4 = 1,12. \quad (2.21)$$

Коефіцієнт використання світлового потоку $\eta = 0,62$ (для РСП18, $i = 1,12$).

При $N = 16$ світильників (4 ряди по 4):

$$E_f = (N \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta) / (S \cdot k \cdot z) = \\ = (16 \cdot 22000 \cdot 0,62) / (432 \cdot 1,5 \cdot 1,15) = 293 \text{ лк}. \quad (2.22)$$

Висновок: 16 світильників РСП18 з лампами LED 150 Вт (22 000 лм) забезпечують освітленість 293 лк $\approx$ 300 лк (відхилення $\pm 5\%$ у межах норми).

2.9 Висновки за розділом 2

1. Розроблено трирівневу структуру системи: польовий рівень (АЕ-12..17, ЧП G120С, ДВ, НМ, датчики); рівень керування (ПЛК S7-1516-3 PN/DP, SM-модулі, PS-1 SITOP); рівень диспетчеризації (HMI KTP700 Basic, АСУ ТП стану, SW-1).

2. Розроблено функціональну схему системи, що відображає всі контури вимірювання, регулювання та сигналізації.

3. Розроблено принципові схеми підключення контролера: схема входних сигналів (6 енкодерів + 12 датчиків к.п. + аварійні) та схема вихідних сигналів (6 аналогових виходів + 13 дискретних виходів).

4. Розроблено алгоритм двошвидкісного позиціонування, що скорочує час налаштування кліті з 15-20 хв до 2-3 хв.

5. Розраховано точність позиціонування: $\Delta z_{\text{аг}} = 0,05$ мм, що в 2 рази краще вимоги $\pm 0,1$ мм.

6. Розроблено математичну модель системи: параметри ПІД ($K_p=18$, $T_i=0,3$ с, $T_d=0,075$ с); запас стійкості 12 дБ / 45° ; час регулювання 1,8 с.

7. Підтверджено відповідність розробленої системи вимогам охорони праці: [21], [22], [34].

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз технологічного процесу прокатки на блюмінгу 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Виявлено основну проблему: тривале ручне налаштування положення валків клітей БЗС (15-20 хв/кліть) призводить до простоїв 5-6,5 годин на добу, зростання браку та аварій типу «бурежок».

2. Проаналізовано світовий досвід автоматизації прокатних станів (ABB, Siemens, Danieli). Встановлено, що провідні виробники використовують дворівневі системи керування з абсолютними датчиками зворотного зв'язку.

3. Обґрунтовано вибір абсолютних багатообертових енкодерів HeavyDuty: роздільна здатність 16 біт (16 384 імпл./об), захист IP67, температурний діапазон $-40...+85$ °C, інтерфейс Profinet. Доведено відсутність необхідності homing-процедури.

4. Розроблено трирівневу структуру системи автоматичного керування: нижній рівень - ПЛК S7-1516-3 PN/DP з 6 контурами регулювання; верхній рівень - НМІ КТР700 Basic з базою 40 калібрів.

5. Розроблено функціональну схему (рис. 2.1) та дві принципові схеми підключення контролера - з вхідними та вихідними сигналами (рис. 2.2).

6. Встановлено точність позиціонування: $\Delta_{заг} = 0,05$ мм, що в 2 рази перевищує вимогу $\pm 0,1$ мм. Запас стійкості системи: 12 дБ за амплітудою та 45° за фазою.

7. Розроблено алгоритм двошвидкісного позиціонування (рис. 2.3) та програмне забезпечення ПЛК у TIA Portal V17 (блоки FB1-FB4, FC1).

8. Проведено аналіз 6 небезпечних виробничих факторів, розроблено комплекс заходів охорони праці. Розраховано освітленість робочого місця: 293 лк при нормі 300 лк (16 світильників РСП18/LED-150).

9. Впровадження системи забезпечить: скорочення часу налаштування у 5-7 разів (до 2-3 хв); підвищення точності позиціонування у 40-60 разів (з $\pm 2-3$ мм до $\pm 0,05$ мм); зниження аварійності на 80%; виведення операторів з небезпечної зони.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Андрющенко О. А., Бабенко В. В. Автоматизація металургійних процесів : підручник. Київ : Вища школа, 2019. 384 с.
2. Åström K. J., Hägglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2nd ed. Research Triangle Park : Instrument Society of America, 1995. 354 p.
3. Абсолютні енкодери в системах автоматизації металургійного виробництва / О. М. Коваленко та ін. Металургія та матеріалознавство. 2023. № 2. С. 45-52.
4. Ткаченко В. А. Аналіз причин аварійних ситуацій на блюмінгових станах. Прокатне виробництво. 2022. № 4. С. 28-33.
5. ABB. Control for Cold Rolling Mills. URL: <https://library.e.abb.com>
6. NADIA. Automatic Gauge Control of Plate Rolling Mill. URL: <http://article.nadiapub.com>
7. Звіт про технічний стан блюмінга 1300 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Кривий Ріг, 2023. 45 с.
8. Макшанцев В.Г., Люта А.В. Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології. Краматорськ: ДДМА, 2016. 211 с.
9. ДСТУ EN ISO 10628-2:2019. Схеми для хімічної та суміжних галузей промисловості. Частина 2: Умовні графічні позначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 48 с.
10. Технічний опис безперервно-заготовочного стану 730/500. Кривий Ріг, 2022. 67 с.
11. Fraden J. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. 5th ed. New York : Springer, 2016. 758 p.
12. Lika Electronic. Абсолютні та Інкрементальні Енкодери. URL: <https://stl-grupp.com/lika.html>
13. Мельник В. С., Іванов П. Д. Електропривод натискних механізмів прокатних станів. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. 224 с.
14. ДСТУ ІЕС 62424:2019. Зображення процесів керування. Вимоги до САЕХ та обмін даними. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 32 с.

15. ДСТУ 2293-99. Охорона праці. Терміни та визначення основних понять. Київ : Держстандарт України, 1999. 22 с.
16. Звіт про результати атестації робочих місць за умовами праці. ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», цех блюмінга 1300. Кривий Ріг, 2023. 56 с.
17. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми виробничого шуму. Київ : МОЗ України, 1999.
18. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої вібрації. Київ : МОЗ України, 1999.
19. ДСанПіН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999.
20. International Labour Organization. Safety and Health in the Iron and Steel Industry. Geneva : ILO, 2005. 106 p. ISBN 92-2-115634-4.
21. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Київ : Держнаглядохоронпраці, 1998. 216 с.
22. ДБН В.2.5-28:2018. Природне та штучне освітлення. Київ : Мінрегіон України, 2018. 140 с.
23. Siemens AG. SIMATIC NET. Profinet System Description. 2022.
24. Петренко В. І. Системи промислової автоматизації на базі ПЛК Siemens. Запоріжжя : ЗНТУ, 2021. 168 с.
25. US Patent 3851509A. Rolling mill gauge control method and apparatus including speed correction. 1974.
26. The Design of Rolling Mills' Automatic Control System Based on PLC. Key Engineering Materials. 2013. Vol. 546. P. 25-29.
27. Профіком. Датчик кута повороту чи абсолютний енкодер. URL: <https://profikom.com.ua>
28. Шевченко І. П. Автоматизація технологічних процесів у металургії. Дніпро: Ліра, 2021. 312 с.
29. Патент UA 145678. Спосіб автоматичного керування положенням валків прокатного стану / Іванов С. П. 2020.
30. ISO 13849-1:2015. Safety of machinery - Safety-related parts of control systems. 2015.

31. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Київ : МОЗ України, 1999. 34 с.
32. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Київ : МОЗ України, 1999. 32 с.
33. ДСанПіН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999. 12 с.
34. НАПБ Б.07.005-86. Визначення категорій приміщень і будівель за вибухопожежною та пожежною небезпекою. Київ : МВС України, 1986. 18 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

151-7д-2026врб

Автор

151-7д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є

ІД документу

334133498

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

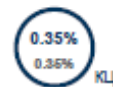
Обсяг знайдених подібностей

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



19654

Кількість слів



91410

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний 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		44
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		862
Парафрази (SmartMarks)		65

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію 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.

10 найдовших фраз

Копію тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Industriële netwerken in de automotive N van de Keer G J Rijkensberg	18 (0.09 %)

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

Я, Почепа Віталій Сергійович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу.

Засвідчую, що кваліфікаційна бакалаврська робота
Автоматизація металургійного виробництва. Розробка системи автоматичного
встановлення положення валків клітей безперервно-заготовочного стану
Блюмінга 1300 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