

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'ютерні технології та робототехніка»
Форма навчання Денна

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Науменка Дениса Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему: Автоматизація металургійного виробництва. Розробка автоматизованої системи регулювання натягу металу в процесі прокатки на безперервно заготівельному стані в умовах Блюмінгу ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

(повна назва теми)

за матеріалами з Блюмінгу ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник доцент, д.філ. Соломенко А.Г.
(наук. ступінь, вчене звання) (підпис) (прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від 15.01. 2026 р. № 6

Завідувач кафедри

(підпис)

доцент, к.п.н.

Наук. ступень, вчене звання

Є.О. Модло

Ініціали, прізвище

Кривий Ріг – 2026

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

Освітньо-кваліфікаційний рівень _____ магістр _____

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерні технології та робототехніка»

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

«_____» _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я

НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Науменко Денису Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи Автоматизація металургійного виробництва. Розробка автоматизованої системи регулювання натягу металу в процесі прокатки на безперервно заготівельному стані в умовах Блюмінгу ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг"

керівник випускної роботи Соломенко Анастасія Геннадіївна, доцент, д.філ.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «20» жовтня 2025 року
№ 727-ст

2. Строк подання студентом випускної кваліфікаційної роботи 12.01.2026

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи: Об'єкт автоматизації – шестиклітьовий безперервно-заготовельний стан 500 цеху Блюмінг ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Технічні параметри: діаметр валків 480–550 мм, швидкість обертання валків 59-300 об/хв, потужність приводів 1110-1840 кВт, максимальна швидкість виходу металу – 6,5 м/с. Вимоги: забезпечити автоматичне визначення міжклітьового натягу, корекцію швидкості електроприводів, режим вільної прокатки, зниження простоїв та браку.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити 4.1. Аналітична частина: загальна характеристика блюмінгового стану, компонування обладнання стану 730/500, функціональне призначення механізмів, вимоги до технології прокатки в чистовій групі. 4.2. Основна частина: аналіз існуючих методів регулювання натягу, обґрунтування вибору методу вимірювання часу прокатки, розробка функціональної структури системи, вибір технічних засобів, розрахунок погрішностей, розробка алгоритму, техніко-економічне обґрунтування, заходи з охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
ВРМ.174.727-ст.08.E7 – Схема розташування устаткування БЗС 730/500;
ВРМ.174.727-ст.08.E0.1 – Графіки струму при спільній прокатці з натягом;

ВРМ.174.727-ст.08.Е0.2 – Графіки струму при спільній прокатці з підпором;
ВРМ.174.727-ст.08.Е0.2 – Графіки струму при вільній спільній прокатці;
ВРМ.174.727-ст.08.Е0.3 – Спосіб виміру натягу за часом прокатки; ВРМ.174.727-
ст.08.Е2 – Функціональна схема автоматичної системи регулювання натягу
металу; ВРМ.174.727-ст.08.Е0.4 – Алгоритм роботи контролера; ВРМ.174.727-
ст.08.ТЕП – Техніко-економічні показники

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Аналітична частина	Соломенко А.Г.	20.10.2025	20.10.2025
Основна частина	Соломенко А.Г.	20.10.2025	20.10.2025

7. Дата видачі завдання 20.10.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної роботи	Строк виконання етапів випускної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	28.11.2025	
2.	Основна частина	25.12.2025	
3.	Оформлення пояснювальної записки	29.12.2025	
4.	Виконання графічної частини	05.01.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	12.01.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	21.01.2026	

Студент

(підпис)

Науменко Д.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник випускної кваліфікаційної роботи

(підпис)

Соломенко А.Г.

(прізвище та ініціали)

№ ряд ка	Фор мат	Позначення	Назва	Кіл. листів	№ екз.	Прим .				
1	A3	BPM.174.727-см.08.E7	Схема розташування	1						
2			устаткування БЗС 730/500							
3	A3	BPM.174.727-см.08.E0.1	Графіки струму при	1						
4			спільній прокатці з							
5			натягом							
6	A3	BPM.174.727-см.08.E0.2	Графіки струму при	1						
7			спільній прокатці з							
8			підпором							
9	A3	BPM.174.727-см.08.E0.2	Графіки струму при вільній	1						
10			спільній прокатці							
11	A3	BPM.174.727-см.08.E0.3	Спосіб виміру натягу за							
12			часом прокатки	1						
13	A3	BPM.174.727-см.08.E2	Функціональна схема							
14			автоматичної системи	1						
15			регулювання натягу металу							
16	A3	BPM.174.727-см.08.E0.4	Алгоритм роботи	1						
17			контролера							
18	A3	BPM.174.727-см.08.ТЕП	Техніко-економічні	1						
19			показники							
20	A4	BPM.174.727-см.08.ПЗ	Пояснювальна записка	97						
21										
22										
23										
24										
				BPM.141.727-см.08.ВР						
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата	Автоматизація металургійного виробництва. Розробка автоматизованої системи регулювання натягу металу в процесі прокатки на безперервно заготівельному стані в умовах Блюмінгу ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" Відомість роботи		Літера	Аркуш	Аркушів	
Розроб.		Науменко Д. В.							4	1
Пров.		Соломенко А.Г.								
Н.контр.		Соломенко А.Г.					ННТІ ДУЕТ Каф.ЕІА гр. АВ-24м			
Затв.		Модло Є.О.								

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускної кваліфікаційної роботи магістра: 97 с., 13 рис., 22 табл., 49 джерел.

Об'єкт дослідження — безперервний заготовочний стан у цеху «Блюмінг» ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Мета роботи – розробка автоматизованої системи регулювання натягнення металу в валках шестиклітьового прокатного стану 500.

Методи дослідження – аналіз існуючих методів визначення натягу металу, моделювання технологічного процесу, застосування сучасного мікропроцесорного обладнання та розробка алгоритму керування.

У роботі проаналізовано особливості технологічного процесу прокатки на стані 500, виявлено ключові недоліки ручного режиму регулювання (висока залежність від кваліфікації операторів, часті аварії, брак через перекручений профіль). Запропоновано та розроблено функціональну схему автоматизованої системи, що базується на вимірюванні часу проходження металу через кліті та корекції швидкостей електроприводів у реальному часі.

Результати реалізації: запровадження системи дозволить забезпечити режим вільної прокатки, зменшити кількість браку, підвищити якість заготовок, оптимізувати розкрій металу та скоротити простої обладнання. Очікуваний термін окупності – 0,66 року.

Ключові слова: алгоритм, автоматизація, вільна прокатка, безперервний прокатний стан, мікропроцесор, натягненість, швидкість прокатки.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	10
1.1 Загальна характеристика блюмінгового стану	10
1.3 Функціональне призначення механізмів	19
1.4 Основні вимоги до технології при прокатці в чистовій групі стану 500	21
2 ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	23
2.1 Аналіз існуючих методів і засобів регулювання натягу металу	23
2.1.1 Метод багатоетапного регулювання моментів приводів	27
2.1.2 Метод регулювання з використанням пропорційно-інтегральної корекції	29
2.1.3 Метод безпосереднього вимірювання зусилля натягу	30
2.1.4 Метод регулювання на основі контролю потужності приводів.....	31
2.1.5 Метод контролю на основі часу прокатки.....	33
2.1.6 Порівняльний аналіз методів та обґрунтування вибору	36
2.1.7 Теоретичні основи процесу прокатки	37
2.2 Розробка автоматизованої системи регулювання натягу металу у валках шестиклітьового прокатного стану 500	40
2.2.1 Функціональна організація автоматизованої системи керування.....	44
2.3 Вибір технічних засобів.....	51
2.4 Розрахунок погрешностей і періоду знімання інформації	64
2.5 Розробка алгоритму регулювання натягу металу	67
2.6 Економічне обґрунтування рішення	69
2.6.1 Суть проектних рішень та чинники економічної ефективності.....	69
2.6.2 Обґрунтування економії часу простоїв.....	69

2.6.3 Техніко-економічні показники базового варіанту	70
2.6.4 Розрахунок капіталовкладень	70
2.6.5 Структура основних фондів та розрахунок амортизації	71
2.6.6 Розрахунок експлуатаційних витрат	72
2.6.7 Розрахунок економічного ефекту	73
2.6.8 Розрахунок терміну окупності	73
2.6.9 Загальні зміни статей витрат	74
2.6.10 Техніко-економічні показники впроваджуваної системи	75
2.7 Заходи з охорони праці	76
2.7.1 Загальні положення та специфіка умов праці на робочому місці оператора	76
2.7.2 Ідентифікація та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів	78
2.7.3 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці	80
2.7.4 Засоби індивідуального та колективного захисту	83
2.7.5 Організація медичних оглядів та профілактичних заходів	84
2.7.6 Пожежна безпека	85
ВИСНОВКИ	90
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	94

ВСТУП

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є найбільшим металургійним підприємством України, що має повний виробничий цикл – від видобутку залізної руди до випуску готового прокату. Щорічно комбінат виробляє понад 6 млн тонн прокату, 86 % якого експортується до країн далекої зарубіжності. Одним із ключових підрозділів підприємства є прокатний переділ, до складу якого входять цехи блюмінг, сортопрокатні стан №1–3 та вальцетокарний цех.

Особливу увагу в технологічному ланцюзі займає безперервний заготовочний стан 730/500, призначений для перекату блюмів у заготовки меншого перетину, які подальше використовуються на дрібносортних і дротових станах. Стан 500, що складається з шести горизонтальних клітей із індивідуальними приводами, наразі експлуатується в ручному режимі регулювання швидкостей валків. Це призводить до значної залежності якості продукції від досвіду операторів, частих аварійних ситуацій, появи браку (перекручені профілі, немірні довжини) та неоптимального використання обладнання.

Сучасні вимоги до ефективності, надійності та конкурентоспроможності металургійного виробництва вимагають переходу від ручного до автоматизованого керування технологічними процесами. Тому актуальним завданням є розробка інтелектуальної системи, яка б автоматично визначала величину міжклітьового натягу металу та коригувала швидкісні режими прокатки, забезпечуючи стабільний режим вільної прокатки.

Метою даної випускної кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування автоматизованої системи регулювання натягнення металу в шестиклітьовому стані 500, що дозволить:

- автоматично налаштовувати швидкісні режими після кожного запуску стану;
- забезпечити рівномірність профілю по всій довжині розкату;
- зменшити вихід немірного металу та підвищити точність розкрою;

- підвищити надійність експлуатації обладнання та знизити ризики аварій.

Реалізація проекту базується на використанні сучасних мікропроцесорних засобів (серія ADAM-5000 фірми Advantech), датчиків наявності металу на основі ефекту Холла, а також розробленого алгоритму аналізу часу прокатки та корекції завдань на швидкість електроприводів. Запропоноване рішення відповідає сучасним принципам індустрії 4.0 — гнучкості, інтелектуальності та енергоефективності.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Загальна характеристика блюмінгового стану

Блюмінговий стан являє собою потужний агрегат прокатного виробництва, призначений для обробки сталевих злитків значної маси (понад 12 тонн) шляхом їх обтиснення у напівфабрикати – блюми. Окрім основного призначення, даний стан може використовуватися для виготовлення слябової продукції та фасонних профілів (двотаврових балок, швелерних профілів тощо).

У структурі металургійного виробництва блюмінговий стан виконує роль з'єднувальної технологічної ланки між сталеплавильним переділом та цехами випуску готового прокату. Сучасна практика передбачає інтеграцію блюмінгів з безперервними заготовочними агрегатами, що забезпечують підготовку напівфабрикату для подальшої переробки на сортових станах.

На великих металургійних комбінатах широко застосовуються блюмінги з діаметром валків 1150 мм, підприємства середньої потужності оснащуються агрегатами 900-1000 мм. Малогабаритні блюмінгові стани орієнтовані на обробку злитків масою 1-3 тонни, що характерно для виробництва спеціальних легованих сталей.

Конструктивно блюмінговий комплекс включає основне та допоміжне обладнання. До основного відноситься робоча кліть з приводними електродвигунами, допоміжне обладнання представлене підйомно-транспортними механізмами (мостовими кранами), слитковозами, маніпуляторами, рольгангами та ножицями для розрізання заготовок.

Робоча кліть сформована двома литими станинами зі сталі масою 60-105 тонн кожна, змонтованими на масивних фундаментних плитах. Вузол включає прокатні валки з підшипниковими опорами, систему регулювання положення верхнього валка та пристрій заміни валкового комплекту. Габаритна висота робочої кліті сягає 7-9 метрів. Привод валків здійснюється від електродвигунів постійного струму. Прогресивні конструкції передбачають індивідуальний привод кожного валка з передачею крутного моменту через приводні вали та

карданні шпинделі.

Технічна специфікація блюмінга 1300

Даний агрегат розрахований на переробку злитків вагою до 14 тонн з отриманням блюмів квадратного перерізу у діапазоні 240×240 – 400×400 мм. Базовим розміром прийнято переріз 320×320 мм.

Характеристика безперервно-заготовочного стану 730/500

Агрегат призначений для подальшої деформації блюмових розкатів у дрібніші заготовки, що використовуються як вихідний матеріал для дрібносортового та дрогового виробництва комбінату, а також для випуску товарної продукції.

Номенклатура перерізів заготовок:

- базовий асортимент – квадратні профілі 125×125 мм та 80×80 мм;
- спеціальне замовлення – квадрат 150×150 мм;
- бандажна штаба 32×126 мм.

Діапазон мас блюмів для переробки:

- для заготовки 80×80 мм (основний технологічний потік) – до 14 тонн;
- для заготовки 125×125 мм (з транспортуванням на обвідну лінію) – до 14 тонн.

Довжина заготовок після порізки летучими ножицями стану 500 становить 10,5-11,5 метрів.

Граничні значення маси порізаної заготовки:

- переріз 80×80 мм – 580 кг;
- переріз 125×125 мм – 1420 кг;
- переріз 150×150 мм – 2100 кг.

1.2 Компонування технологічного обладнання

Блюмінговий стан представляє собою одноклітьовий реверсивний агрегат гарячої деформації обтискного типу.

На рис. 1.1 представлено технологічне обладнання блюмінга-1300, яке структуровано за функціональними зонами: I – Зона нагрівальних колодязів; II – Прокатне відділення; III – Зона контрольно-вимірювальних приладів; IV – Відділення блюмової продукції; V – Машинне відділення агрегату 1300.

У зоні нагрівальних колодязів розміщено комплекс нагрівальних пристроїв 1, що забезпечують температурну підготовку злитків до процесу деформації. Уздовж фронтальної лінії колодязів переміщуються рейковими коліями транспортні візки 2, які здійснюють доставку розігрітих злитків до приймального рольгангового конвеєра 3. Передача злитка з транспортного візка на приймальний рольганг виконується боковим штовхальним механізмом 4. З приймальної позиції злиток транспортується на вагову систему 5, яка за потреби здійснює орієнтацію злитка у горизонтальній площині на 180° для забезпечення подачі до стану звуженою частиною наперед. Подавальним рольгангом 6 злиток надходить до прокатного відділення II, що межує із зоною нагрівальних колодязів.

У прокатному відділенні встановлено робочу кліть 7, оснащену робочими 8 та розкатними 9 рольганговими системами з обох боків агрегату, маніпуляторними механізмами з кантувальними пристроями 10, системою збирання металевих відходів з-під кліті та обладнанням для заміни валкового комплексу.

Двовалкова реверсивна кліть блюмінга 1300 оснащена робочими валками діаметром 1300 мм з довжиною бочки 2800 мм. Привод валків здійснюється індивідуальними електродвигунами 11 по 6000 кВт із частотою обертання 120 об/хв через карданні шпинделі 12.

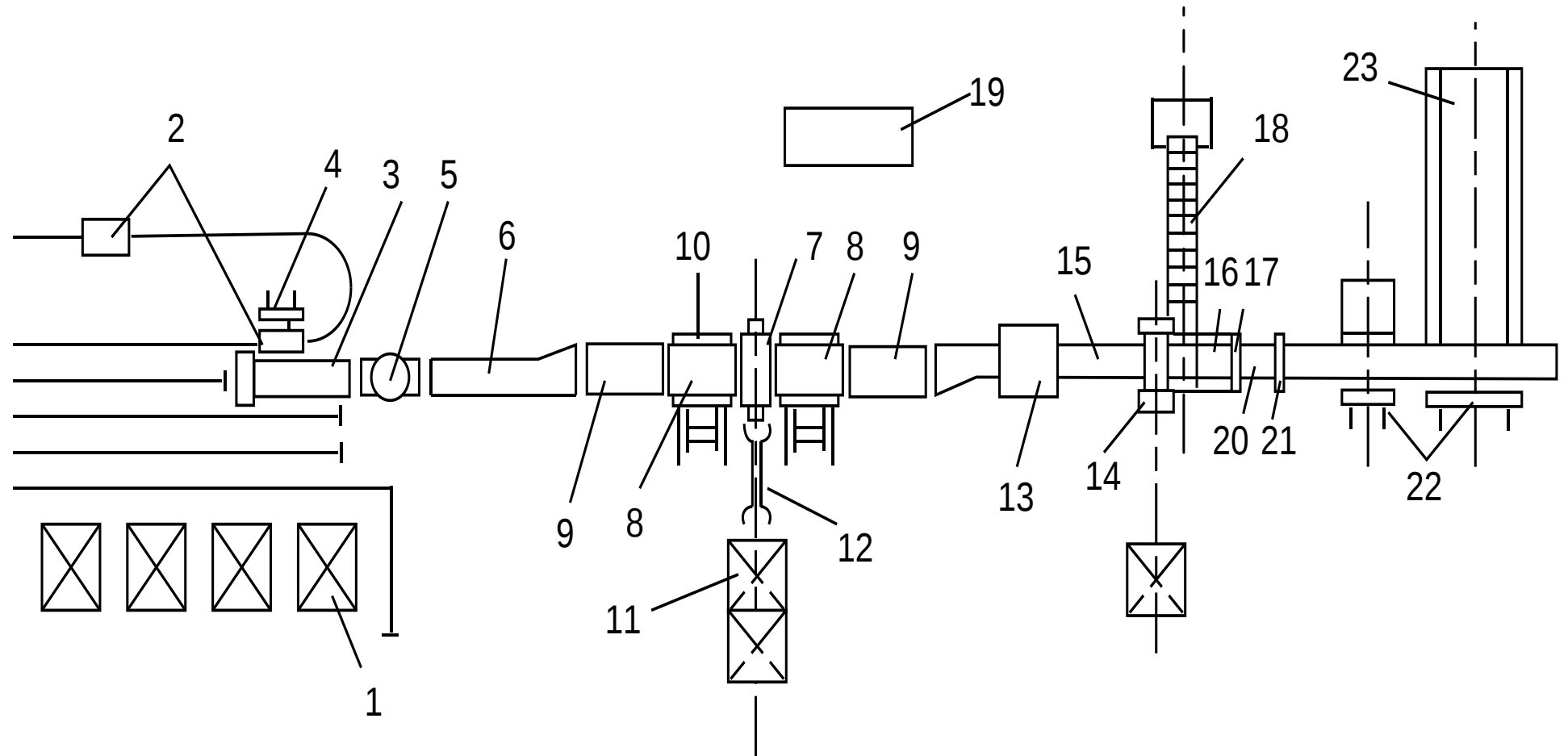


Рис.1.1. Схема розташування встаткування блюмінга-1300 [1]

Натискний механізм забезпечує швидкість переміщення верхнього валка 220 мм/с. За розкатним рольгангом розташована установка вогневого очищення 13, що виконує усунення поверхневих дефектів розкату газокисневими пальниками.

Для відрізання дефектних ділянок розкату використовуються ножиці 14, які обслуговуються рольгангами 15 і 16, механізмом скидання обрізків, рухомим упором 17 та конвеєром 18 для транспортування обрізі до скрапного відділення.

У скрапному відділенні також розміщено відстійник 19 для збирання окалини, що відділяється від злитка та змивається водою з-під робочої кліті й рольгангів. Після ножиць встановлено автоматичну вагову систему 20, маркувальну машину 21, штовхальні механізми 22 та охолоджувальні пристрої для блюмів 23.

На рис. 1.2 показано компонування обладнання безперервно-заготовочного стану 730/500.

Конфігурація включає 14 горизонтальних клітей, організованих у дві безперервні технологічні групи. Перед станом встановлено поворотний пристрій 1, який дозволяє змінити орієнтацію розкату з блюмінга у разі необхідності. Така операція виконується при виявленні у передній частині розкату ознак усадочної пористості, яка при подальшій деформації на БЗС може спричинити розшарування металу та розкриття переднього кінця, що призведе до аварійної ситуації. Також можлива деформація переднього кінця блюма після обрізки на ножицях, що ускладнить захоплення розкату першою кліттю безперервно-заготовочного агрегату. Розворот розкату на 180° у горизонтальній площині забезпечує безпроблемну переробку таких розкатів на БЗС.

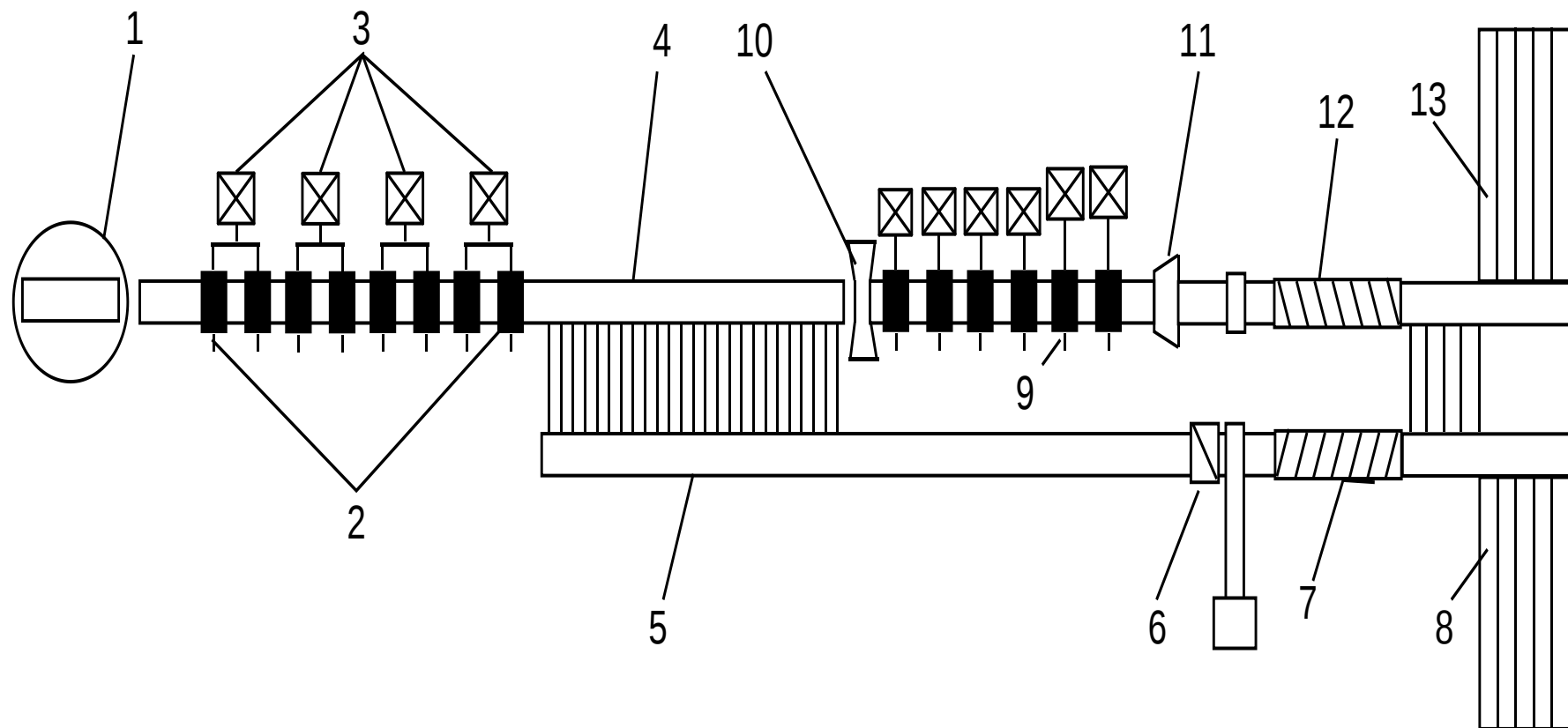


Рис. 1.2. Схема розташування встаткування БЗС 730/500 [1]

Перша безперервна секція 2 містить вісім горизонтальних клітей 730, привод яких здійснюється попарно від чотирьох електродвигунів 3 сумарною потужністю 7840 кВт. З першої секції отримують типову заготовку 125×125 мм та 150×150 мм, яка з проміжного рольганга 4 транспортується шлеперами на відвідний рольганг 5 та розрізається на мірні довжини ножицями 6.

Заготовка формується у пакети на рольгангу з косокутовим розташуванням роликів 7 і передається на охолоджувальний пристрій 8. У другій безперервній секції клітей 500 (9) з заготовки 125×125 мм виробляють заготовки перерізом 80×80 мм.

Перед групою БЗС 500 встановлено маятникові ножиці 10 для обрізки переднього кінця або аварійного різання розкату.

Швидкість виходу заготовки з фінішної кліті досягає 6-6,5 м/с. Летучі ножиці 11, керовані системою розкрою, здійснюють поділ розкату на заготовки заданої довжини, які формуються у пакет на рольгангу 12 та передаються на охолоджувальний пристрій 13. Надалі заготовки транспортуються на склад готової продукції для відвантаження споживачам або рольганговими лініями направляються у методичні печі дрібносортових та дротових станів.

У табл. 1.1 представлені потужності й типи приводів основних механізмів цеху Блюмінг.

Таблиця 1.1

Потужності й типи приводів (основні механізми)

Найменування механізму	Тип двигуна	Шт.	Потужність, кВт	Швидкість, об/хв
Злитковіз	ДП-62	2	46	625
Зіштовхувач злитків	ДП-72	2	67	560
Машина вогневого зачищення	ДП-62	1	56	600
Робоча кліть блюмінга	П2	2	6000	36
Маніпулятор	ПС-20	2	610	35
Кантувач	МП-200	1	200	25
Ножиці 1000 т	МП-490	2	360	500-800
Зіштовхувач	МТКВ-42,8	1	16	680
Конвеєр збирання обрізків	МА 146	1	46	735
Поворотний пристрій	МТК 52-8	1	33,5	68
Робочі кліті стану 730 (1,2 кліть)	П2-630	1	1840	125-250
Робочі кліті стану 730 (інші кліті)	2МП2000 - 315	2	2000	125
Маятникові ножиці	П171-5	1	630	500
Робочі кліті стану 500 (12,13,15 кліть)	МП1500-300	3	1100	300/600
Робочі кліті стану 500 (16,17,18 кліть)	4П	3	1840	300/600
Летучі ножиці (РПЛН-150)	2МП 2000-315	1	2x1000	315-800

Продовження табл.1.1

Найменування механізму	Тип двигуна	Шт.	Потужність, кВт	Швидкість, об/хв
Шлеперний пристрій №1	МТВ 72-10	2	100	584
Ножиці 800 т	МП490-500	2	360	-
Зіштовхувач обрізків	МТК22-6	1	7,5	900
Конвеєр збирання обрізків	МТК 42-8	1	16	680
Шлеперний пристрій №1	МТ-72	1	100	584

Робочі кліті стану 500 призначені для одержання заготовок перетином 80х80 мм при прокатці на стані розкату з вихідним перетином 125х125 мм.

Стан 500 складається з: 6 однакових горизонтальних прокатних клітей; привод постійного струму, індивідуальний від електродвигунів потужністю 1110 кВт, 600 об/хв - для 12, 13, 15 клітей й 1840 кВт, 300 об/хв – для 16, 17, 18 клітей.

Таблиця 1.2

Технічна характеристика клітей стану 500

Найменування	Один. вим.	Номер кліті					
		12	13	15	16	17	18
Діаметр бочки:	мм						
-максимальний		540	540	550	530	530	530
-мінімальний		500	480	500	480	480	480
Швидкість обертання:	об/хв.						
-максимальна		118	118	148,6	182	300	300
-мінімальна		59	59	74,3	91	125	125
Маса комплекту	кг	4280	4280	4280	4160	4160	4160

1.3 Функціональне призначення механізмів

Злитковіз – здійснює транспортування розігрітих злитків від нагрівальних колодязів до приймального рольганга стану 1300.

Штовхальний механізм злитків – забезпечує передачу злитків від транспортних візків на приймальний рольганг стану.

Робочі та транспортні рольганги – виконують переміщення злитків і блюмів уздовж технологічної лінії стану.

Робоча кліть блюмінга 1300 – здійснює перетворення сталевих злитків у блюми. Блюмінг має реверсивну одноклітьову конструкцію.

Шпindelне з'єднання, проміжний вал і головні муфти – забезпечують передачу обертового моменту від станових двигунів до валків робочої кліті.

Маніпулятор з кантувачем – являє собою комплекс механізмів для точного спрямування розкату при виході та вході його в калібри робочих валків, переміщення розкату від одного калібру до іншого, виправлення зігнутого розкату.

Кантувач – здійснює обертання розкату або злитка навколо його поздовжньої осі на 90 градусів.

Ножиці зусиллям різання 1000 т – виконують розрізання гарячих розкатів на мірні довжини та очищення задніх кінців розкатів.

Штовхальний механізм обрізків біля ножиць – забезпечує відштовхування заднього відрізаного кінця розкату та проштовхування коротких заготовок під ножиці.

Конвеєр збирання обрізків – здійснює збирання обрізків від ножиць у вагони-візки, встановлені у скрапному прольоті.

Штовхальний механізм блюмів – виконує відштовхування блюмів з рольганга на передавальний пристрій блюмів.

Передавальний пристрій блюмів – забезпечує передачу блюмів у скрапний проліт.

Підіймально-поворотний пристрій – здійснює розворот блюма у

горизонтальній площині на 180 градусів перед подачею у першу кліть стану 730.

Робочі кліті стану 730 – виконують обтиснення блюмових розкатів у вертикальній площині. Стан 730 складається з 8 однакових горизонтальних клітей із груповим приводом на кожні 2 кліті через редуктор і шестеренні кліті.

Маятникові ножиці – призначені для очищення передніх кінців розкату перед їхньою подачею у 1-у кліть стана 500 та для аварійного різання.

Пересувні лінійки – забезпечують подачу розкату перерізом 125×125 мм у 1 кліть стану 500.

Робочі кліті стану 500 – призначені для отримання заготовок перерізом 80×80 мм при прокатці розкату з вихідним перерізом 125×125 мм. Стан 500 складається з 6 однакових горизонтальних клітей з індивідуальними приводами.

Летючі ножиці (РПЛН-150) – виконують гаряче різання готового профілю після прокатки на стані 500.

Летючі ножиці працюють у комплексі з установкою безвідхідного розкрою металу.

Шлепперний пристрій №1 – встановлений між станами 730 і 500 та призначений для передачі заготовок із рольганга між станами на рольганг обвідної лінії.

Правильна машина – виконує виправлення гарячих розкатів перерізом 125×125 мм у потоці стану 730 (між неприводними обертовими роликами).

Ножиці зусиллям різання 800 т – призначені для обрізання переднього та заднього кінців розкату, а також для розрізання їх на мірні довжини.

Штовхальний механізм обрізків – встановлений біля 800 т ножиць та призначений для відштовхування заднього відрізаного кінця смуги у жолоб конвеєра збирання обрізків.

Пересувний упор – встановлений за 800 т ножицями та призначений для зупинки розкату на рольгангу при різанні на мірні довжини.

Конвеєр збирання обрізи – здійснює збирання обрізи з-під 800 т ножиць та завантаження її на платформу.

Шлепперний пристрій №2 – забезпечує передачу пакетів заготовок із

рольгангів обвідної лінії на рольганг основної лінії.

Холодильник – здійснює охолодження заготовок перед відправленням на склад або на приймальні грати дрібносортових та дровових станів.

Опускні упори – забезпечують зупинку заготовок на рольгангах холодильників, рольгангах передавальних шлепперів, пакувальних рольгангах.

1.4 Основні вимоги до технології при прокатці в чистовій групі стану 500

Для зменшення ударного падіння швидкості приводу кліті при захопленні переднього кінця смуги летючі ножиці розрізають смугу по дузі. Це відбувається на швидкості різання й забезпечується слідкуючими роликами з тахогенератором. Відрізання переднього та заднього кінців розкату здійснюється в режимі автоматичного керування. Через неузгодженість швидкостей летючих ножиць і розкату відбувається неправильне обрізання, іноді заклинювання смуги.

У чистовому окалиноломачі між валками та натискними гвинтами передбачені пружини для захисту валків від пошкодження при потраплянні в них разом з розкатом переднього кінця, відрізаного летючими ножицями. Щоб уникнути неправильного потрапляння металу у валки, у проміжках між чистовими клітками розташовуються верхні та нижні провідники, а також напрямні лінійки. Ці механізми запобігають пошкодженню валків і утворенню складок на смузі, а отже й аварійному режиму.

Небажаний ефект при прокатці – зміщення смуги до країв валків клітей. Відбувається затиснення смуги, зупинка всього стану. Щоб запобігти такому ефекту, прокатка повинна проводитися з міжклітьовими натягами. Вони надають стабілізуючу дію на процес безперервної прокатки, допускаючи деякі відхилення у заданих співвідношеннях швидкостей електродвигунів, які приводять робочі валки клітей.

Основною вимогою до технології при безперервній прокатці в чистовій

групі, що визначає статичні та динамічні характеристики електроприводів валків кожної кліти, є вимога забезпечити задані значення міжклітьових натягів як у перехідних, так і в усталених режимах. Це безпосередньо сприяє успішному та безаварійному перебігу технологічного процесу.

Перехідні процеси погіршують підтримку заданих швидкостей. З'являються натяги, що перевищують свої допустимі значення. Тому необхідною складовою частиною електроприводів клітей чистової групи є системи автоматичного регулювання їхньої швидкості. Ці системи забезпечують із високою точністю підтримку швидкостей електродвигунів і їхніх співвідношень, створюють умови для нормального ведення процесу безперервної прокатки.

Тому завданням роботи є розроблення та впровадження системи, що забезпечує автоматичне визначення величини натягу металу й коригування швидкостей обертання валків для забезпечення режимів вільної прокатки.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз існуючих методів і засобів регулювання натягу металу

Спільна прокатка на безперервно-заготовочному стані відбувається з непродуктивними зусиллями підпору або натягу в міжклітьовому проміжку, які негативно впливають на встаткування стану. Ліквідувати ці негативні явища можна узгодженням швидкостей валків клітей за допомогою побудови системи керування головними електроприводами, що формує завдання на швидкість валків з урахуванням поточних умов прокатки. Якщо вдалося погодити швидкості, то спільну прокатку вважають вільною, тобто такою, що відбувається без зусиль міжклітьового підпору або натягу.

Характер протікання процесу прокатки можна визначити за поведінкою струму електродвигунів клітей. При прокатці з натягом у момент часу t_2 , коли метал входить у наступну кліть, спостерігається характерне зниження струму I_1 першої кліті до значення $I_{1.1}$. Це відбувається тому, що частину навантаження бере на себе наступна кліть, яка "витягує" метал з попередньої. Графічно цей процес відображено на рис. 2.1, де чітко видно момент входження металу в другу кліть та відповідне зменшення навантаження на першу.

Протилежна ситуація виникає при прокатці з підпором. У цьому випадку струм поводить інакше - він зростає в момент захоплення металу наступною кліттю, що свідчить про надмірну швидкість попередньої кліті. Метал немов "наштовхується" на наступну пару валків, створюючи додаткове навантаження на обидві кліті. Такий режим показано на рис. 2.2 і є небажаним, оскільки призводить до перевантаження встаткування та можливого виникнення аварійних ситуацій.

Найбільш оптимальним є режим вільної прокатки, коли струми електродвигунів залишаються відносно стабільними при проходженні металу через кліті. Невеликі коливання, звичайно, присутні, але вони не мають різкого характеру і не призводять до значних перевантажень. Саме такий режим, проілюстрований на рис. 2.3, необхідно підтримувати за допомогою

автоматичної системи керування для забезпечення надійної та ефективної роботи стану.

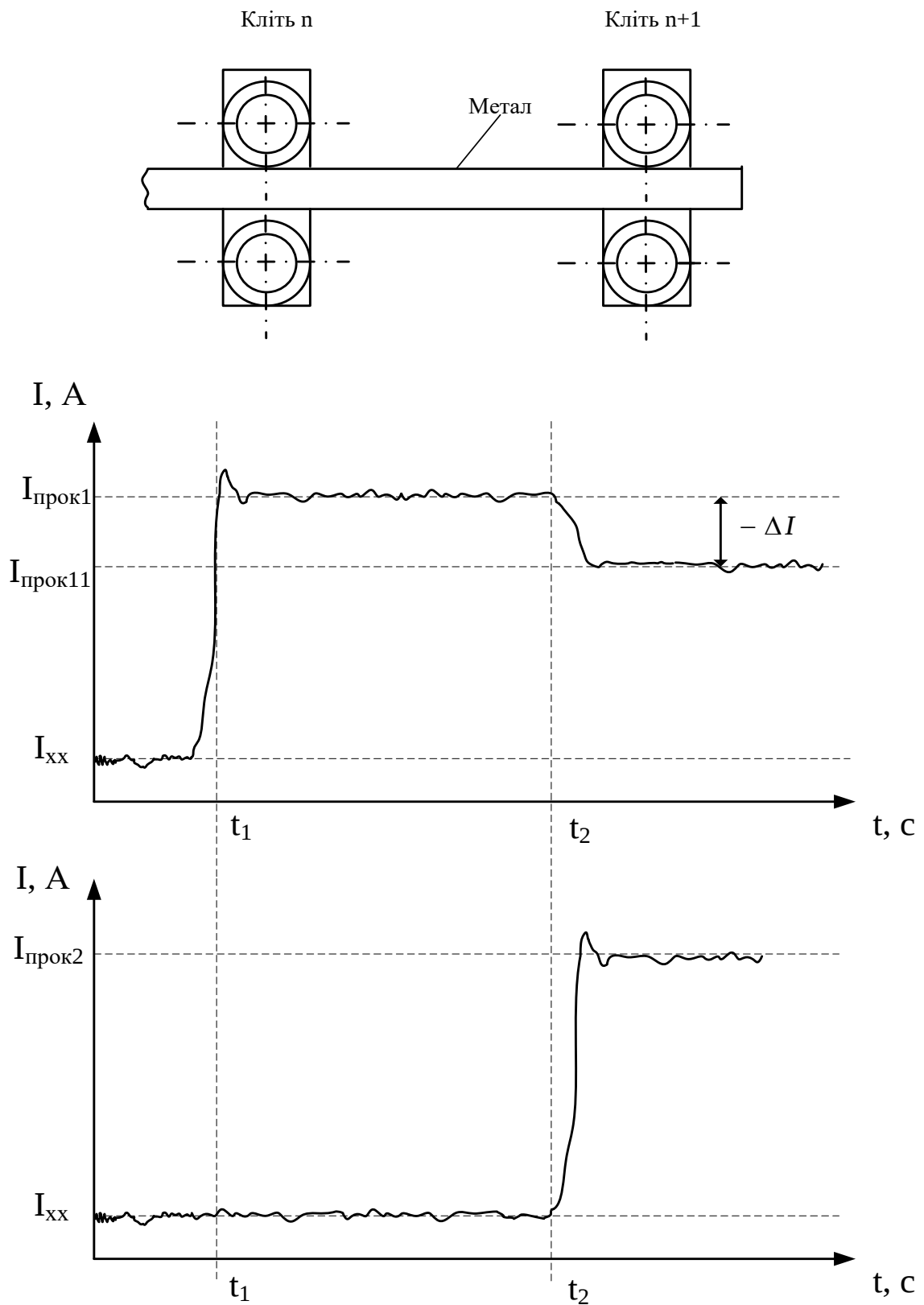


Рис.2.1. Графіки струму при спільній прокатці з натягом
(розроблено автором)

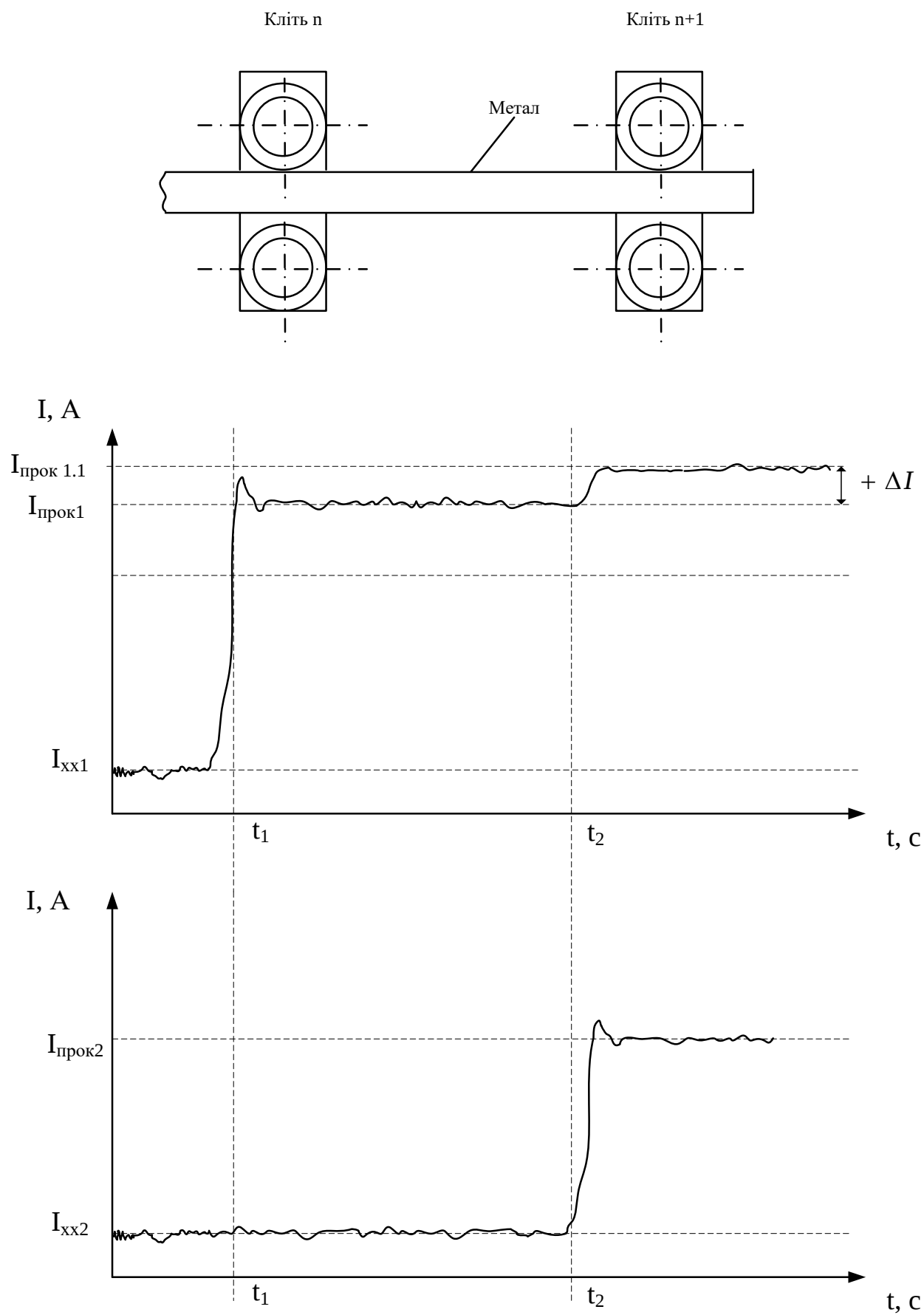
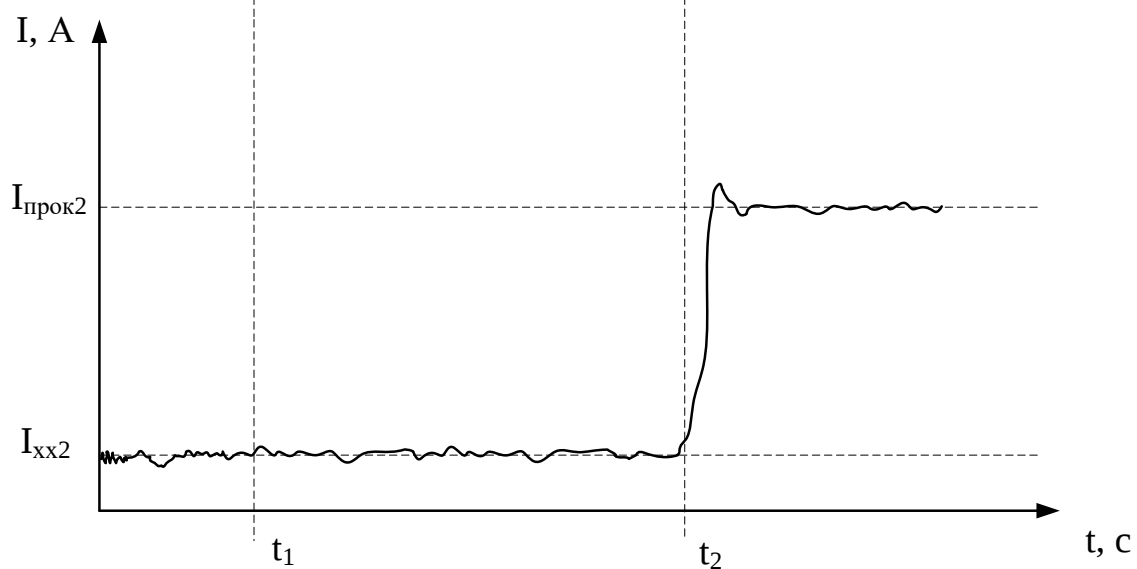
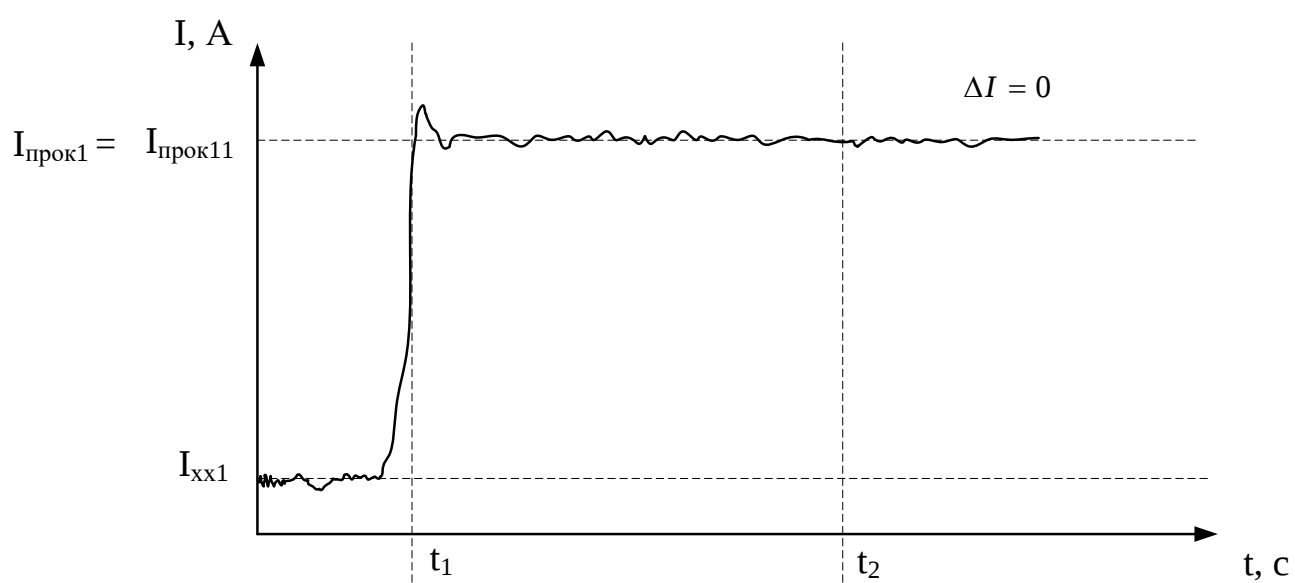
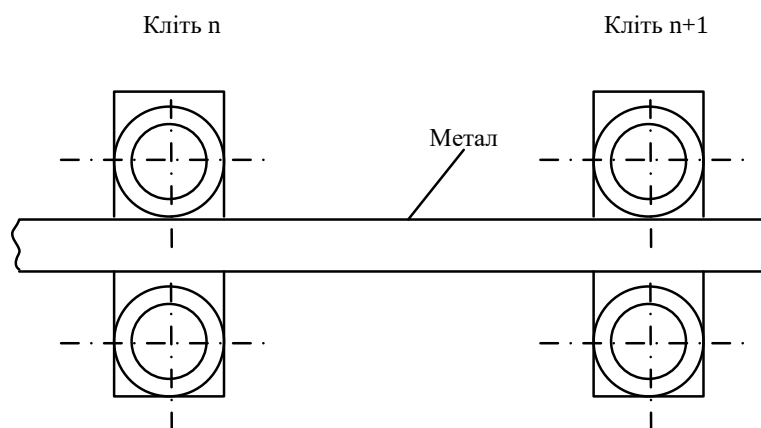


Рис.2.2. Графіки струму при спільній прокатці з підпором



(розроблено автором)

Рис. 2.3. Графіки струму при вільній спільній прокатці (розроблено автором)

Проблема регулювання міжклітьового натягу при безперервній прокатці привертала увагу дослідників протягом багатьох десятиліть. Аналіз патентної літератури та науково-технічних джерел показує наявність декількох принципово різних підходів до вирішення цього завдання [2, 3]. Кожен з цих підходів має свої особливості, переваги та обмеження, які необхідно враховувати при виборі методу для конкретних умов виробництва.

2.1.1 Метод багатоступінчастого регулювання моментів приводів

Одним з найбільш складних, але водночас і цікавих підходів є метод, запропонований Бурьковим В.В. та Юнгером І.Б. у їхньому патенті [4]. Суть методу полягає в послідовному регулюванні моментів приводних двигунів за певним алгоритмом, який розбивається на чотири чітко визначені етапи. Що примітно, автори пропонують працювати не з усіма клітьями одночасно, а групами по три кліті, що дозволяє спростити алгоритм та підвищити його надійність.

На першому етапі, коли розкат тільки входить у першу кліть групи і ще не досяг другої, система запам'ятовує значення моменту статичного навантаження та швидкісний режим приводу першої кліті. Це базове значення, яке буде використовуватися як еталон для подальших порівнянь. По суті, система "запам'ятовує", як працює кліть при роздільній прокатці, коли відсутні міжклітьові взаємодії.

Другий етап починається з моменту входу розкату в другу кліть і триває до його входу в третю. На цьому етапі система аналізує, чи змінився режим роботи першої кліті після того, як метал захопила друга кліть. Якщо виявляється розбіжність з еталонним значенням, формується коригувальний сигнал для зміни швидкості першої кліті. Це дозволяє оперативно відреагувати на виникнення натягу або підпору між першою та другою клітьями.

Найбільш складним є третій етап, який розпочинається з моменту входу металу в третю кліть. Тут система обчислює співвідношення між запам'ятованим моментом першої кліті та поточним моментом третьої кліті. На основі цього співвідношення формується сигнал керування, який визначає необхідну корекцію швидкості. Цікаво, що на цьому етапі регулювання відбувається безперервно, що дозволяє системі швидко адаптуватися до змін умов прокатки.

Нарешті, на четвертому етапі, який починається з виходу розкату з першої кліті, система переходить у режим підтримки. Сформоване на попередньому етапі співвідношення швидкостей зберігається і буде використовуватися при надходженні наступного розкату. Це дозволяє системі "навчатися" на попередньому досвіді і забезпечувати стабільні умови прокатки для однотипних заготовок.

Однак, незважаючи на свою продуманість, цей метод має суттєві недоліки, які обмежують його практичне застосування. По-перше, алгоритм виявляється надто складним для реалізації в умовах реального виробництва. Чотири послідовні етапи з різними алгоритмами обробки вимагають потужного обчислювального обладнання та складного програмного забезпечення. По-друге, ключовою проблемою є необхідність точного визначення моментів переходу між етапами. Будь-яка помилка у визначенні цих моментів може призвести до неправильної роботи всієї системи. По-третє, метод сильно залежить від стабільності статичного навантаження, що в умовах реального виробництва не завжди можливо забезпечити через коливання температури металу, зміну його механічних властивостей та інші фактори. Крім того, система виявляється недостатньо гнучкою при швидких змінах умов прокатки, що особливо важливо при роботі з різноманітним сортаментом. Нарешті, для реалізації методу потрібні високоточні датчики моменту для кожної кліті, що суттєво підвищує вартість системи.

2.1.2 Метод регулювання з використанням пропорційно-інтегральної корекції

Більш традиційним і широко поширеним є підхід, заснований на аналізі струмів електроприводів [5, 6]. Ідея методу досить проста і зрозуміла: оскільки струм електродвигуна прямо пов'язаний з навантаженням на нього, то за зміною струму можна судити про наявність натягу або підпору між клітьми. Система відслідковує різницю між струмом при роздільній прокатці (коли кожна кліть працює окремо) та струмом при спільній прокатці (коли метал знаходиться одночасно в декількох клітьях).

Найпростішим варіантом реалізації цього методу є пропорційна корекція, коли різниця струмів множиться на деякий коефіцієнт підсилення K і подається як коригувальний сигнал на систему керування швидкістю:

$$U_k = K \cdot (I_p - I_c). \quad (2.1)$$

Чим більша різниця струмів, тим більша корекція швидкості. Здавалося б, все просто і логічно. Однак на практиці виявляється, що цей підхід має свої проблеми. Головна з них - невисока точність підтримки заданого струму. Справа в тому, що пропорційний регулятор завжди залишає деяку статичну похибку - щоб він видавав керуючий сигнал, повинна існувати різниця між заданим та фактичним значенням. Крім того, при неправильному виборі коефіцієнта підсилення можуть виникати коливання в системі, коли електропривод то збільшує, то зменшує швидкість, намагаючись знайти оптимальне значення.

Для вирішення цих проблем фахівці запропонували використовувати інтегральну корекцію [7]. Суть її полягає в тому, що коригувальний сигнал формується не просто пропорційно миттєвій різниці струмів, а з урахуванням інтегралу цієї різниці за певний період часу. Математично це можна описати як інтегрування різниці струмів з постійною часу T_i .

В операторному вигляді це можна записати в такий спосіб:

$$(2.2)$$

$$U_k = \frac{1}{T_i \cdot p} \cdot (I_p - I_c)$$

Головна перевага такого підходу - він дозволяє повністю усунути статичну похибку. Навіть при дуже малій різниці струмів інтегратор з часом накопичить достатній керуючий сигнал для її компенсації. Крім того, постійна часу інтегрування дає можливість гнучко налаштовувати темп наростання коригувального сигналу, що особливо важливо для уникнення різких змін швидкості та пов'язаних з ними ударних навантажень на встаткування.

Проте і цей удосконалений метод не позбавлений недоліків. Основна проблема полягає в тому, що застосування інтегральної корекції суттєво підвищує вимоги до керуючого контролера та його програмного забезпечення. Система стає більш складною, потребує ретельного налаштування постійної часу інтегрування, яка залежить від багатьох факторів - швидкості прокатки, типу металу, стану валків тощо. При цьому система виявляється досить чутливою до перешкод у каналах вимірювання струму. Будь-які випадкові сплески або провали струму, викликані, наприклад, перехідними процесами в тиристорних перетворювачах, можуть призвести до неправильної роботи інтегратора та формування помилкових керуючих сигналів.

2.1.3 Метод безпосереднього вимірювання зусилля натягу

На перший погляд, найбільш логічним підходом здається пряме вимірювання того, що ми хочемо контролювати - тобто безпосереднього зусилля натягу металу між клітьми [8]. Для цього використовуються тензометричні датчики, які встановлюються на рольгангах між клітьми і реагують на деформацію роликів під дією натягу металу. Коли метал проходить по рольгангу під натягом, він тисне на ролики з певною силою, яка і вимірюється датчиками. Цей метод дає максимально точну інформацію про фактичний стан процесу прокатки - система "знає" реальне значення натягу в кожному момент часу.

Перевагами такого підходу є висока точність вимірювання та швидка реакція на зміни технологічних параметрів. Система може практично миттєво відреагувати на виникнення небажаного натягу або підпору і відкоригувати швидкості клітей. Це особливо важливо при прокатці відповідального сортаменту, де навіть невеликі відхилення від оптимального режиму можуть призвести до дефектів металу.

Однак реальність виявляється не такою райдужною, як здається в теорії. Головна проблема - висока вартість тензометричного обладнання, яке здатне працювати в важких умовах прокатного виробництва. Крім того, монтаж датчиків на рольгангах між клітями - справа дуже непросте. Потрібно забезпечити надійне кріплення датчиків, їх захист від механічних пошкоджень, високої температури та вібрації. При цьому датчики повинні бути встановлені таким чином, щоб не заважати проходженню металу і не створювати додаткового опору.

Ще однією серйозною проблемою є необхідність частого калібрування датчиків. Через постійний вплив високих температур, вібрації та механічних навантажень характеристики датчиків з часом змінюються, що призводить до зростання похибки вимірювання. Особливо складна ситуація виникає при роботі в умовах інтенсивного окалиноутворення, коли окалина може налипати на ролики рольгангів і датчики, змінюючи умови їх роботи. Все це призводить до того, що надійність роботи тензометричних датчиків в умовах реального прокатного виробництва виявляється недостатньою, а витрати на їх обслуговування та заміну - непропорційно високими.

2.1.4 Метод регулювання на основі контролю потужності приводів

Цікавим компромісом між точністю та простотою реалізації є метод, заснований на аналізі споживаної потужності електроприводів клітей [9]. Логіка тут досить проста: потужність, яку споживає електродвигун кліті, залежить від зусилля деформації металу. Якщо між клітями виникає натяг, то попередня кліть

повинна не тільки деформувати метал, але й долати додатковий опір від натягу, що призводить до зростання споживаної потужності. І навпаки, при підпорі частину роботи з деформації виконує наступна кліть, що зменшує потужність попередньої.

Головна привабливість цього методу полягає в тому, що він не потребує додаткових датчиків - використовуються штатні вимірювачі потужності, які зазвичай присутні в системах керування електроприводами сучасних прокатних станів. Це робить систему дешевою в реалізації і простою в обслуговуванні. При цьому точність методу виявляється достатньою для більшості технологічних завдань - система цілком здатна відрізнити вільну прокатку від прокатки з натягом або підпором і сформувати відповідні коригувальні сигнали.

Однак є й обмеження, які необхідно враховувати. Головне з них - непрямий характер вимірювання натягу. Ми вимірюємо не сам натяг, а його вплив на потужність приводу, що вносить певну невизначеність. Справа в тому, що на споживану потужність впливають не тільки міжклітьові взаємодії, але й багато інших факторів. Наприклад, температура металу суттєво впливає на опір деформації - гарячіший метал деформується легше і потребує менше енергії. Стан валків - їх температура, шорсткість поверхні, ступінь зношування - також впливає на потужність прокатки. Все це створює певний "шум" у вимірюваннях, який ускладнює виділення саме того компонента потужності, який пов'язаний з міжклітьовим натягом. Тому для реалізації цього методу потрібна досить складна математична модель, яка враховує всі ці побічні фактори і дозволяє з прийнятною точністю розрахувати величину натягу.

2.1.5 Метод контролю на основі часу прокатки

Розглянемо тепер метод, який базується на фундаментальному законі прокатки - законі про рівність секундних об'ємів [10]. Цей закон стверджує досить очевидну річ: якщо метал не накопичується і не зникає в процесі прокатки (що, звичайно, має місце в реальності), то об'єм металу, що входить у кліть за одиницю часу, повинен дорівнювати об'єму, що виходить. Математично це записується простою формулою:

$$v_0 \cdot h_0 \cdot b_0 = v_1 \cdot h_1 \cdot b_1, \quad (2.3)$$

де v - швидкість металу, h - його товщина, b - ширина, а індекси 0 і 1 позначають відповідно вхід і вихід з кліті.

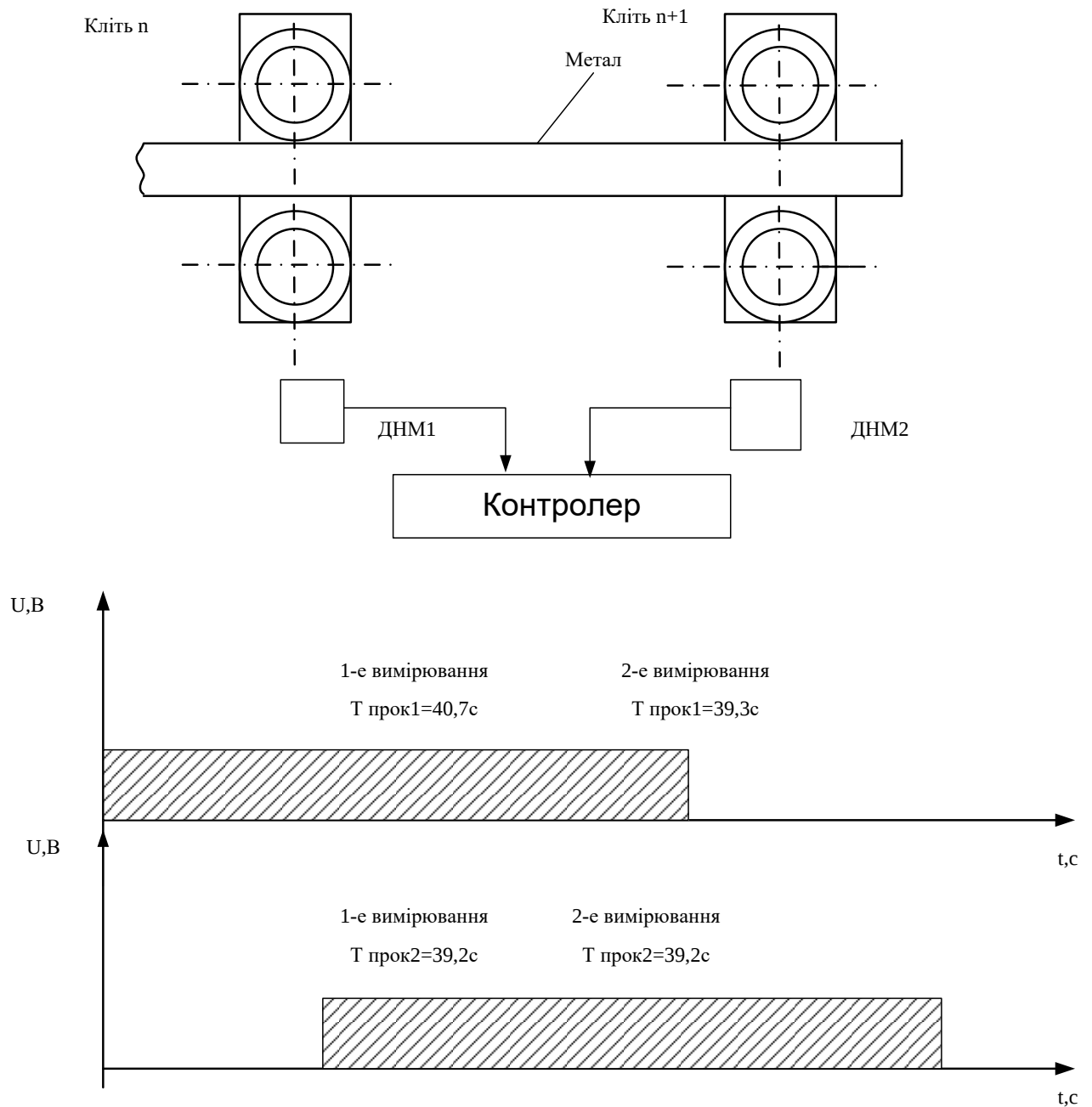
З цього фундаментального закону випливає цікавий висновок: якщо ми знаємо геометричні розміри металу на вході та виході кожної кліті (а це відомо з технології прокатки), то можемо обчислити, яка повинна бути швидкість металу на виході з кожної кліті. А знаючи швидкість металу і довжину розкату, можемо розрахувати, скільки часу повинен тривати процес прокатки в кожній кліті при вільному режимі, коли відсутні натяг або підпір.

Ось тут і криється ключова ідея методу [11, 12]: якщо при вільній прокатці час проходження металу через усі кліті повинен бути однаковим (з урахуванням геометричних співвідношень), то будь-яке відхилення від цього свідчить про порушення режиму. Якщо метал швидше проходить через одну кліть порівняно з іншою, значить швидкості не узгоджені і між клітями виникає або натяг, або підпір.

Практична реалізація методу виглядає досить елегантно. На вході та виході кожної кліті встановлюються датчики наявності металу - прості, надійні пристрої, які фіксують момент проходження переднього та заднього кінців розкату. За цими сигналами контролер обчислює час перебування металу в кожній кліті. Потім ці часи порівнюються між собою, і якщо виявляється

розбіжність, система формує коригувальні сигнали для зміни швидкості відповідних клітей.

Для кращого розуміння розглянемо конкретний приклад, показаний на рис. 2.4.



$$\Delta T1 = T_{прок1} - T_{прок2} = 1,54с$$

$$\Delta T2 = T_{прок1} - T_{прок2} = 0,1с$$

Рис. 2.4. Спосіб виміру натягу за часом прокатки

(розроблено автором)

Припустимо, датчики показали, що час прокатки в першій кліті склав 30,2 секунди, а в другій - 28,66 секунди. Різниця в 1,54 секунди чітко вказує на те, що друга кліть працює швидше, ніж потрібно, і між клітьями виникає натяг. Контролер, побачивши цю розбіжність, повинен видати команду на збільшення швидкості першої кліті або зменшення швидкості другої (або обидві корекції одночасно) до тих пір, поки часи прокатки не вирівнюються.

Переваги цього методу досить суттєві. По-перше, він надзвичайно простий у реалізації - не потрібні складні математичні моделі чи дорогі високоточні датчики. Датчики наявності металу - це прості, надійні і недорогі пристрої, які добре зарекомендували себе в умовах прокатного виробництва. По-друге, метод базується на фундаментальному фізичному законі, що забезпечує його теоретичну коректність. Ми не вимірюємо щось опосередковано, через інші величини - ми безпосередньо контролюємо виконання основного закону прокатки. По-третє, система дозволяє одночасно контролювати всі кліті стану, а не працювати послідовно з окремими групами. Це забезпечує більш швидку реакцію на порушення режиму і кращу якість регулювання.

Звичайно, і цей метод має свої обмеження, які варто враховувати. Критично важливим є точне визначення моментів входу та виходу металу з клітей. Будь-яка похибка у визначенні цих моментів безпосередньо впливає на точність вимірювання часу прокатки, а отже і на якість регулювання. Особливо складно це при високих швидкостях прокатки, коли метал проходить через кліть за лічені секунди і потрібні швидкодіючі датчики з малою інерційністю. Також слід враховувати, що температура металу може дещо впливати на точність методу - при зміні температури змінюється об'єм металу, що може призвести до невеликих відхилень від розрахункового часу прокатки. Однак ці обмеження не є критичними і можуть бути враховані при проектуванні системи.

2.1.6 Порівняльний аналіз методів та обґрунтування вибору

Виконавши детальний аналіз всіх розглянутих методів, можна зробити певні висновки щодо їх придатності для використання в умовах цеху Блюмінг. Кожен метод має свою нішу застосування, і універсального рішення, яке підходило б для всіх ситуацій, просто не існує.

Метод багатоетапного регулювання, безумовно, є інтелектуально привабливим і теоретично обґрунтованим. Однак його надмірна складність робить його малопридатним для промислового впровадження, особливо в умовах існуючого виробництва, де потрібно мінімізувати витрати на модернізацію. Метод пропорційно-інтегральної корекції добре зарекомендував себе на багатьох підприємствах і є своєрідним "золотим стандартом" в автоматизації прокатних станів. Проте він потребує складного налаштування і висококваліфікованого персоналу для обслуговування. Метод безпосереднього вимірювання натягу дає найвищу точність, але ціна цієї точності - висока вартість обладнання і складність його експлуатації - виявляється неприйнятною. Метод контролю потужності є хорошим компромісом, але обмежена точність може бути проблемою для деяких режимів прокатки.

З огляду на всі ці фактори, а також враховуючи специфіку роботи стану 500 цеху Блюмінг-1 - частку зупинку стану при роботі на обвідну лінію, необхідність швидкого налаштування після запуску, різноманітний сортамент - оптимальним представляється метод контролю на основі часу прокатки. Він забезпечує необхідну точність регулювання при прийнятній вартості реалізації. Надійність датчиків наявності металу в умовах прокатного виробництва доведена багаторічною практикою. Простота алгоритму дозволяє швидко налаштувати систему після запуску стану і легко адаптувати її до зміни сортаменту. Саме цей метод було обрано як основу для розробки автоматизованої системи регулювання натягу металу.

2.1.7 Теоретичні основи процесу прокатки

Для повного розуміння процесів, що відбуваються при прокатці, та обґрунтування обраного методу регулювання необхідно детальніше розглянути теоретичні аспекти взаємодії металу з валками. Однією з ключових проблем при дослідженні систем головного приводу обтискних прокатних станів є визначення закону зміни моменту статичного опору в функції часу при прокатці [13]. Цей момент не є постійним, як можна було б припустити з перших міркувань, а змінюється досить складним чином.

Практичні спостереження за роботою стану 500 показують цікаву картину. Струми двигунів клітей не залишаються постійними протягом усього процесу прокатки. У кожному пропуску, через деякий час після захоплення заготовки валками (позначимо цей час як t_z), відбувається короткочасне, але досить різке зниження навантаження на приводи обох валків. Це зниження настає в момент часу t_p і є наслідком складних фізичних процесів, що відбуваються у вогнищі деформації.

Щоб зрозуміти природу цього явища, треба уявити, що відбувається з металом під час прокатки. Прокатка - це безперервний процес, при якому в кожний наступний інтервал часу в зазор між валками надходить новий об'єм металу. Кожна елементарна частинка металу, що перебуває у вогнищі деформації, рухається з певною швидкістю, яка складається з двох компонент: переносної швидкості (швидкості валків) та швидкості пластичного плину самого металу [14]. Ці дві компоненти взаємодіють складним чином, створюючи унікальну картину руху металу у вогнищі деформації.

Головний принцип, що визначає поведінку металу при прокатці, впливає з нездатності металу до стиснення - його об'єм залишається практично незмінним навіть при значних деформаціях. Це означає, що якщо метал стискається по висоті (зменшується товщина), він повинен розтягуватися в довжину і, певною мірою, в ширину. Внаслідок цього відбувається цікаве явище: середня швидкість перетину смуги зростає при переміщенні від площини входу до площини виходу

з вогнища деформації.

Математично це описується простим, але фундаментально важливим співвідношенням:

$$v \cdot F = \text{const}, \quad (2.4)$$

де v - швидкість, F - площа поперечного перерізу. Раніше згадували формулу (2.3). Оскільки площа перерізу на виході менша, ніж на вході ($h_1 b_1 < h_0 b_0$), швидкість на виході повинна бути відповідно більшою ($v_1 > v_0$). Це не просто математична абстракція - це реальний фізичний процес, який можна спостерігати при прокатці: метал немов "прискорюється", проходячи через вогнище деформації.

Особливо цікавим є існування так званого нейтрального перетину у вогнищі деформації [15]. Це умовна площина, де швидкість металу точно дорівнює горизонтальній складовій швидкості валка. Нейтральний переріз ділить вогнище деформації на дві принципово різні зони з різними умовами взаємодії металу і валків.

У зоні від нейтрального перетину до точки захоплення металу швидкість металу менша за швидкість поверхні валка. Це означає, що метал немов "відстає" від валків, ковзає по їх поверхні назад відносно напрямку обертання валків. Ця зона так і називається - зона відставання. Величина відставання має принципове значення при розрахунку режимів обтиснень і швидкостей обертання валків безперервних станів [16]. Саме в цій зоні валки "захоплюють" метал і втягують його у вогнище деформації, долаючи опір деформації.

$$i = \frac{v_v \cos \alpha - v_0}{v_0} \quad (2.5)$$

Після нейтрального перетину картина змінюється на протилежну. Тут швидкість металу стає більшою за швидкість поверхні валка - метал "випереджає" валки, немов "вириваючись" з вогнища деформації.

$$s = \frac{v_1 - v_B}{v_B} \quad (2.6)$$

Це зона випередження, і саме тут формується готовий профіль прокату. Випередження й відставання можна зв'язати між собою наступною залежністю:

$$\frac{s}{\gamma \cos \alpha - l} + \frac{i}{\gamma \cos \alpha - l} = l \quad (2.7)$$

де l - відносне подовження (l_1/l_0), α - кут захоплення.

Величина випередження може бути розрахована з умови сталості секундних об'ємів металу за формулою, запропонованою Головіним та Дрезденом ще в середині минулого століття [17], але яка не втратила своєї актуальності і сьогодні.

$$i = \frac{R}{h_1} \cdot r^2 \quad (2.8)$$

Співвідношення між випередженням і відставанням не є постійним - воно залежить від багатьох технологічних факторів [18]. Найбільший вплив мають коефіцієнт тертя між металом і валками та характер поперечної деформації металу (розширення в ширину). При високому коефіцієнті тертя зона випередження збільшується, а зона відставання зменшується. Температура металу також впливає на це співвідношення через зміну пластичних властивостей матеріалу. Стан поверхні валків - їх шорсткість, наявність окалини - теж вносить свій внесок.

Розуміння всіх цих тонкощів особливо важливе при безперервній прокатці, коли смуга одночасно знаходиться в декількох клітках. Саме від правильного врахування явищ випередження та відставання залежить можливість узгодження швидкостей валків сусідніх клітей і, відповідно, забезпечення режиму вільної прокатки без натягу та підпору.

Проведений аналіз існуючих методів регулювання натягу металу при безперервній прокатці дозволяє зробити обґрунтований висновок щодо вибору оптимального підходу для реалізації в умовах цеху Блюмінг. Кожен з розглянутих методів має свої сильні та слабкі сторони, і вибір між ними - це завжди компроміс між точністю, надійністю, складністю реалізації та вартістю.

Для умов стану 500, з його специфічними особливостями роботи - частими зупинками при переході на обвідну лінію, різноманітним сортаментом продукції, необхідністю швидкого налаштування після запуску - найбільш придатним виявляється метод контролю натягу на основі вимірювання часу прокатки. Цей метод забезпечує оптимальне співвідношення точності регулювання, надійності роботи в важких промислових умовах та економічної ефективності впровадження.

Саме цей метод покладено в основу розробки автоматизованої системи регулювання натягу металу у валках шестиклітьового прокатного стану 500, детальний опис якої наведено в наступних розділах випускної роботи.

2.2 Розробка автоматизованої системи регулювання натягу металу у валках шестиклітьового прокатного стану 500

Сучасне прокатне виробництво характеризується постійним зростанням вимог до якості продукції та енергоефективності технологічних процесів. Поряд із заходами щодо модернізації механічного обладнання та електротехнічних систем, проблема автоматизації управління технологічними параметрами набуває особливої актуальності. Аналіз виробничих даних стану 500 цеху Блюмінг за період 2023-2025 років виявив системні проблеми, пов'язані з ручним режимом регулювання швидкостей клітей.

Експлуатація стану в умовах частих перемикань на обвідну лінію призводить до необхідності повторного налаштування швидкісних режимів після кожного запуску. За статистичними даними, середній час налаштування становить 15-25 хвилин, протягом яких випускається продукція з підвищеним

ризиком дефектів профілю. Частка браку через перекручений профіль сягає 2,3% від загального обсягу виробництва, що створює значні економічні втрати. Крім того, зафіксовано в середньому 4,2 аварійні зупинки на добу, спричинені критичними перевантаженнями приводів клітей через неузгодженість швидкостей.

Основна причина зазначених проблем полягає у високій залежності якості процесу прокатки від досвіду та психофізіологічного стану операторів. Людський фактор особливо критичний в умовах багатопараметрового об'єкта керування, яким є шестиклітьовий безперервний стан. Оператору необхідно одночасно контролювати показники шести приводів, аналізувати їх взаємний вплив та приймати оперативні рішення щодо корекції швидкостей. Такий режим роботи неминуче призводить до помилок, особливо в нестандартних ситуаціях або при втомі персоналу.

Аналіз існуючої системи керування показав відсутність об'єктивних засобів контролю міжклітьового натягу металу. Оператори орієнтуються переважно на показники амперметрів приводів клітей, проте інтерпретація цих даних у термінах фактичного натягу вимагає значного досвіду та інтуїції. Відсутність зворотного зв'язку по параметру натягу робить систему принципово розімкненою, що унеможлиблює досягнення стабільних режимів вільної прокатки.

Проведений у розділі 2.1 порівняльний аналіз методів регулювання натягу металу дозволив обґрунтувати вибір методу контролю на основі вимірювання часу прокатки. Цей підхід базується на фундаментальному законі рівності секундних об'ємів металу, що проходять через суміжні кліті. При вільній прокатці, коли відсутні натяг або підпір, час перебування металу в кожній кліті повинен бути однаковим з урахуванням геометричних співвідношень перерізів. Будь-яке відхилення від цієї рівності свідчить про порушення узгодженості швидкостей та виникнення небажаних зусиль у міжклітьовому просторі.

Переваги обраного методу полягають у простоті технічної реалізації при достатній точності контролю. На відміну від систем з тензометричними

датчиками натягу, які потребують складного монтажу та регулярного калібрування в умовах високих температур та окалиноутворення, метод часового контролю використовує аналіз струмів електроприводів. Струмові шунти вже присутні в штатних системах керування електроприводами, що мінімізує додаткові апаратні витрати. Точність визначення моментів входу та виходу металу з клітей складає ± 50 мілісекунд, що при максимальній швидкості прокатки 6,5 м/с відповідає просторовій похибці близько 0,3 метра – цілком прийнятній для заготовок довжиною 10-11 метрів.

Метою розроблюваної автоматизованої системи є забезпечення стабільного режиму вільної прокатки шляхом автоматичного визначення величини міжклітьового натягу та оперативної корекції швидкостей електроприводів валків. Система повинна функціонувати в реальному часі з мінімальною інерційністю реагування на відхилення від заданого режиму. При цьому необхідно забезпечити плавність зміни швидкостей для уникнення ударних навантажень на механічну частину приводів та додаткових динамічних впливів на метал, що прокочується.

Крім основної функції регулювання натягу, система повинна реалізовувати комплекс додаткових задач, спрямованих на підвищення безпеки та інформаційної прозорості технологічного процесу. Важливою складовою є контроль критичних режимів роботи обладнання з автоматичною блокуванням небезпечних ситуацій. Система має запобігати виникненню аварійних перевантажень приводів, які можуть призвести до пошкодження валків або механізмів передачі крутного моменту.

Інформаційна підтримка оперативного персоналу передбачає відображення технологічних параметрів у зручній для сприйняття формі. Оператор повинен мати можливість у реальному часі спостерігати за часами прокатки в кожній кліті, значеннями струмів навантаження та поточними швидкостями валків. Система сигналізації має оперативно інформувати про відхилення від нормального режиму та про характер виявлених порушень. Накопичення статистичних даних дозволить проводити подальший аналіз роботи обладнання,

виявляти систематичні тенденції та оптимізувати налаштування системи керування.

Особливу увагу приділено реалізації підсистеми архівування подій, яка функціонує незалежно від основного контуру регулювання. Ця підсистема забезпечує безперервну реєстрацію всіх значущих параметрів роботи приводів та перемикачів у системі керування. У випадку виникнення аварійної ситуації архівні дані дозволяють відновити передісторію розвитку процесу, що критично важливо для оперативного виявлення причин збою та запобігання його повторення в майбутньому.

Розроблювана система повинна характеризуватися високою експлуатаційною надійністю, адже вона інтегрується в безперервний технологічний процес, зупинка якого пов'язана зі значними економічними втратами. Апаратне забезпечення має бути розраховане на цілодобову роботу протягом тривалих міжремонтних періодів в умовах підвищеної запиленості, вібрацій та електромагнітних перешкод, характерних для прокатного виробництва. Програмне забезпечення повинно бути стійким до відмов окремих датчиків та здатним продовжувати функціонування в обмеженому режимі при часткових збоях апаратури.

Важливою вимогою є гнучкість системи щодо перебудови на різні сортаменти продукції. Прокатка заготовок різних перерізів вимагає різних співвідношень швидкостей клітей, тому система повинна забезпечувати швидке переналаштування параметрів регулювання без необхідності зупинки виробництва. Жорстко запрограмовані алгоритми керування, орієнтовані на фіксований сортament, неприйнятні для сучасних умов виробництва з частою зміною номенклатури продукції. Адаптивність системи до змінюваних умов прокатки є однією з ключових переваг запропонованого технічного рішення.

2.2.1 Функціональна організація автоматизованої системи керування

Автоматизована система регулювання натягу металу реалізована за ієрархічним принципом з чітким розподілом функцій між рівнями керування. Така архітектура забезпечує як оперативне реагування на швидкоплинні процеси в контурі регулювання, так і можливість планування режимів роботи на тактичному рівні.

Нижній рівень системи формують датчики та пристрої збору первинної інформації. Момент входу металу в кожен кліт визначається за характерною зміною струму якірного ланцюга електродвигуна приводу. При захопленні переднього кінця заготовки валками струм різко зростає від значення холостого ходу до робочого навантаження. Аналогічно, вихід металу з валків супроводжується спаданням струму до базового рівня. Для перетворення аналогового сигналу струму в цифрову форму використовуються модульні перетворювачі PSA-01, які приймають напругу від штатних шунтів систем керування електроприводами та формують нормалізований струмовий сигнал ± 5 мА. Такий підхід дозволяє уникнути встановлення додаткових датчиків безпосередньо на рольгангах або валках, що значно спрощує монтаж та підвищує надійність вимірювань.

Центральним елементом системи є програмований контролер ADAM-5630KW, який виконує основні обчислювальні функції та реалізує алгоритми керування. Контролер безперервно опитує модулі аналогового введення з частотою 100 Гц, що забезпечує своєчасне виявлення моментів входу та виходу металу з точністю до 10 мілісекунд. На основі часових міток формується масив даних про тривалість перебування металу в кожній кліті. Ці дані є основою для визначення поточного режиму прокатки та прийняття рішень щодо необхідності корекції швидкостей.

Алгоритм ідентифікації режиму прокатки базується на порівнянні часів проходження металу через суміжні кліті. Система обчислює відхилення часу прокатки в поточній кліті від середнього значення по всій групі. Якщо

відхилення перевищує встановлений поріг (зазвичай 0,5 секунди), система класифікує режим як прокатку з натягом або підпором залежно від знаку відхилення. При цьому враховуються геометричні співвідношення перерізів на вході та виході кожної кліті, оскільки теоретичний час прокатки залежить від ступеня обтиснення металу.

Формування керуючого впливу здійснюється за принципом пропорційно-інтегрального регулювання. Пропорційна складова забезпечує швидку реакцію на значні відхилення часу прокатки від заданого значення, тоді як інтегральна складова компенсує систематичні похибки та усуває статичну неузгодженість швидкостей. Коефіцієнти регулятора підбираються таким чином, щоб забезпечити аперіодичний перехідний процес без перерегулювання, оскільки коливальні режими недопустимі через ризик виникнення знакозмінних навантажень на механічну частину приводів.

Сформований керуючий сигнал подається на вхід штатної системи керування тиристорним перетворювачем відповідного приводу кліті. При цьому система регулювання натягу функціонує як зовнішній контур по відношенню до контуру регулювання швидкості електроприводу. Така структура підпорядкованого регулювання є класичною для багатоконтурних систем автоматики та забезпечує належну якість перехідних процесів при зміні завдання на швидкість.

Критично важливою функцією системи є обмеження темпу зміни швидкості електроприводу. Різкі стрибки швидкості можуть призвести до ударних навантажень на елементи кінематичної схеми приводу та викликати вібрації всього механізму кліті. Тому система автоматично обмежує швидкість наростання керуючого сигналу на рівні, що відповідає максимально допустимому прискоренню валків. Це обмеження реалізовано програмно у вигляді обмежувача похідної вихідного сигналу контролера.

Підсистема діагностики та захисту забезпечує контроль критичних параметрів роботи обладнання та автоматичне блокування небезпечних режимів. Система постійно аналізує значення струмів навантаження всіх приводів та

порівнює їх з допустимими межами. При перевищенні струмом номінального значення більш ніж на 20% система ідентифікує режим перевантаження та формує сигнал попередження оператору. Якщо перевантаження зберігається протягом заданого інтервалу часу, система може автоматично зменшити завдання на швидкість групи клітей для зниження навантаження на привод проблемної кліті.

Особлива увага приділена запобіганню помилкових дій операторів, які можуть призвести до аварійних ситуацій. Система контролює коректність введених операторами параметрів налаштування та блокує виконання команд, що суперечать технологічним обмеженням. Наприклад, завдання на швидкість, що перевищує максимально допустиму для даного типу приводу, буде автоматично скориговане до безпечного значення з одночасним формуванням інформаційного повідомлення про причину корекції.

Інтерфейс оператора реалізовано на базі промислової НМІ-панелі з графічним відображенням технологічних параметрів. Оператор має можливість у реальному часі спостерігати за мнемосхемою стану з індикацією поточних швидкостей, струмів та часів прокатки в кожній кліті. Кольорова індикація дозволяє швидко ідентифікувати кліті, що працюють у нормальному режимі (зелений колір), та кліті з відхиленнями параметрів (жовтий або червоний колір залежно від ступеня критичності). Така візуалізація значно полегшує сприйняття оперативної інформації та скорочує час реакції персоналу на нештатні ситуації.

Окремим функціональним блоком є підсистема архівування та ретроспективного аналізу даних. Система безперервно записує у енергонезалежну пам'ять контролера всі значущі параметри процесу прокатки з часовою міткою кожної події. Глибина архіву складає не менше 30 діб, що дозволяє проводити статистичний аналіз роботи обладнання за тривалий період. На основі архівних даних можна виявляти систематичні тенденції зміни параметрів, що свідчать про поступове погіршення стану механічного обладнання або про необхідність корекції налаштувань системи керування.

Функція протоколювання подій особливо цінна при розслідуванні причин аварійних ситуацій. Система автоматично зберігає детальний опис всіх подій, що передували аварії, включаючи значення струмів, швидкостей та часів прокатки. Аналіз цієї інформації дозволяє відновити послідовність розвитку аварійного процесу та ідентифікувати ланку системи, що відмовила. Це критично важливо для швидкого усунення несправності та запобігання її повторенню в майбутньому.

Зв'язок системи регулювання натягу із системами верхнього рівня керування підприємством здійснюється через промисловий інтерфейс Ethernet. Контролер ADAM-5630KW підтримує протокол Modbus TCP, що забезпечує сумісність з більшістю сучасних SCADA-систем. Через цей канал зв'язку відбувається передача агрегованих даних про продуктивність стану, витрату електроенергії, кількість браку та інші показники, що використовуються для планування виробництва та аналізу техніко-економічної ефективності роботи обладнання.

Таким чином, запропонована функціональна організація системи забезпечує комплексне вирішення задачі автоматизації процесу регулювання міжклітьового натягу металу. Система поєднує в собі функції оперативного керування, діагностики стану обладнання, інформаційної підтримки персоналу та інтеграції з корпоративними системами управління виробництвом. Модульна архітектура дозволяє поетапно нарощувати функціональність системи та адаптувати її до специфічних умов експлуатації конкретного підприємства.

Технічні засоби системи автоматичного регулювання натягу металу (рис. 2.5) можна структурно розділити на наступні групи:

- технологічний контролер, у комплексі з автоматизованим постом оператора;
- комплектний електропривод;
- датчики й засоби контролю технологічних параметрів.

Як перша точка контролю проходження розкату приймаємо кліть №12 (дивися рис. 2.5).

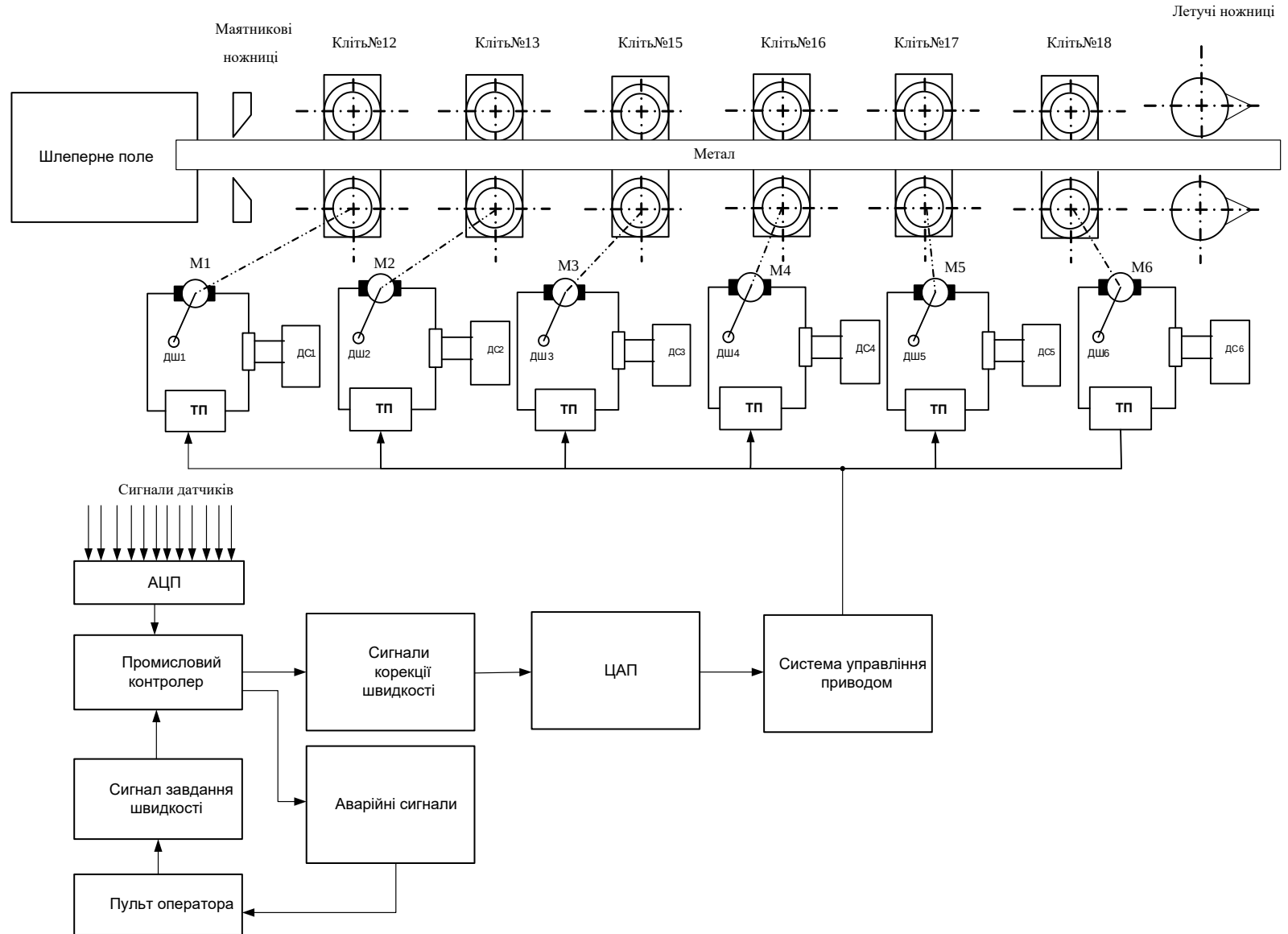


Рис. 2.5. Функціональна схема автоматичної системи регулювання натягу металу стану 500 цеху Блюмінг
(розроблено автором)

Інформативний параметр - зміна струму в якорі електродвигуна. Устаткування кожної кліті з регульованим електроприводом постійного струму забезпечує можливість підключення датчиків наявності металу. Нижче приводиться фрагмент осцилограми зміни струму однієї із клітей чистової групи при заході металу у валки, прокатці й виході металу з валків.

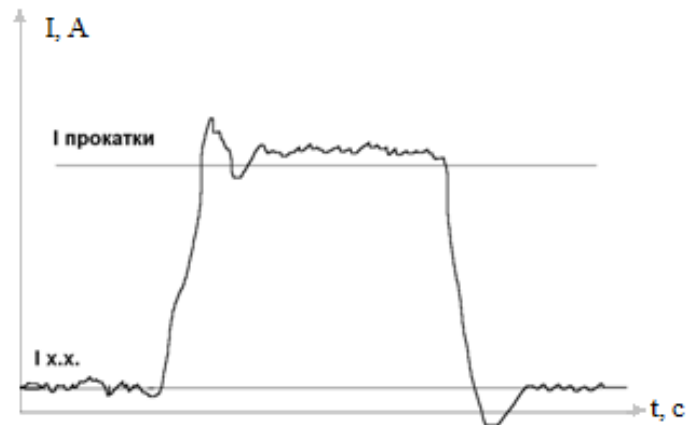


Рис. 2.6. Осцилограма зміни струму кліті чистової групи
(розроблено автором)

Така зміна струму приводу кліті дозволяє досить точно визначати момент заходу металу у валки кліті.

Для передачі сигналу контролеру напруга, що надходить із шунта системи керування електроприводом, перетворюється датчиком статичного струму в сигнал прямокутної форми напругою 24В. Місце установки датчика - щит керування електроприводом кліті. Передній фронт сигналу датчика інформує про захід злитка в кліть, задній - про вихід злитка із кліті.

Ще одним інформаційним параметром проходження металу може служити тільки його випромінювання, викликане нагрітим станом, але цей метод знижує точність визначення моменту появи металу через наявність паротворення в полі зору фотореле в будь-який час року.

Узагальнений графік роботи датчика наявності металу в моменти заходу смуги у валки контрольованої кліті й у моменти його виходу показаний на рис.2.7.

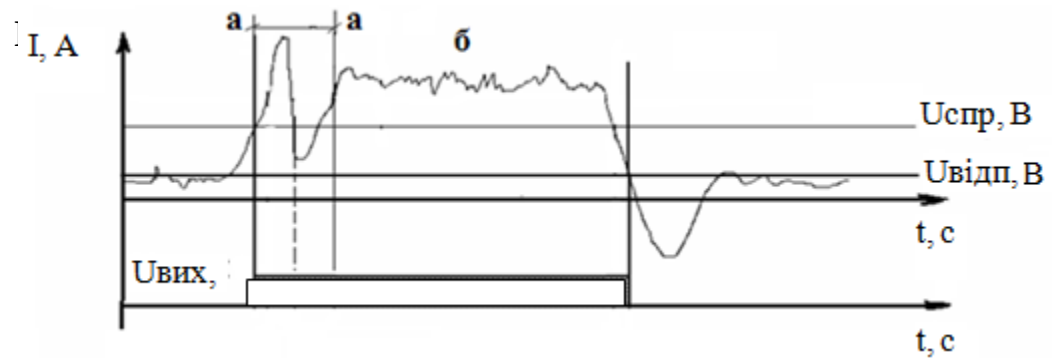


Рис. 2.7. Принцип роботи ДНМ

(розроблено автором)

$U_{спр}$ – напруга спрацьовування вхідних логічних схем датчика. На графіку 2 зображений вихідний сигнал датчика.

Як видно з рисунка, на вході датчика від шунта СУЕП на корисний сигнал накладають перешкоди двох видів:

- перешкода, обумовлена незадовільною роботою астатичної частини приводу (область « а-а»), що приводить до провалу вихідного сигналу;
- обумовлена принципом керування й регулювання двигуна постійного струму від тиристорного перетворювача, що приводить до появи пульсацій на виході випрямного моста (область « б-б»).

Для боротьби із зазначеним видом перешкод можливі два підходи: апаратний і програмний.

Застосування датчика наявності металу дозволить вірогідно розмежувати моменти заходу злитка у валки контрольованої кліті, моменти його виходу й час прокатки.

При вході розкату в першу кліть і до моменту входу розкату в другу кліть, контролер за даними, отриманим з датчиків струму, формує сигнал для запам'ятовування значення моменту статичного навантаження й швидкісного режиму приводних двигунів першої кліті, на другому етапі, з моменту входу розкату в другу кліть і до моменту входу розкату в третю кліть, формується сигнал для зміни швидкісного режиму приводних двигунів попередньої першої кліті, якщо швидкісний режим відрізняється від еталонного значення (див. рис.

2.7), за який приймається мінімальний момент першого етапу, на третьому етапі, з моменту входу розкату в третю кліть, обчислюють відношення моменту запам'ятованого статичного навантаження приводних двигунів першої кліті й дійсного моменту приводних двигунів третьої кліті, на підставі цього обчислення формують сигнал, що визначає різницю між зазначеними величинами, і здійснюють безперервне регулювання швидкісного режиму приводних двигунів першої кліті й т.д., як зворотний зв'язок по швидкості використовуються тахогенератори.

2.3 Вибір технічних засобів

У сучасних автоматизованих системах управління технологічними процесами (АСУ ТП) програмовані логічні контролери (ПЛК) виконують роль ключового з'єднувального елемента між рівнем первинних датчиків, виконавчих пристроїв та системами верхнього рівня керування. Основне призначення контролера – збирати сигнали з датчиків, обробляти їх у відповідності до заданого алгоритму та формувати керуючі впливи для виконавчих механізмів, а також передавати технологічну інформацію на рівень SCADA чи АРМ оператора.

Сучасні ПЛК, як правило, будуються за модульним принципом. Кожен функціональний блок (процесор, живлення, введення/виведення, зв'язок) реалізований у вигляді окремого модуля, який монтується на загальну DIN-рейку або в спеціальний каркас. Така архітектура забезпечує гнучкість конфігурації: кількість і тип модулів можна точно підібрати під конкретне завдання. Крім того, модульність значно спрощує обслуговування, оскільки заміна окремого компонента не вимагає демонтажу всієї системи.

Основні компоненти типового контролера включають:

- корпус із захисним виконанням;
- джерело живлення з можливістю резервування;
- центральний процесорний модуль;

- модулі аналогового та дискретного введення/виведення;
- інтерфейсні модулі для організації зв'язку;
- спеціалізовані модулі (наприклад, для швидкодіючих лічильників або позиційного управління).

Надійне живлення є критичним фактором безперебійної роботи контролера. У багатьох випадках передбачається резервне джерело (наприклад, акумулятор), яке зберігає стан системи та важливі дані при тимчасовому зникненні основного живлення.

Процесорні модулі сучасних ПЛК базуються на 32-розрядних мікропроцесорах і мають оперативну пам'ять обсягом від десятків кілобайт до декількох мегабайт. Для зберігання програмного коду використовується flash-пам'ять або енергонезалежні ПЗУ. Також у складі процесорного модуля обов'язково присутній годинник реального часу (RTC), необхідний для часових міток подій, журналів і синхронізації.

Модулі введення/виведення забезпечують інтерфейс між цифровим світом контролера та аналоговими/дискретними сигналами технологічного обладнання. Аналогові входи приймають уніфіковані сигнали (0–10 В, ± 10 В, 4–20 мА тощо), а виходи – формують аналогічні керуючі сигнали. Дискретні модулі, як правило, працюють із напругою 24 В постійного струму, хоча існують і варіанти для високовольтних сигналів (до 250 В). У деяких випадках для комутації потужних навантажень застосовуються твердотільні реле або симісторні виходи.

Для інтеграції в промислові мережі контролери оснащуються інтерфейсами RS-232/485, Ethernet та підтримкою стандартних протоколів: Modbus RTU/TCP, Profibus, CANopen тощо. Це дозволяє легко підключати їх до існуючої інфраструктури АСУ ТП.

Програмування сучасних ПЛК здійснюється переважно відповідно до міжнародного стандарту IEC 61131-3, що передбачає використання таких мов, як LD (релейно-контактні схеми), FBD (функціональні блок-схеми), ST (структурний текст) тощо. Виробники, зокрема Advantech, надають спеціалізовані середовища розробки (наприклад, CODESYS), які дозволяють не

лише створювати, а й тестувати та налагоджувати програми безпосередньо на місці експлуатації. Готова програма зберігається в енергонезалежній пам'яті і автоматично завантажується при включенні живлення.

Багато контролерів можуть працювати у парі з операторськими панелями (HMI), що дозволяє реалізувати локальний інтерфейс управління без залучення персонального комп'ютера.

Враховуючи вимоги роботи щодо точності, швидкодії, надійності та сумісності з існуючою інфраструктурою стану 500, у якості базового контролера обрано ADAM-5630KW фірми Advantech – сучасний промисловий ПЛК, що повністю задовольняє поставлені завдання. Його технічні характеристики та склад модулів введення/виведення детально розглядаються нижче.

Таблиця 2.1

Перелік вхідних сигналів

Найменування	Кількість каналів	Форма подання	Джерело формування
Наявність прокату в кліті	6	Аналоговий, ± 5 мА	Датчик наявності металу
Швидкість обертання приводу	6	Напруга постійного струму 0-120В	Тахогенератор

Таблиця 2.2

Перелік вихідних сигналів

Найменування	Кількість каналів	Форма подання	Приймач
Сигнал на зміну швидкості двигуна	6	Напруга постійного струму 0-10В	Тиристорний перетворювач
Передача параметрів у систему верхнього рівня	1	Послідовний код	Система верхнього рівня
Індикація параметрів прокатки	1	Послідовний код	Пульт оператора

Контролер ADAM-5630KW є логічним розвитком платформи ADAM-5000 і забезпечує:

- повну сумісність із існуючими модулями введення/виведення серії ADAM-5000;
- вбудовану підтримку промислових протоколів: Modbus TCP, Modbus RTU, Ethernet/IP;
- високу продуктивність завдяки 32-розрядному процесору ARM Cortex-A8;
- можливість роботи в умовах підвищеної температури (до +70 °C) та вологості (до 95 % без конденсації);
- гальванічну ізоляцію всіх інтерфейсів (до 2500 В пост. струму);
- автономну роботу без необхідності підключення до верхнього рівня SCADA.

Технічні характеристики контролера наведено в табл.2.3.

Технічні характеристики контролера ADAM-5630KW

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Тип процесора	—	ARM Cortex-A8
2	Тактова частота процесора	ГГц	1
3	Оперативна пам'ять	МБ	512 DDR3
4	Flash-пам'ять	ГБ	4 (eMMC)
5	Операційна система	—	Linux (CODESYS Runtime)
6	Інтерфейс Ethernet	—	2× 10/100 Mbps
7	Інтерфейс RS-485	—	2 порти
8	Інтерфейс USB	—	1× USB 2.0
9	Підтримувані протоколи	—	Modbus TCP/RTU, EtherNet/IP, PROFINET (опційно)
10	Мінімальний час циклу	мс	≤ 1
11	Напруга живлення	В пост. струму	10...30
12	Ступінь захисту корпусу	—	IP30
13	Діапазон робочих температур	°C	−25...+70
14	Гальванічна ізоляція	В пост. струму	2500
15	Максимальна кількість модулів ADAM-5000	шт.	до 8

Для визначення моменту заходу та виходу металу з валків кліті використовується аналіз зміни струму якоря електродвигунів. У системах керування електроприводами стану 500 вже встановлені шунти, які перетворюють струм двигуна на напругу (максимально ± 200 мВ при номінальному струмі).

Для перетворення слабого сигналу зі шунта у нормований вихідний струмовий сигнал обрано модульний перетворювач струму PSA-01 (ТОВ «Енергомашспецавтоматика»). Цей пристрій приймає аналоговий сигнал напруги від шунта (± 200 мВ) і формує нормований вихідний сигнал ± 5 мА, придатний для подальшої обробки модулем аналогового введення.

Таблиця 2.4

Технічні характеристики перетворювача PSA-01

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Вхідний сигнал	мВ пост. струму	± 200
2	Вихідний сигнал	мА	± 5
3	Кількість каналів	шт.	4
4	Похибка перетворення	%	≤ 3
5	Смуга пропускання	кГц	до 30
6	Напруга живлення	В пост. струму	+10...+30
7	Гальванічна ізоляція	В	1500
8	Діапазон робочих температур	°C	-10...+60
9	Відносна вологість повітря	%	до 98 (при +35 °C)
10	Ступінь захисту	—	IP20 (при монтажі в щиті)

Примітка: З одного PSA-01 можна отримати 4 канали, тому для 6 клітей стану 500 потрібно два перетворювачі PSA-01.

На основі аналізу сигналів, необхідних для функціонування системи (табл. 2.1–2.2), обрано наступні модулі серії ADAM-5000:

1. Модуль аналогового введення ADAM-5017H

Використовується для прийому сигналів від перетворювачів PSA-01 (± 5 мА), що відповідають струмам електроприводів клітей.

Технічні характеристики модуля аналогового введення ADAM-5017H

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Кількість каналів	шт.	8 (диференціальних)
2	Діапазон вхідної напруги	В	± 10
3	Діапазон вхідного струму (програмований)	мА	0...20; 4...20
4	Роздільна здатність АЦП	біт	16
5	Частота дискретизації	кГц	до 10
6	Точність вимірювання	% від діапазону	$\pm 0,1$
7	Гальванічна ізоляція	В пост. струму	3000
8	Ступінь захисту	—	IP20
9	Спосіб живлення	—	від шини ADAM-5000

Примітка: використовується один модуль ADAM-5017H для обслуговування 6 аналогових входів (по одному на кожну кліть).

Модуль аналогового виводу ADAM-5028

Використовується для формування керуючих сигналів (0-10 В) на входи систем керування тиристорними перетворювачами електроприводів клітей.

Технічні характеристики модуля ADAM-5028

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Кількість каналів	шт.	8
2	Діапазон вихідної напруги	В	0...10
3	Діапазон вихідного струму	мА	0...20; 4...20
4	Роздільна здатність ЦАП	біт	12
5	Точність формування сигналу	% від діапазону	±0,1
6	Програмована швидкість наростання напруги	В/с	0,0625...64
7	Програмована швидкість наростання струму	мА/с	0,125...128
8	Гальванічна ізоляція	В пост. струму	3000
9	Захист від короткого замикання	—	є

Використовується один модуль ADAM-5028 для видачі 6 аналогових сигналів керування швидкістю приводів.

Як джерело вторинного живлення обрано імпульсний блок APL150.1.2, що забезпечує стабільну напругу 24 В при потужності до 20 Вт. Блок має вбудований фільтр ЕМС, захист від перевантаження, перенапруги та перегріву.

Технічні характеристики джерела живлення APL150.1.2

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Вхідна напруга змінного струму	В	90...264
2	Вхідна напруга постійного струму	В	120...270
3	Частота живлення	Гц	40...400
4	Максимальний кидок струму при включенні	А	< 15 (при ~220 В, 25 °С)
5	Максимальний вхідний струм	А	< 1 (при 85 В пост. струму)
6	Коефіцієнт корисної дії	%	75 (типове значення при повному навантаженні)
7	Максимальна вихідна потужність (природне охолодження)	Вт	15
8	Максимальна вихідна потужність (примусове охолодження)	Вт	20
9	Діапазон регулювання вихідної напруги	%	±5
10	Час роботи при провалі мережі	мс	15 (при ~220 В, навантаження 15 Вт)
11	Захист від перевантаження по струму	% від макс.	110...115 (автоматичне відновлення)
12	Захист від перегріву	°С	> 125 (силовий ключ)
13	Діапазон робочих температур	°С	-20...+70
14	Допустима вологість	%	35...96 (без конденсації)
15	Температура зберігання	°С	-40...+50

16	Кліматичне виконання	—	УХЛ 4,2 / IP 20
17	Маса (корпусний варіант)	кг	0,3

Операторський інтерфейс

Для відображення технологічних параметрів (час прокатки, струми, режим роботи) передбачено використання HMI-панелі ADAM-6066 –7-дюймового сенсорного дисплея з підтримкою Modbus TCP, IP65 на передній панелі та робочим діапазоном температур –20...+60 °С.

Таблиця 2.8

Технічні характеристики HMI-панелі оператора

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Діагональ дисплея	дюйм	7
2	Тип дисплея	—	TFT LCD, сенсорний
3	Роздільна здатність	пікселі	800×480
4	Тип клавіатури	—	Сенсорна (резистивна)
5	Інтерфейс зв'язку з контролером	—	RS-485 (Modbus RTU)
6	Додатковий інтерфейс	—	Ethernet (опційно)
7	Напруга живлення	В пост. струму	24 (10...30)
8	Споживана потужність	Вт	< 10
9	Діапазон робочих температур	°С	–20...+60
10	Відносна вологість повітря	%	5...90 (без конденсації)
11	Ступінь захисту передньої панелі	—	IP65
12	Габаритні розміри (щитове виконання)	мм	148×174×36
13	Маса	кг	≤ 0,65

На рис. 2.7 показані вікна інформації, видавані на пульт оператора по запиті.

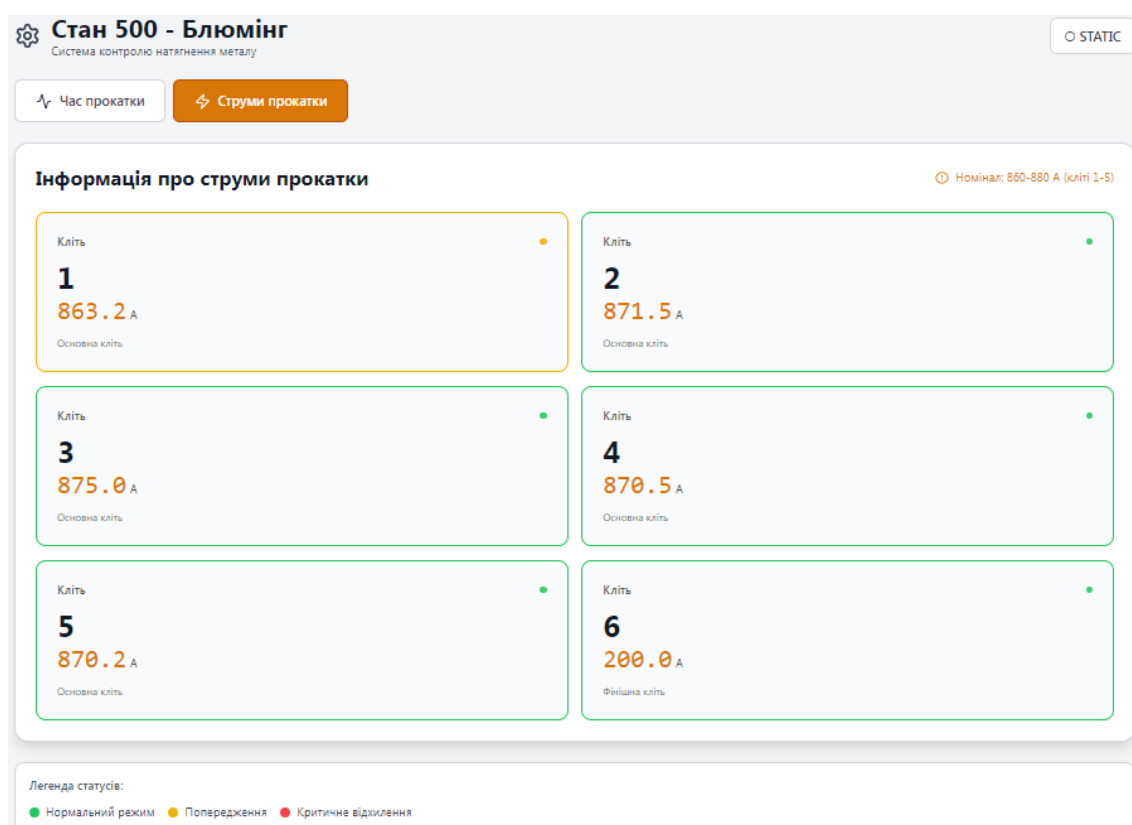
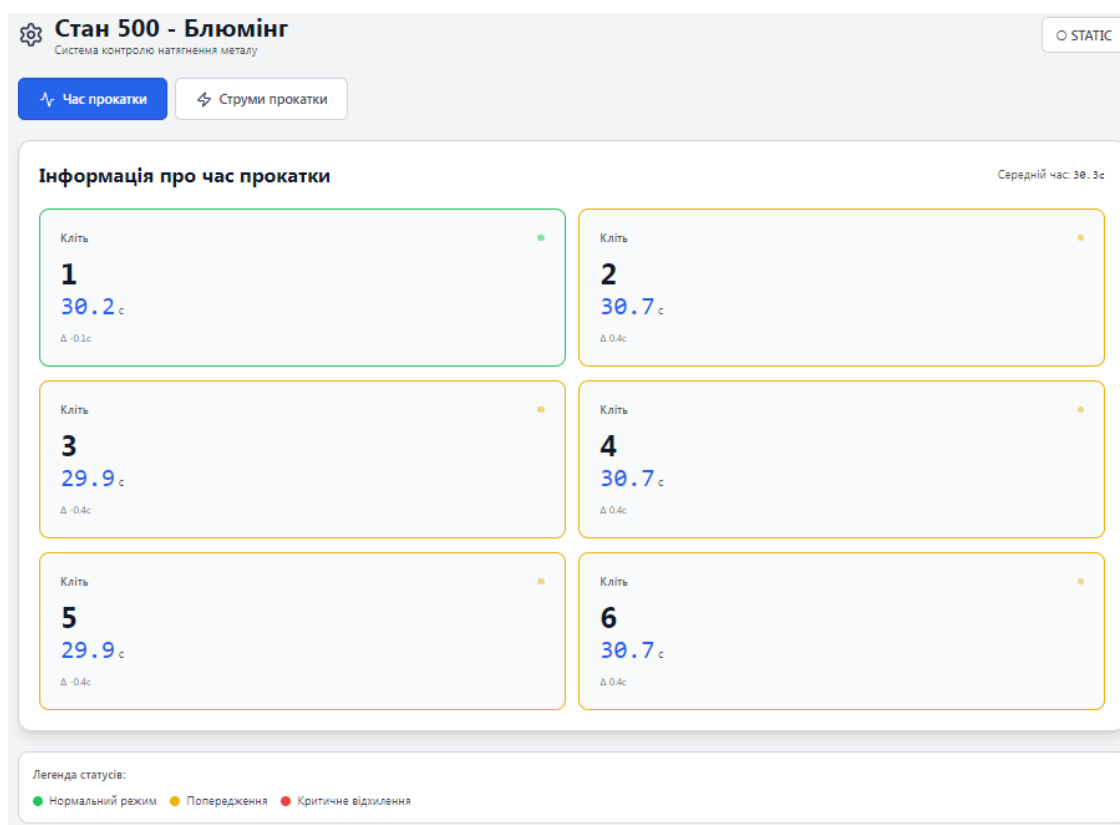


Рис. 2.7. Вікна інформації на пульті оператора
(розроблено автором)

Технічні характеристики тахогенератора Siemens 1FT6

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Тип тахогенератора	—	Siemens 1FT6 (серія TENV)
2	Вихідна напруга	В пост. струму	0...115
3	Номінальна частота обертання	об/хв	3000
4	Максимальна частота обертання	об/хв	6000
5	Клас точності	—	0,5
6	Лінійність характеристики	%	±0,3
7	Пульсації вихідної напруги	%	<3
8	Діапазон робочих температур	°C	-20...+60
9	Ступінь захисту корпусу	—	IP54
10	Тип кріплення	—	Фланцеве (DIN)
11	З'єднання з валом	—	Пружна муфта
12	Гальванічна ізоляція	В	500
13	Маса	кг	2,5

Примітка: Тахогенератор встановлюється на валу електродвигуна кожної кліті та формує напругу пропорційну швидкості обертання валків. Використовується як датчик зворотного зв'язку по швидкості в системі автоматичного регулювання натягу металу.

Технічні характеристики нормуючого перетворювача Advantech ADAM-3016

№ з/п	Найменування параметру	Одиниці виміру	Параметр
1	Тип перетворювача	—	Advantech ADAM-3016
2	Вхідна напруга	В пост. струму	0...150
3	Вихідна напруга	В пост. струму	0...10
4	Вихідний струм (опційно)	мА	4...20
5	Точність перетворення	% від діапазону	±0,1
6	Температурний дрейф	ppm/°C	<50
7	Гальванічна ізоляція вхід-вихід	В пост. струму	3000
8	Захист від перенапруг	—	Є (до 200 В)
9	Час встановлення сигналу	мс	<10
10	Діапазон робочих температур	°C	-10...+70
11	Спосіб монтажу	—	DIN-рейка 35 мм
12	Напруга живлення	В пост. струму	10...30
13	Споживана потужність	Вт	<1,5
14	Габаритні розміри	мм	99×22,5×114

Примітка: Перетворювач призначений для узгодження вихідного сигналу тахогенератора (0-115 В) з входом модуля аналогового введення ADAM-5017H (0-10 В). Забезпечує гальванічну ізоляцію між високовольтним сигналом тахогенератора та низьковольтною керуючою системою, а також захист від перенапруг та електромагнітних завад.

Переваги запропонованої архітектури

Сумісність: використання існуючих шунтів знижує капітальні витрати.

Надійність: всі компоненти сертифіковані для промислового застосування (IEC 61000-6-2, IEC 61000-6-4).

Гнучкість: легке масштабування та адаптація до інших сортamentів.

Діагностика: вбудована система самодіагностики та журнал подій.

Економія: зниження витрат на монтаж та пусконаладжувальні роботи за рахунок модульної архітектури.

Таким чином, запропонована конфігурація технічних засобів повністю задовольняє вимоги до точності, швидкодії та надійності автоматизованої системи регулювання натягу металу на стані 500.

Схема підключень технічних засобів системи натягу наведена на рис. 2.8.

2.4 Розрахунок погрешностей і періоду знімання інформації

При контролі й дослідженні технологічного процесу висновки про умови роботи встаткування й про характер відхилень у протіканні процесу робляться на підставі аналізу величин, отриманих при вимірі технологічних параметрів. Під виміром звичайно розуміють пізнавальний процес, що полягає в експериментальному визначенні чисельного співвідношення між вимірюваною фізичною величиною й значенням, прийнятим за одиницю виміру.

З погляду загальних прийомів одержання результатів виміру їх можна розділити на прямі, непрямі й сукупні.

До прямих вимірів ставляться ті, результат яких виходить безпосередньо з дослідних даних. При цьому значення шуканої величини виходять або безпосереднім порівнянням її з мірами, або за допомогою вимірювальних приладів, градуйованих у відповідних одиницях, наприклад вимір довжини за допомогою метра, температури за допомогою термометра, тиску металу на валки за допомогою месдозы й т.п.

До непрямих вимірів належать такі виміри, результат яких виходить на підставі дослідних даних прямих вимірів декількох величин, пов'язаних із шуканою величиною певним рівнянням.

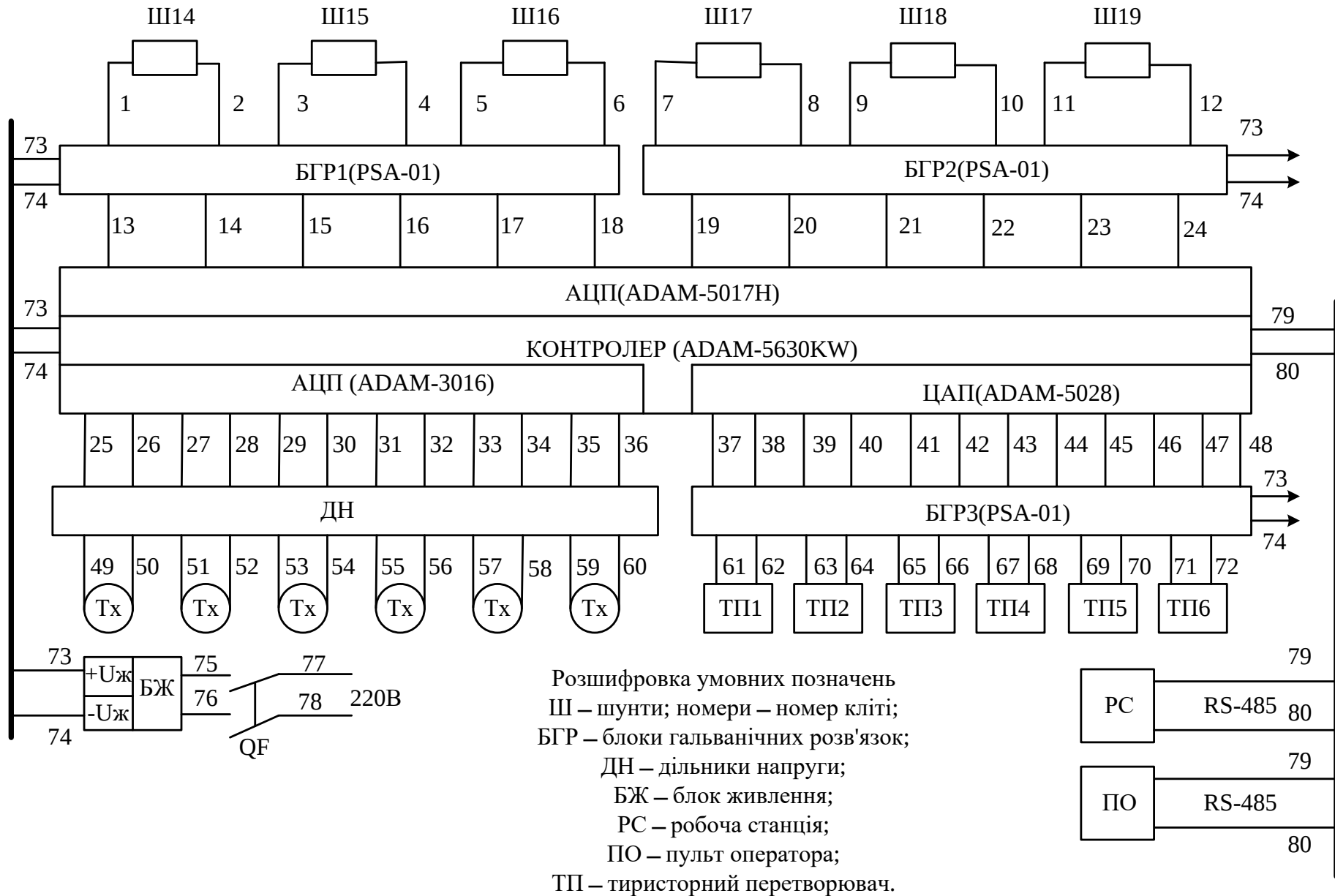


Рис. 2.8. Схема підключень технічних засобів системи натягу
 (розроблено автором)

Слід зазначити, що в ряді випадків непрямим виміром можна одержати більш точний результат, ніж при прямому вимірі.

До сукупних вимірів належать виміри, що складаються із сукупності (ряду) прямих вимірів однієї або декількох однорідних величин. При цьому один вимір відрізняється від іншого тим, що міняються або умови виміру, або сполучення вимірюваних величин. Сукупні виміри роблять, наприклад, при градуюванні різних датчиків.

Якість приладів, за допомогою яких здійснюються виміри, залежить від ряду властивих їм властивостей, що визначають ступінь довіри до отриманого при їхній допомозі результатам виміру. Основними властивостями приладу варто вважати точність, чутливість, сталість.

Залежно від обраного методу вимірювань, а отже, і від обраного типу вимірювального приладу в процесі самого виміру технологічних параметрів виникають погрішності, які по їхньому походженню розділяють на випадкові; систематичні інструментальні або приладові; систематичні або випадкові методичні; динамічні.

Методична погрішність у нашій випадку обумовлюється вибором частоти опитування контролером інформації з датчиків.

Система регулювання натягу металу повинна визначати факт захоплення-викиду розкату з погрішністю не більше 5% стосовно моменту факту захоплення-викиду.

У першу чергу визначимо погрішність викликану часом запізнювання:

$$\Delta l = v \cdot \tau = 7 \cdot 0.05 = 0.35 \text{ (м)} \quad (2.9)$$

де, v - максимальна швидкість прокатки;

τ - час запізнювання визначення появи металу, дорівнює 0.05 сек.

По-друге, визначаємо процентне співвідношення отриманої довжини з мінімальною довжиною ($l_{\min}$) розкату, що прокочується, дане значення повинне бути не більше 5%:

$$\frac{\Delta l}{l_{\min}} \cdot 100\% = \frac{0.35}{30} \cdot 100\% = 1.2\% < 5\% \quad (2.10)$$

З вище наведеного співвідношення бачимо, що погрішність вимірів нижче припустимої.

Для визначення погрішності часу виміру робимо наступний розрахунок:

$$\Delta t = \frac{\tau}{t} = \frac{0.05}{35} \cdot 100\% = 0.15\% \quad (2.11)$$

де t - час прокатки.

Отримане значення також менш припустимого, що нас задовольняє.

Для визначення часу знімання інформації задамося абсолютною погрішністю $\delta = 1\%$ і виходячи із цього визначимо припустиму помилку по струму:

$\Delta I = \delta \cdot I_n = 0.01 \cdot 2000 = 20$ (А). З наведеного нижче рівняння визначимо час зйому інформації:

$$t = \frac{\Delta I}{dI/dt} \rightarrow \frac{20}{1000} = 0.02 \text{ (с)} \quad (2.12)$$

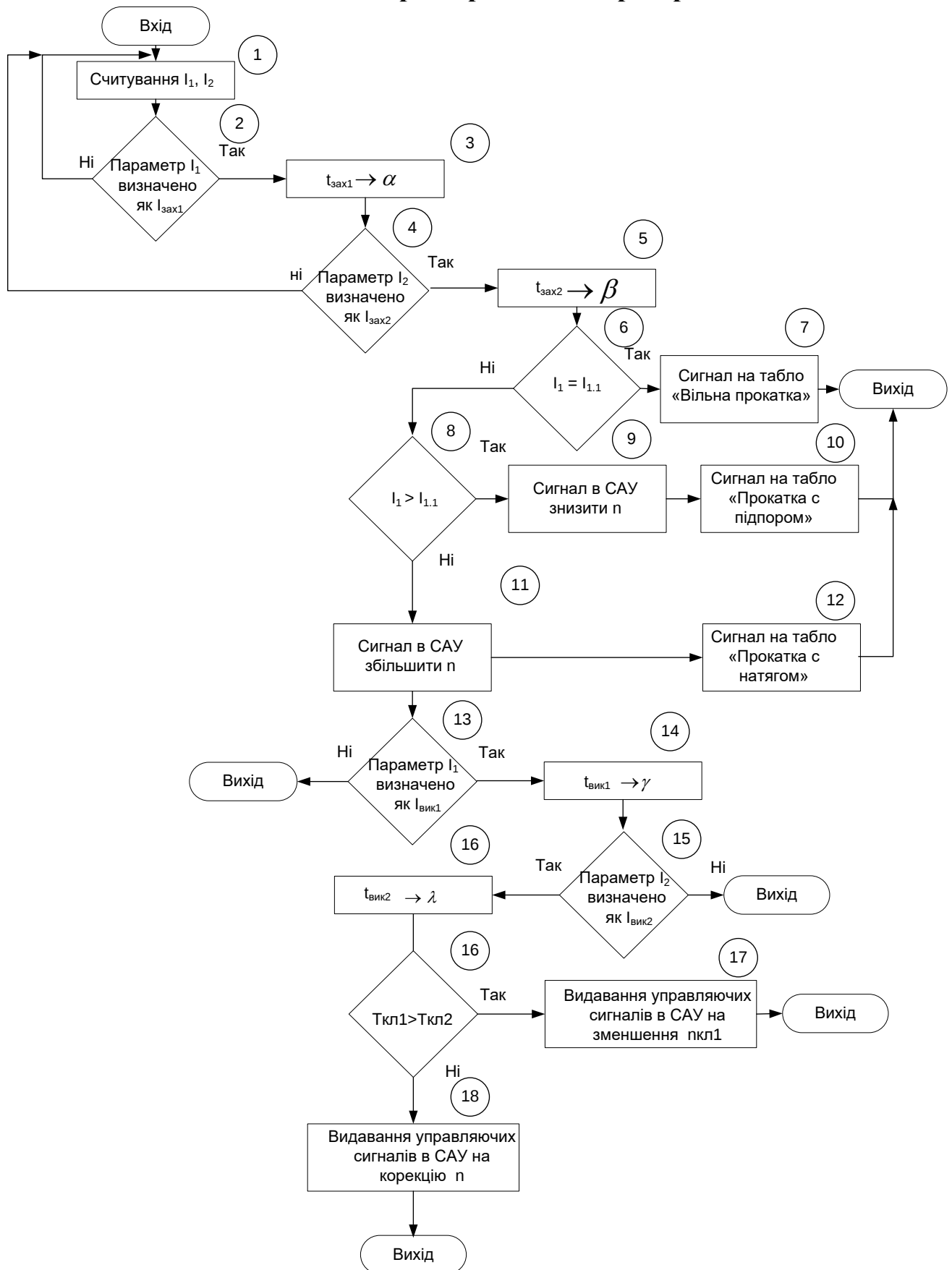
Для надійності час опитування датчиків можна взяти $T=t/2=0,01$ с або 100Гц.

2.5 Розробка алгоритму регулювання натягу металу

Алгоритм роботи контролера (див. рис. 2.9) повинен забезпечувати наступні функції:

- циклічне опитування струмів клітей;
- визначення й запис на згадку факту й часу захоплення/ викиду металу із прив'язкою до № кліті значення;
- ідентифікацію режиму прокатки: «вільна»; «з підпором»; «з натягом»;
- адекватну видачу сигналів керування швидкістю в САУ приводом відповідної кліті й індикацію технологічних параметрів на табло оператора;
- корекцію швидкісного режиму по неузгодженості часу прокатки в наступній і попередній клітях.

Рис. 2.9. Алгоритм роботи контролера



(розроблено автором)

2.6 Економічне обґрунтування рішення

2.6.1 Суть проектних рішень та чинники економічної ефективності

На сьогодні процес регулювання прокатки на стані 500 здійснюється вручну, що призводить до:

- тривалого налаштування після кожного запуску стану (15–25 хв);
- залежності якості продукції від кваліфікації оператора;
- появи браку через перекручений профіль;
- аварійних зупинок через перевантаження приводів.

Мета роботи – автоматизація регулювання міжклітьового натягу металу шляхом вимірювання часу проходження розкату через кліті та корекції швидкостей валків. Це забезпечить режим вільної прокатки, скоротить простої та підвищить якість заготовок.

2.6.2 Обґрунтування економії часу простоїв

За даними технологічної служби цеху Блюмінг [24], стан 500 має близько 190 запусків на рік.

- середній час налаштування вручну: 20 хв;
- очікуваний час налаштування після автоматизації: 15 хв;
- економія на 1 запуск: 5 хв;

Загальна річна економія часу:

$$\Delta T = 190 \cdot 5 \text{ хв} = 950 \text{ хв} \approx 15,83 \approx 16 \text{ год/рік} \quad (2.13)$$

2.6.3 Техніко-економічні показники базового варіанту

Таблиця 2.11

Техніко-економічні показники роботи цеху Блюмінг

Найменування показника	Одиниця виміру	Умовне позначення	Значення
Фактичний час роботи основного устаткування	год	Тф	6 494
Установлена продуктивність стану	т/год	G	514
Річний обсяг виробництва	т	V0	2 403 441
Ціна реалізації 1 т продукції	грн/т	Ц	18 500
Собівартість 1 т продукції	грн/т	C1	15 800

2.6.4 Розрахунок капіталовкладень

Таблиця 2.12

Кошторис капіталовкладень

№	Найменування	Кількість, шт.	Ціна, грн	Сума, грн
1	2	3	4	5
I. Обладнання				
1	Контролер ADAM-5630KW	1	85 000	85 000
2	Модуль ADAM-5017H	1	18 500	18 500
3	Модуль ADAM-5028	1	22 000	22 000
4	Перетворювач PSA-01	2	8 500	17 000
5	Джерело живлення APL150.1.2	1	4 200	4 200
6	HMI-панель ADAM-6066	1	32 000	32 000
7	Перетворювач ADAM-3016	6	3 800	22 800
8	Кабель, монтажні матеріали	-	-	25 000

9	Разом (технічні засоби, ΔK_1)			226 500
---	--	--	--	---------

Продовження табл. 2.13

1	2	3	4	5
II. Нематеріальні активи				
10	Проектування системи	-	-	60 000
11	ПЗ CODESYS	-	-	32 000
	Разом (ПЗ та проектування, ΔK_2)			92 000
III. Роботи				
12	Монтажні роботи	-	-	35 000
13	Пусконаладжувальні роботи (ПНР)	-	-	30 000
14	Навчання персоналу	-	-	10 000
15	Разом (роботи, ΔK_3)			75 000
16	загальні капіталовкладення (ΔK)			393 500

2.6.5 Структура основних фондів та розрахунок амортизації

Таблиця 2.13

Структура основних фондів впроваджуваного рішення

Група основних фондів	Первісна вартість, грн	Питома вага, %
Технічні засоби	226 500	57,6
Програмне забезпечення	92 000	23,4
Монтаж та налагодження	75 000	19,0
Разом	393 500	100,0

Амортизація розраховується прямолінійним методом. Строк корисного використання – 5 років.

Річна амортизація технічних засобів:

$$A_1 = \Delta K_1 / T = 226\,500 / 5 = 45\,300 \text{ грн} \quad (2.14)$$

Річна амортизація програмного забезпечення:

$$A_2 = \Delta K_2 / T = 92\,000 / 5 = 18\,400 \text{ грн} \quad (2.15)$$

Загальна річна амортизація:

$$A_{\text{річ}} = A_1 + A_2 = 45\,300 + 18\,400 = 63\,700 \text{ грн} \quad (2.16)$$

2.6.6 Розрахунок експлуатаційних витрат

Витрати на поточний ремонт (8% від амортизації):

$$R = A_{\text{річ}} \cdot 0,08 = 63\,700 \cdot 0,08 = 5\,096 \text{ грн} \quad (2.17)$$

Витрати на електроенергію (потужність системи 0,5 кВт, час роботи ~3247 год/рік, тариф 4,2 грн/кВт·год):

$$C_{\text{ел}} = 0,5 \cdot 3247 \cdot 4,2 = 6\,810 \text{ грн} \quad (2.18)$$

Таблиця 2.14

Експлуатаційні витрати

Найменування витрат	Позначення	Величина, грн/рік
Амортизаційні відрахування	$A_{\text{річ}}$	63 700
Поточний ремонт	R	5 096

Електроенергія	Сел	6 810
Разом	Сексп	75 606

2.6.7 Розрахунок економічного ефекту

Вартість простою стану 500 становить 18 000 грн/год (за даними економічної служби підприємства [24]).

Економія від скорочення простоїв:

$$E = \Delta T \cdot 18000 = 16 \cdot 18000 = 288000 \text{ грн/рік} \quad (2.19)$$

Чиста річна економія (після вирахування експлуатаційних витрат):

$$E_{\text{чист}} = E - \text{Сексп} = 288000 - 75606 = 212394 \text{ грн/рік} \quad (2.20)$$

2.6.8 Розрахунок терміну окупності

Податок на прибуток (18%):

$$P_{\text{чист}} = E_{\text{чист}} \cdot (1 - 0,18) = 212394 \cdot 0,82 = 174073 \text{ грн/рік} \quad (2.21)$$

Термін окупності (простий метод):

$$T_{\text{ок}} = \Delta K / P_{\text{чист}} = 393\,500 / 174\,073 \approx 2,26 \text{ роки} \quad (2.22)$$

2.6.9 Загальні зміни статей витрат

Таблиця 2.15

Зміни витрат

№	Найменування статті	Позначення	Зміна витрат, грн/рік	На одиницю продукції, грн/т
1	Амортизація (нової системи)	Аріч	+63 700	+0,027
2	Поточний ремонт (нової системи)	Р	+5 096	+0,002
3	Електроенергія (нової системи)	Сел	+6 810	+0,003
4	Економія від скорочення простоїв	Е	-288 000	-0,120
5	Разом економічний ефект (зниження)	ΔЕ	-212 394	-0,088

Проектна собівартість одиниці продукції:

$$C_2 = C_1 + \Delta E / V_0 = 15800 - 0,088 \approx 15799,91 \text{ грн/т} \quad (2.23)$$

2.6.10 Техніко-економічні показники впроваджуваної системи

Таблиця 2.16

Техніко-економічні показники впроваджуваної системи

№	Показник	Од. вим.	Базовий варіант	Проектний варіант	Абсолютне відхилення
1	Річний обсяг виробництва	т	2 403 441	2 403 441	0
2	Собівартість 1 т продукції	грн/т	15 800,00	15 799,91	-0,09
3	Капіталовкладення	тис. грн	—	393,5	393,5
4	Чиста річна економія від скорочення простоїв	тис. грн	—	212,4	212,4
5	Амортизаційні витрати нової системи	тис. грн	—	63,7	+63,7
6	Поточний ремонт нової системи	тис. грн	—	5,1	+5,1
7	Витрати на електроенергію	тис. грн	—	6,8	+6,8
8	Термін окупності	роки	—	2,26	—
9	Загальний економічний ефект	тис. грн	—	212,4	212,4

Проект є економічно доцільним. Термін окупності – 2,26 роки, що відповідає внутрішнім вимогам підприємства до ефективності капіталовкладень.

Джерело ефекту – зниження операційних витрат. Основним результатом є скорочення технологічних простоїв на 16 год/рік, що при вартості простою 18 000 грн/год дає економію 288 тис. грн на рік.

Ефект є стабільним і гарантованим незалежно від ринкової кон'юнктури, оскільки досягається за рахунок зниження внутрішніх витрат, а не збільшення обсягу продаж.

Додаткові переваги: підвищення стабільності технологічного процесу, зниження браку та аварійності, створення інформаційної бази для подальшого вдосконалення системи керування.

Впровадження автоматизованої системи регулювання натягу металу на стані 500 цеху Блюмінг є технічно обґрунтованим та економічно ефективним заходом. Проєкт характеризується помірними інвестиціями, прийнятним терміном окупності та забезпечує значне зниження операційних витрат, що остаточно підтверджує його техніко-економічну доцільність.

2.7 Заходи з охорони праці

2.7.1 Загальні положення та специфіка умов праці на робочому місці оператора

Робоче місце оператора автоматизованої системи керування прокатним станом 500 характеризується специфічними умовами праці, пов'язаними з тривалою роботою за комп'ютерною технікою та необхідністю швидкого прийняття рішень. Оператор здійснює управління шістьма клітьми безперервного стану в режимі реального часу, що вимагає високої концентрації уваги протягом усієї зміни.

Операторська кімната розташована в окремому приміщенні машинного залу прокатного цеху, що забезпечує відносну ізоляцію від основних виробничих шкідливостей прокатного виробництва. Робота відноситься до категорії Іб за енерговитратами відповідно до [25], що передбачає переважно розумову працю з періодичними переміщеннями по приміщенню.

Тривалість безперервної роботи оператора за пультом керування може досягати 6-8 годин за зміну. Психоемоційне навантаження посилюється відповідальністю за безаварійну роботу дорогого обладнання та якість продукції. У критичних ситуаціях оператор повинен швидко аналізувати інформацію від численних датчиків та приймати рішення щодо корекції параметрів.

Мікроклімат операторської формується під впливом теплового випромінювання від електронного обладнання, що в літній період може призводити до перегріву приміщення. Система вентиляції та кондиціонування повинна забезпечувати підтримку параметрів мікроклімату в межах оптимальних значень відповідно до [26].

Робоче місце обладнане декількома моніторами для відображення технологічних параметрів, НМІ-панеллю для управління системою, клавіатурою та маніпулятором. Ергономічне розташування цих елементів має критичне значення для зниження статичного навантаження на м'язи шиї, плечового пояса та верхніх кінцівок.

Освітлення повинно забезпечувати комфортні умови для зорової роботи як з екранами моніторів, так і з паперовою документацією. Недостатня освітленість або відблиски на екранах створюють додаткове напруження для зорового аналізатора.

Електробезпека є одним з найважливіших аспектів охорони праці на даному робочому місці. Оператор постійно працює з електронним обладнанням напругою 220 В. Пошкодження ізоляції або порушення правил експлуатації можуть призвести до ураження електричним струмом.

Шумове навантаження формується переважно від систем вентиляції та кондиціонування, а також від електронного обладнання. Хоча рівень шуму значно нижчий, ніж у прокатному цеху, тривалий вплив монотонного шуму може негативно впливати на психоемоційний стан оператора.

Специфічним фактором ризику є можливість виникнення стресових ситуацій при аварійних режимах роботи обладнання. Відмова системи автоматизації або критичне перевантаження електроприводів вимагають

швидких дій в умовах дефіциту часу. Систематичний вплив виробничих стресів може призвести до розвитку невротичних розладів та захворювань серцево-судинної системи.

2.7.2 Ідентифікація та аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів

Для розробки ефективних заходів з охорони праці проведено детальний аналіз всіх шкідливих і небезпечних виробничих факторів відповідно до вимог [30].

Еквівалентний рівень звуку на робочому місці становить 58-62 дБА, що не перевищує гранично допустимого рівня 65 дБА згідно з [31]. Рівень звукового тиску сигналізаторів аварійних режимів повинен становити 70-75 дБА на відстані 1 метр з перервчастою частотою модуляції 1-2 Гц.

Фактична освітленість на робочому столі становить 280-320 лк, що є недостатнім порівняно з нормованою 300-500 лк для робіт з екранами моніторів згідно [32]. Проблемою є також підвищена яскравість екранів та наявність відблисків від зовнішніх джерел світла.

Параметри мікроклімату мають відхилення від нормативних значень. Температура повітря в літній період може підвищуватися до 26-28°C через теплові виділення від обладнання. Відносна вологість у зимовий період знижується до 25-30% через роботу систем опалення.

Електромагнітне випромінювання від комп'ютерної техніки не перевищує гранично допустимих рівнів відповідно до [27]. Напруженість електричного поля 50 Гц складає 8-12 В/м при ГДР 25 В/м, напруженість магнітного поля – 0,08-0,12 А/м при ГДР 2,5 А/м.

Приміщення операторської відноситься до категорії з підвищеною небезпекою згідно з [34] через наявність струмопровідних підлог та можливість одночасного доторку до металевих конструкцій. Пошкодження ізоляції або порушення правил електробезпеки можуть призвести до електротравм.

Фактичні та нормативні значення фізичних факторів

Найменування фактора	Норматив	Фактичне значення	Джерело
Рівень шуму, дБА	≤ 65	58-62	[31]
Освітленість, лк	300-500	280-320	[32]
Температура (холодний період), °C	21-23	20-24	[26]
Температура (теплий період), °C	22-24	24-28	[26]
Вологість (холодний період), %	40-60	25-35	[26]
Напруженість ел. поля 50 Гц, В/м	≤ 25	8-12	[27]

Нервово-психічне напруження є домінуючим психофізіологічним фактором. Специфіка діяльності вимагає постійної готовності до швидкого реагування на зміну параметрів та прийняття відповідальних рішень. Інтелектуальне навантаження посилюється необхідністю одночасного контролю роботи шести клітей прокатного стану.

Монотонність праці проявляється в штатних режимах роботи, коли процес прокатки відбувається стабільно. Тривале спостереження за однотипними показниками призводить до зниження пильності уваги. Емоційне навантаження визначається високою відповідальністю за безаварійну роботу обладнання вартістю понад 15 млн грн.

Статичне фізичне навантаження пов'язане з тривалим перебуванням в сидячому положенні з фіксованою позою. Вимушена робоча поза з нахилом

голови створює статичне напруження м'язів шийного відділу хребта та плечового пояса.

Навантаження на зоровий аналізатор визначається необхідністю тривалої роботи з екранами моніторів. Розмір символів на екрані НМІ-панелі становить 3-4 мм на відстані 500-600 мм. Частота переведення погляду може досягати 200-300 разів на годину.

Інтелектуальне навантаження характеризується необхідністю контролю понад 30 параметрів, що наближається до меж оперативної пам'яті людини. Необхідність швидкого співставлення показників та виявлення відхилень створює високе інтелектуальне навантаження.

Змінний режим роботи, включаючи нічний час, порушує природні циркадні ритми організму, призводить до розладів сну та підвищеного ризику розвитку серцево-судинних захворювань. Тривалість безперервної роботи за монітором без регламентованих перерв створює кумулятивний ефект дії шкідливих факторів.

2.7.3 Заходи щодо забезпечення безпечних умов праці

Передбачається встановлення прецизійної системи кондиціонування з автоматичним підтриманням температури та вологості. Розрахункова продуктивність системи повинна забезпечувати кратність повітрообміну не менше 3 год⁻¹ відповідно до [29].

Система обладнується автоматичним регулятором температури з точністю підтримання $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Для забезпечення нормативної вологості в зимовий період передбачається ультразвуковий зволожувач продуктивністю 3-5 кг/год.

Робоче місце не повинно розташовуватися безпосередньо під струменем повітря з кондиціонера або в зоні впливу сонячного випромінювання. Рекомендована відстань до радіаторів опалення – не менше 1,5 м, до кондиціонера – не менше 2 м.

Система освітлення проектується як комбінована з загальним рівномірним освітленням 200 лк та місцевим освітленням робочих столів. Використовуються світлодіодні світильники з розсіювачем, розміщені рядами паралельно лінії зору.

Місцеве освітлення забезпечується настільними світлодіодними світильниками з регулюванням яскравості. Сумарна освітленість повинна становити 400-500 лк згідно [32]. Колірна температура обирається в діапазоні 4000-4500 К, індекс кольоропередачі Ra не нижче 80, коефіцієнт пульсації не більше 5%.

Монітори розміщуються перпендикулярно до лінії вікон з антибліковими покриттями. Яскравість екрану узгоджується з яскравістю оточуючого середовища – при освітленості 400 лк рекомендована яскравість білих ділянок становить 100-120 кд/м².

Виконується захисне заземлення всього електрообладнання відповідно до [34] з опором розтікання не більше 4 Ом для мережі 220 В. Як заземлювачі використовуються вертикальні сталі труби діаметром 50 мм, довжиною 3 м.

Заземлювачі з'єднуються сталевую смугою 40×4 мм. Додатково встановлюються пристрої захисного відключення на струм витоку 30 мА з часом спрацювання не більше 0,3 с.

Для зниження шуму передбачається встановлення шумоглушників трубчастого типу довжиною 1,5 м в повітроводах, що забезпечує зниження на 15-20 дБА. Джерела шуму розміщуються на максимальній відстані від оператора. Для комп'ютера використовується безшумний блок живлення, механічний диск замінюється на SSD.

Звукопоглинання забезпечується акустичною обробкою огорожувальних поверхонь. На стелі монтуються звукопоглинальні панелі з коефіцієнтом не менше 0,7, підлога виконується з ковrolіну на гумовій основі.

При 8-годинній зміні передбачаються дві регламентовані перерви по 15 хвилин через кожні 2 години роботи відповідно до [35]. Під час перерв оператор

виконує комплекс вправ виробничої гімнастики для зняття статичного напруження.

Комплекс включає вправи для очей (переведення погляду на віддалені предмети, кругові рухи), вправи для шийного відділу (повороти та нахили голови), вправи для плечового пояса (кругові рухи плечима) та вправи для тулуба (нахили, повороти). Виконується протягом 5-7 хвилин.

В операторській створюється зона короточасного відпочинку з м'яким кріслом. Кольорове оформлення виконується в спокійних тонах (світло-бежевий, світло-зелений).

Робочий стіл повинен мати розміри 160×80 см з регульованою висотою 680-800 мм відповідно до [28]. Робоче крісло обирається з регулюванням висоти сидіння 400-550 мм, наявністю спинки з підтримкою поперекового відділу та підлокітниками.

Монітори розміщуються на відстані 600-700 мм від очей, верхня частина екрану на рівні або трохи нижче лінії очей. Основний монітор розміщується безпосередньо перед оператором, додаткові – під кутом 30-40°.

Клавіатура розміщується на відстані 100-300 мм від краю стола з м'яким упором для зап'ястя. НМІ-панель встановлюється під кутом 15-20° на зручній висоті, розмір кнопок на екрані – не менше 15×15 мм.

Відповідно до [25], всі оператори проходять вступний інструктаж при прийнятті на роботу. Первинний інструктаж на робочому місці тривалістю не менше 8 годин включає ознайомлення з специфічними небезпеками та діями в аварійних ситуаціях.

Повторний інструктаж проводиться не рідше одного разу на 6 місяців. Програма навчання включає законодавство про охорону праці, виробничі фактори, електробезпеку, режими праці та відпочинку, ергономіку робочого місця, дії при пожежі та надання першої допомоги.

Таблиця 2.18

Ергономічні параметри організації робочого місця

Параметр	Рекомендоване значення	Обґрунтування
----------	------------------------	---------------

Висота робочої поверхні	680-800 мм (регул.)	Відповідність зросту [28]
Відстань до монітора	600-700 мм	Оптимальна для зорової роботи [33]
Кут нахилу екрану	10-20° від вертикалі	Перпендикулярність лінії зору
Висота верхнього краю екрану	На рівні очей або нижче	Виключення напруження м'язів ший
Відстань клавіатури від краю	100-300 мм	Можливість спирання зап'ястя
Висота сидіння крісла	400-550 мм (регул.)	Прямий кут в колінних суглобах

2.7.4 Засоби індивідуального та колективного захисту

Враховуючи специфіку умов праці, необхідність у спеціальному одязі відсутня. При огляді обладнання в машинному залі оператор використовує захисну каску відповідно до [37], захисні окуляри згідно [38] при роботі з електрообладнанням під напругою.

Діелектричні рукавиці для роботи в електроустановках до 1000 В застосовуються при виконанні операцій на обладнанні під напругою. Рукавиці проходять електричні випробування напругою 6 кВ один раз на 6 місяців. Діелектричні килимки товщиною не менше 4 мм розміщуються перед щитами електрообладнання відповідно до [34].

Система примусової вентиляції продуктивністю 360 м³/год забезпечує кратність повітрообміну не менше 3 год⁻¹. Вентиляційна установка обладнується фільтрами класу F7 для очищення припливного повітря.

Система кондиціонування прецизійного типу забезпечує підтримання температури 22±1°C та вологості 50±5% з холодопродуктивністю 5 кВт. Підлога виконується з антистатичного покриття з питомим опором 10⁶-10⁹ Ом.

Система пожежної сигналізації виконується на базі адресних димових сповіщувачів з кроком не більше 9 м згідно [39]. Операторська обладнується вуглекислотними вогнегасниками ВВК-2 (2 шт.) та порошковим вогнегасником ВП-5 (1 шт.). Медична аптечка першої допомоги розміщується в шафі з легким доступом відповідно до [40].

Таблиця 2.19

Норми забезпечення засобами захисту

Засіб захисту	Кількість	Термін використання	Документ
Каска захисна	1 шт.	До зносу	[37]
Окуляри захисні	1 шт.	До зносу	[38]
Рукавиці діелектричні	1 пара	Випробування 1 раз на 6 міс.	[34]
Килимок діелектричний	1 шт.	Випробування 1 раз на рік	[34]
Вогнегасник ВВК-2	2 шт.	Перевірка 1 раз на рік	[39]
Вогнегасник ВП-5	1 шт.	Перевірка 1 раз на рік	[39]

2.7.5 Організація медичних оглядів та профілактичних заходів

При прийнятті на роботу кандидати проходять попередній медичний огляд згідно [41] для виявлення протипоказань до роботи з комп'ютерною технікою. Обсяг огляду включає обов'язкову участь терапевта, невропатолога, офтальмолога та отоларинголога.

Офтальмолог проводить детальне обстеження: визначає гостроту зору, досліджує рефракцію ока, вимірює внутрішньоочний тиск. Обов'язковий перелік досліджень включає загальний аналіз крові та сечі, біохімічний аналіз крові, електрокардіографію, флюорографію.

Медичні протипоказання включають органічні захворювання ЦНС, епілепсію, психічні захворювання, гостроту зору нижче 0,5 на кращому оці з корекцією, гіпертонічну хворобу II-III ступеня, виражені порушення координації рухів.

Оператори підлягають періодичним оглядам один раз на два роки згідно [41] для робіт з комп'ютерною технікою понад 50% робочого часу. Особлива увага приділяється динаміці змін та виявленню ранніх ознак професійних захворювань: астенії, синдрому "сухого ока", міопії, остеохондрозу шийного відділу, тунельного синдрому.

За результатами лікарська комісія виносить висновок про придатність до роботи. Працівники з відхиленнями беруться на диспансерний облік з періодичністю оглядів один раз на рік.

Всі оператори забезпечуються безоплатним лікувально-профілактичним харчуванням згідно [42] у вигляді молока в кількості 0,5 літра в дні фактичної зайнятості. Рекомендується прийом адаптогенних препаратів (женьшень, елеутерокок) курсами по 3-4 тижні в осінньо-весняний період.

Для профілактики зорової втоми рекомендується курсовий прийом полівітамінних комплексів з підвищеним вмістом вітамінів групи В, вітаміну А та лютеїну. Курс проводиться 2 рази на рік тривалістю 1 місяць.

В медико-санітарній частині організовується кабінет фізіотерапії для надання профілактичних процедур. Для операторів з остеохондрозом призначається магнітотерапія, масаж комірцевої зони, лікувальна фізкультура. Психологічна підтримка здійснюється штатним психологом через індивідуальні консультації та групові тренінги з управління стресом.

2.7.6 Пожежна безпека

Операторська кімната відноситься до категорії В за вибухопожежною небезпекою згідно [43]. Пожежне навантаження становить близько 80 МДж/м². Основними джерелами запалення можуть бути коротке замикання в електропроводці та перегрів електронних компонентів.

Операторська розміщується в окремому приміщенні з негорючими огорожувальними конструкціями. Стіни виконані з цегляної кладки товщиною 380 мм, перекриття – залізобетонні плити товщиною 220 мм. Ступінь вогнестійкості будівлі – II, межа вогнестійкості несучих стін REI 90 відповідно до [44].

Площа приміщення 40 м² має два евакуаційні виходи: основний в коридор шириною 1,5 м та додатковий на зовнішню пожежну драбину. Відстань до виходу не перевищує 25 м згідно [45]. Двері відкриваються назовні з протипаниковими замками, ширина прорізів не менше 0,9 м.

Оздоблення виконується з матеріалів класу горючості Г1 відповідно до [47]. Стіни та стеля фарбуються водоемульсійними негорючими фарбами, підлога покривається лінолеумом класу КМ2. Меблі просочуються вогнезахисними складами.

Автоматична пожежна сигналізація виконується на базі адресно-аналогової системи з димовими сповіщувачами. Для приміщення 40 м² передбачається 6 сповіщувачів з кроком не більше 9 м згідно [39]. При спрацьовуванні двох сповіщувачів формується сигнал "Пожежа" з передачею на пульт пожежної охорони.

Ручні пожежні сповіщувачі встановлюються біля виходів на висоті 1,5 м з захистом від випадкового спрацьовування. Система оповіщення відноситься до 2-го типу та включає світлові покажчики "Вихід", евакуаційні світильники та звукові оповіщувачі з рівнем не менше 75 дБА.

Евакуаційне освітлення забезпечує освітленість не менше 0,5 лк згідно [32]. Світильники оснащуються акумуляторними батареями на 1 годину роботи. Щомісячно проводиться перевірка працездатності.

Операторська обладнується вуглекислотними вогнегасниками ВВК-2 (2 шт.) з вогнегасною здатністю 34В та одним порошковим вогнегасником ВП-5 з здатністю 55А, 233В. Вуглекислотні вогнегасники не залишають слідів та не пошкоджують апаратуру, придатні для електроустановок до 1000 В.

Вогнегасники розміщуються на висоті 1,5 м у легкодоступних місцях, позначаються знаками пожежної безпеки розміром не менше 200×200 мм згідно [46]. Щомісячно проводиться перевірка стану з оглядом корпусу та пускового пристрою. Один раз на рік вогнегасники проходять обслуговування на спеціалізованій станції.

Таблиця 2.20

Технічні характеристики первинних засобів пожежогасіння

Тип вогнегасника	Маса ВР, кг	Вогнегасна здатність	Робочий тиск, МПа	Довжина струменя, м	Час дії, с	Кількість
ВВК-2	2	34В, до 1000В	5,8	8	6-8	2 шт.
ВП-5	5	55А, 233В, С, до 1000В	1,6	3-4	10-15	1 шт.

При виявленні ознак пожежі оператор повідомляє за телефоном 101, інформує чергового по цеху, приступає до евакуації людей та при відсутності загрози ліквідує осередок загоряння первинними засобами відповідно до [49].

При гасінні електрообладнання вогнегасниками обов'язково попередньо відключити напругу. Гасіння вуглекислотними вогнегасниками під напругою до 1000 В дозволяється з відстані не менше 1 м в діелектричних рукавицях. Евакуація через задимлене приміщення проводиться пригнувшись або повзком.

Всі оператори проходять протипожежний інструктаж при прийнятті на роботу та повторно не рідше одного разу на рік. Програма включає причини пожеж, характеристики пожежної небезпеки обладнання, обов'язки та дії при пожежі, способи гасіння, розташування засобів пожежогасіння та шляхи евакуації. Щорічно проводяться навчальні евакуації для відпрацювання дій при надзвичайних ситуаціях.

Проведений аналіз умов праці на робочому місці оператора автоматизованої системи керування виявив комплекс шкідливих і небезпечних факторів, характерних для роботи з комп'ютерною технікою в умовах підвищеного нервово-психічного напруження. Основними факторами є недостатня освітленість (280-320 лк при нормі 300-500 лк), відхилення параметрів мікроклімату (температура до 28°C влітку, вологість до 25% взимку), тривале статичне навантаження, підвищене навантаження на зоровий аналізатор та небезпека ураження електричним струмом.

Запропонований комплекс заходів забезпечує зниження впливу факторів до безпечного рівня. Модернізація системи вентиляції та встановлення прецизійного кондиціонера забезпечить оптимальні параметри мікроклімату. Оптимізація освітлення з комбінованою схемою дозволить досягти нормативної освітленості 400-500 лк. Ергономічна організація робочого місця з регульованими меблями знизить статичне навантаження на опорно-руховий апарат.

Виконання системи захисного заземлення з опором не більше 4 Ом та встановлення пристроїв захисного відключення на струм 30 мА забезпечить електробезпеку при роботі з обладнанням 220 В. Організація раціональних режимів праці з перервами по 15 хвилин через кожні 2 години та виконанням комплексу вправ дозволить попередити перевтому.

Система протипожежного захисту, що включає автоматичну пожежну сигналізацію, систему оповіщення та управління евакуацією, евакуаційне освітлення та первинні засоби пожежогасіння, відповідає вимогам нормативних документів та забезпечує своєчасне виявлення загоряння і безпечну евакуацію людей.

Організація обов'язкових попередніх та періодичних медичних оглядів операторів дозволяє своєчасно виявляти протипоказання до роботи та ранні ознаки професійних захворювань. Комплекс профілактичних заходів (лікувально-профілактичне харчування, вітамінотерапія, фізіотерапія,

лікувальна фізкультура, психологічна підтримка) спрямований на підтримку здоров'я працівників та попередження розвитку професійної патології.

Впровадження розробленого комплексу заходів створить безпечні та комфортні умови для ефективної трудової діяльності, знизить ризик виробничого травматизму та професійних захворювань, підвищить продуктивність праці операторів. Економічний ефект складається з економії на компенсаціях за роботу в несприятливих умовах, зниження витрат на лікування професійних захворювань та підвищення якості управління технологічним процесом.

ВИСНОВКИ

У випускній кваліфікаційній роботі магістра вирішено важливе виробниче завдання – розроблено автоматизовану систему регулювання натягнення металу у валках шестиклітьового прокатного стану 500 цеху Блюмінг ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», що забезпечує режим вільної прокатки без натягу та підпору між клітями.

Основні результати роботи:

Проведено комплексний аналіз технологічного процесу прокатки на стані 500 та виявлено критичні недоліки існуючого ручного режиму керування: тривалість налаштування після запуску 15-25 хвилин, брак через перекручений профіль 2,3% від обсягу виробництва, середня кількість аварійних зупинок 4,2 на добу. Встановлено, що основною причиною цих проблем є висока залежність якості процесу від кваліфікації та психофізіологічного стану операторів.

Виконано порівняльний аналіз п'яти методів регулювання міжклітьового натягу металу: багатоетапного регулювання моментів приводів, пропорційно-інтегральної корекції на основі аналізу струмів, безпосереднього вимірювання зусилля натягу тензодатчиками, контролю потужності приводів та методу на основі вимірювання часу прокатки. Обґрунтовано вибір методу контролю часу прокатки як оптимального за критеріями точності (погрішність не більше 5%), надійності, простоти реалізації та економічної ефективності для умов експлуатації стану 500.

Розроблено функціональну схему автоматизованої системи на базі програмованого контролера ADAM-5630KW (Advantech) з модульною архітектурою. Система включає: модуль аналогового введення ADAM-5017H (8 каналів, 16-біт АЦП) для прийому сигналів від перетворювачів струму PSA-01, модуль аналогового виведення ADAM-5028 (8 каналів, 12-біт ЦАП) для формування керуючих сигналів на тиристорні перетворювачі електроприводів, HMI-панель ADAM-6066 для візуалізації параметрів процесу. Час опитування

датчиків складає 10 мс, що забезпечує точність визначення моментів входу/виходу металу ± 50 мс при максимальній швидкості прокатки 6,5 м/с.

Розроблено алгоритм керування, що реалізує принцип регулювання на основі закону рівності секундних об'ємів металу. Алгоритм забезпечує: циклічне опитування струмів клітей з частотою 100 Гц, визначення та запам'ятовування моментів захоплення/викиду металу, ідентифікацію режиму прокатки (вільна, з підпором, з натягом), формування коригувальних сигналів для регуляторів швидкості електроприводів на основі порівняння часів прокатки в суміжних клітках. Система автоматично обмежує темп зміни швидкості для уникнення ударних навантажень на механічну частину приводів.

Виконано технічні розрахунки параметрів системи. Розраховано погрішності вимірювань: методична погрішність визначення моменту захоплення становить 0,325 м (2,98% від мінімальної довжини розкату 10,9 м), погрішність виміру часу прокатки не перевищує 1%. Визначено оптимальний період знімання інформації 10 мс. Розраховано систему захисного заземлення: для забезпечення опору розтікання 4 Ом при питомому опорі ґрунту 100 Ом·м необхідно 16 вертикальних заземлювачів (труби Ø50 мм, довжина 3 м), з'єднаних сталевую смугою 40×4 мм.

Виконано економічне обґрунтування проекту. Загальні капіталовкладення становлять 393,5 тис. грн, у тому числі: технічні засоби 226,5 тис. грн, програмне забезпечення та проектування 92 тис. грн, монтажні та пусконаладжувальні роботи 75 тис. грн. Економія від скорочення часу простоїв складає 288 тис. грн/рік (16 годин при вартості простою 18 тис. грн/год). Чиста річна економія після вирахування експлуатаційних витрат (амортизація 63,7 тис. грн, поточний ремонт 5,1 тис. грн, електроенергія 6,8 тис. грн) становить 212,4 тис. грн. Термін окупності проекту – 2,26 року, що відповідає критеріям економічної ефективності підприємства.

Розроблено комплекс заходів з охорони праці для робочого місця оператора автоматизованої системи. Заходи включають: встановлення прецизійної системи кондиціонування продуктивністю 360 м³/год для підтримання температури

$22\pm 1^{\circ}\text{C}$ та вологості $50\pm 5\%$, оптимізацію освітлення (комбінована система з освітленістю 400-500 лк, колірна температура 4000-4500 K), забезпечення електробезпеки (система заземлення з опором 4 Ом, пристрої захисного відключення на струм 30 мА), організацію раціональних режимів праці (перерви по 15 хв через кожні 2 години з комплексом фізичних вправ), ергономічну організацію робочого місця (регульований стіл 680-800 мм, крісло з підтримкою поперекового відділу, відстань до моніторів 600-700 мм). Розроблено систему протипожежного захисту з адресною пожежною сигналізацією (6 димових сповіщувачів для приміщення 40 м^2) та первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники ВВК-2 – 2 шт., ВП-5 – 1 шт.).

Практична цінність роботи полягає у створенні реальної промислової системи, готової до впровадження на підприємстві. Використання методу контролю часу прокатки дозволило уникнути встановлення дорогих тензометричних датчиків та реалізувати систему на базі існуючих струмових шунтів електроприводів, що суттєво знизило капітальні витрати. Модульна архітектура системи забезпечує гнучкість налаштування під різні сортаменти продукції та можливість поетапного нарощування функціональності.

Очікуваний ефект від впровадження системи:

- автоматичне налаштування швидкісних режимів після кожного запуску стану з скороченням часу з 20 до 15 хвилин;
- забезпечення рівномірності профілю заготовок по всій довжині розкату;
- зниження виходу браку через перекручений профіль з 2,3% до прогнозованих 1,5%;
- зменшення кількості аварійних зупинок з 4,2 до прогнозованих 2,0 на добу;
- підвищення точності розкрою металу та зменшення виходу немірних довжин;
- створення інформаційної бази для подальшого вдосконалення технологічного процесу.

Розроблена система відповідає сучасним принципам індустрії 4.0 – гнучкості, інтелектуальності, енергоефективності – та забезпечує підвищення конкурентоспроможності продукції підприємства на світовому ринку.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Прокатка злитків і виробництво заготовок у цеху Блюмінг № 2, ТІ 228-Б2-02-2010.
2. Шинкаренко, В. Ф., Гребеник, В. М., & Грудєв, А. П. (2005). Система автоматичного регулювання міжклітьового натягу на безперервних станах. *Обробка матеріалів тиском*, 2(13), 88-92.
3. Ginzburg, V. B., & Ballas, R. (2000). *Flat rolling fundamentals*. New York: Marcel Dekker.
4. Бурьков, В. В., & Юнгер, І. Б. (1998). Спосіб завдання швидкісного режиму безперервної групи прокатних клітей стану гарячої прокатки металу. Патент України № 23186А, МПК В21В 37/00.
5. Pittner, J., & Simaan, M. A. (2011). *Tandem cold metal rolling mill control: Using practical advanced methods*. London: Springer-Verlag.
6. Коцарь, С. Л., Пятайкін, Є. М., & Лохматова, Н. М. (2013). Автоматизація технологічних процесів та виробництв металургійної промисловості. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*, 60(1033), 74-82.
7. Bryant, G. F. (1973). *Automation of tandem mills*. London: The Iron and Steel Institute.
8. Іванченко, Ф. К., Красношاپка, В. А., & Паршин, В. С. (2001). Динаміка та міцність прокатного устаткування. Київ: Вища школа.
9. Edwards, W. J., & Spooner, P. D. (2013). Analysis of inter-stand tension control methods in tandem cold rolling mills. *Iron and Steel Technology*, 10(8), 59-68.
10. Lenard, J. G., Pietrzyk, M., & Cser, L. (1999). *Mathematical and physical simulation of the properties of hot rolled products*. Oxford: Elsevier.
11. Salganik, V. M., & Pesin, A. M. (2014). Mathematical model of wide strip cold rolling with account of strip edge drop. *Procedia Engineering*, 81, 1543-1548.
12. Федоров, В. В., & Коцюба, І. В. (2019). Сучасні системи автоматизації прокатного виробництва. *Металургія: наукові праці Запорізької державної*

інженерної академії, 1(41), 56-63.

13. Tselikov, A. I., Nikitin, G. S., & Rokotyan, S. E. (1981). *Theory of longitudinal rolling*. Moscow: Mir Publishers. (English translation)

14. Ginzburg, V. B. (1989). *Steel-rolling technology: Theory and practice*. New York: Marcel Dekker.

15. Roberts, W. L. (1983). *Hot rolling of steel*. New York: Marcel Dekker.

16. Danchenko, V., Krot, P., & Matsyuk, I. (2017). Features of vibration signals for rolling mills with multimotor drives. *Acta Mechanica et Automatica*, 11(4), 304-310.

17. Shapoval, A. A., Druzhinin, M. A., & Markov, O. E. (2016). Удосконалення технології гарячої прокатки заготовок. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*, 42(1214), 109-116.

18. King, R. P., & Harrison, J. W. (1995). Modern control systems for hot strip mills. *Iron and Steelmaker*, 22(10), 41-47.

19. Chekmarev, A. P., & Velichko, O. H. (2007). Калібрування прокатних валків. Дніпропетровськ: РВА "Дніпро-ВАЛ".

20. Сьомін, О. Є., & Коваленко, В. О. (2018). Мікропроцесорні системи керування електроприводами прокатних станів. *Електротехніка та електроенергетика*, 2, 35-42.

21. Müller, M. (2008). Real-time optimization of rolling mill control. *Steel Research International*, 79(3), 183-191.

22. Василевський, О. М., & Омельчук, А. О. (2015). Автоматизовані системи керування прокатним виробництвом. Київ: Політехніка.

23. Montague, R. A., Watton, J., & Brown, K. J. (2009). Improved cold rolling strip thickness setup utilizing gauge meter data and a metallurgical model. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(6), 453-459.

24. Технологічна та економічна служба цеху Блюмінг. Внутрішні дані підприємства. 2025 р.

25. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-XII (зі

змiнами).

26. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

27. ДНАОП 0.03-3.22-10. Перелік робіт, де є потреба у професійному доборі. Порядок проведення медичних оглядів працівників певних категорій.

28. ДСТУ ISO 9241-5:2004. Ергономічні вимоги до роботи з відеотерміналами в офісі. Частина 5. Компонування робочого місця та вимоги до пози користувача.

29. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування.

30. ДНАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці.

31. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

32. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.

33. ДСТУ ISO 9241-3:2004. Ергономічні вимоги до роботи з відеодисплейними терміналами в офісі. Частина 3. Вимоги до відеодисплеїв.

34. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів.

35. Наказ МОЗ України від 08.07.2014 № 248 «Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу».

36. НПАОП 0.00-4.26-05. Типове положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту.

37. ДСТУ EN 397:2002. Засоби індивідуального захисту. Каски захисні промислові.

38. ДСТУ EN 166:2002. Засоби індивідуального захисту очей. Технічні умови.

39. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту.

40. Наказ МОЗ України від 04.03.2020 № 586 «Про затвердження Інструкції з надання першої допомоги потерпілим при нещасних випадках».
41. Наказ МОЗ України від 21.05.2007 № 246 «Про затвердження Порядку проведення медичних оглядів працівників певних категорій».
42. Постанова КМУ від 12.05.2007 № 437 «Про затвердження переліку робіт, де є потреба у професійному доборі, та Порядку його проведення».
43. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.
44. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.
45. ДБН В.2.2-9:2018. Будинки і споруди. Громадські будинки та споруди. Основні положення.
46. ДСТУ ISO 3864-1:2004. Графічні символи. Кольори та сигнальні знаки безпеки.
47. ДСТУ Б В.2.7-19:2010. Будівельні матеріали. Методи випробувань на горючість.
48. НАПБ Б.03.001-2018. Правила пожежної безпеки в Україні.
49. Наказ МВС України від 26.10.2018 № 850 «Про затвердження Порядку організації службової підготовки працівників Державної служби України з надзвичайних ситуацій».



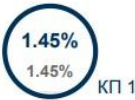
Звіт подібності

Метадані

Назва організації		підрозділ		
STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY		STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY		
Заголовок				
174-6д-2026вrm				
Автор		Науковий керівник / Експерт		
174-6д-2026вrm		Молдло Є.О.		
Кількість слів	Кількість символів	Дата звіту	Дата редагування	ІД документа
15348	115828	1/14/2026	1/14/2026	333104766

Обсяг знайдених подібностей

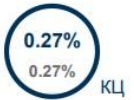
Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



КП 1

15348

Кількість слів



КЦ

115828

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		69
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		14

Джерела

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

Колір тексту

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	https://zakon.rada.gov.ua/go/v2178295-08	50 0.33 %
2	http://www.arcelormittal.com.ua/doc/eko/inf_dozvil_20190128.pdf	25 0.16 %
3	http://www.arcelormittal.com.ua/doc/eko/inf_dozvil_20190128.pdf	18 0.12 %
4	https://zakon.rada.gov.ua/go/v2178295-08	14 0.09 %
5	https://zakon.rada.gov.ua/go/v2178295-08	12 0.08 %

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, *Науменко Денис Васильович*, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна магістерська (бакалаврська) робота (назва роботи повністю) виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав(ла) і не одержував(ла) недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

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

Також я поінформований(на), що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомлений(на) з умовами такого розміщення.

01.06. 2025