

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

ННІ/факультет	<u>Навчально-науковий технологічний інститут</u>
Кафедра	<u>Електричної інженерії та автоматизації</u>
Спеціальність	<u>151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології</u>
Форма навчання	<u>денна</u>

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи

бакалавра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

Хороз Юрій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Автоматизація металургійного виробництва. Система
автоматичного регулювання розрізу прокату кільцеровкатного стану»

(повна назва теми)

за матеріалами _____

(повна назва бази дослідження)

науковий керівник	PhD	_____	Соломенко А.Г.
	(наук. ступінь, вчене звання)	(підпис)	(прізвище, ініціали)

Робота допущена до захисту в ЕК

Протокол засідання кафедри

від _____ 20__ р. № _____

Завідувач кафедри

(підпис)

Є.О. Модло

Наук. ступінь, вчене звання

Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра Електричної інженерії і автоматизації

Рівень вищої освіти бакалавр

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Електричної інженерії і автоматизації

В.о. зав. каф.

Модло Є.О.

(підпис)

(посада, вчене звання,
прізвище ініціали)

«___» _____

2026__ року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ(КИ)

Хороз Юрій Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи бакалавра Автоматизація металургійного виробництва. Система автоматичного регулювання розрізу прокату кільцезоркатного стану

керівник кваліфікаційної роботи PhD, Соломенко А.Г.

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

затверджені наказом закладу вищої освіти від «06»04.2026 р. № 239-ст

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи до кафедри 01.06.2026

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи бакалавра: статті, патенти, промислові дослідження

Об'єкт розробки і дослідження – система автоматичного регулювання розрізу прокату кільцезоркатного стану

Характер навантаження – робота в тривалому режимі

Тип системи автоматизації: Автоматична система регулювання (САР) з використанням технічного зору та замкнутим контуром зворотного зв'язку. Автоматизована електрогідравлічна система керування розкаткою кілець з адаптивним регулюванням розмірів

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

4.1 Аналітична частина;

4.2 Основна частина.

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

1 Загальний вигляд низькотемпературного сепаратору високого тиску

2 Функціональна схема

3 Структурна схема

4 Принципова електрична схема

5 Схема моделювання

6 Алгоритм системи

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

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

7. Дата видачі завдання «06» ____ 04 _____ 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	Аналітична частина	29.04.2026	
2.	Основна частина	06.05.2026	
3.	Оформлення пояснювальної записки	13.05.2026	
4.	Виконання графічної частини	25.05.2026	
5.	Подання роботи до кафедри	01.06.2026	
6.	Захист роботи в ЕК	19.06.2026	

Студент

_____ *Хороз Ю.Р.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ *Соломенко А.Г.*
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Хороз Ю. Р. «Автоматизація металургійного виробництва. Система автоматичного регулювання розрізу прокату кільцеровкатного стану» - Бакалаврська робота. - Кривий Ріг, 2026. 65 с., 24 рис., 13 табл., 19 джерел.

Об'єктом розробки є система автоматичного регулювання розміру прокату на кільцеровкатному стані.

Мета роботи полягає в оптимізації процесу розкатки кілець за допомогою модернізації вимірювального комплексу стану.

У роботі розроблено систему автоматичного регулювання (САР) кільцеровкатного стану, що базується дворівневій архітектурі керування гідравлічними приводами. Реалізовано алгоритм прецизійного контролю зусилля деформації за допомогою прямого оптичного вимірювання геометричних параметрів прокату, що дозволило мінімізувати вплив люфтів та механічних похибок обладнання. У середовищі MATLAB/Simulink створено імітаційну модель системи з ПІД-регуляторами, результати якої підтвердили стабільність динамічних характеристик та ефективність роботи контурів зворотного зв'язку. Впровадження розробленого рішення забезпечує гарантовану геометричну точність виробів, суттєве зменшення металомісткості виробництва та оптимізацію енерговитрат на виробництві.

Отримані результати та технічні рішення можна використати як базу для проектування комплексної системи автоматизації кільцеровкатного стану.

КІЛЬЦЕРОЗКАТНИЙ СТАН, АВТОМАТИЧНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, РОЗМІР ПРОКАТУ, МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА, ЦИФРОВА ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА, ДАТЧИКИ ПОЛОЖЕННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРІЇ, ТОЧНІСТЬ ПРОКАТКИ

ВСТУП

Протягом 2022–2026 років українська металургія зіткнулася з жорсткими викликами. Головні проблеми зараз - це дефіцит енергоресурсів, дорожня сировини та втрата звичних логістичних ланцюгів. У таких умовах підприємства змушені економити кожен кілограм металу та кожен кіловат-годину. Кільцеровкатні стани виробляють критично важливу продукцію. Це безшовні кільця для машинобудування, оборонного сектору та відновлення інфраструктури. Будь-який брак тут коштує надто дорого. Головна проблема старого обладнання полягає в ручному або напівавтоматичному контролі геометрії. Через це виникає великий припуск на подальшу механічну обробку. Метал просто йде у стружку. Сучасне виробництво вимагає високої точності геометричних параметрів кілець. Традиційні методи контролю на станах не встигають за швидкістю деформації металу. Це призводить до появи браку та перевитрати дорогої сировини. Модернізація систем автоматичного регулювання розрізу вирішує цю проблему. Вона дозволяє стабілізувати якість продукції в реальному часі. Ефективна робота кільцеровкатного стану неможлива без точних первинних даних. Старе вимірювальне обладнання має високу похибку та низьку швидкість реакції. Впровадження цифрових датчиків і мікропроцесорної техніки дозволяє усунути ці недоліки. Нова система швидше обробляє сигнали та миттєво коригує положення валків. Такий підхід мінімізує вплив людського фактора на технологічний процес. Розроблені технічні рішення можна одразу впроваджувати на діючих металургійних підприємствах. Модернізація вимірювального комплексу дозволить зменшити допуски на подальшу механічну обробку кілець. Це суттєво знижує собівартість готової продукції та економить енергоресурси. Створені алгоритми управління є універсальними і підходять для автоматизації подібних прокатних станів.

Розробка системи автоматичного регулювання розрізу прокату повністю вирішує цю проблему. Вона дозволяє стабілізувати розміри виробу в реальному часі. Автоматизація зменшує вплив людського фактора та мінімізує витрати

металу. Ми отримуємо вищу якість кілець за меншої собівартості. Це робить українську продукцію конкурентоспроможною навіть у кризових умовах.

Для реалізації цих завдань необхідно детально вивчити технологічний процес. У наступному розділі проведено аналіз існуючих алгоритмів керування кільцеразкатним станом та визначено оптимальні параметри для нової системи.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Характеристика об'єкту автоматизації, опис технологічного процесу, огляд існуючих рішень та розробка основних вимог до системи

1.1.1 Загальні відомості про виробництво

Історія підприємства «Констар» розпочалася у 1976 році. Тоді у Кривому Розі створили турбінний завод «Восход». Його головним завданням стало забезпечення нафтогазової галузі потужними газотурбінними двигунами та газоперекачувальними комплексами. Вже у 1983 році завод випустив свій перший самостійний агрегат ГПА-10. Він працював на базі суднового двигуна ДР59Л. Згодом підприємство налагодило масове виробництво цієї техніки. Лінійку продукції швидко розширили. Конструктори освоїли випуск двигунів ДО49 для мобільних станцій, генераторів ГТГ-12В та іншого обладнання.

У 1994 році ринкова ситуація різко змінилася. Завод реорганізували у ПАТ «Криворізький турбінний завод «Констар». Це дало поштовх для повної зміни стратегії. Підприємство почало шукати нові ринки та диверсифікувати виробництво. Асортимент поповнився турбодетандерними установками, які переробляли енергію тиску газу в електрику. Також запустили виготовлення нафтової арматури для свердловин та магнітних сепараторів для гірничо-збагачувальних фабрик.

Сьогодні завод є стабільним виробничим майданчиком. Його обладнання працює на українському та міжнародному ринках. Серед ключових партнерів підприємства - відомі гіганти металургії, машинобудування та енергетики, включаючи ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», «Нафтогаз» та закордонні машинобудівні компанії.

Особливе місце в структурі займає ковальсько-пресовий цех. Завод має сучасний комплекс для виготовлення поковок, штамповок та розкатаних кілець із різних марок сталі. Технічні потужності дозволяють створювати безшовні

кільця вагою до 600 кг і діаметром від 0,5 до 2 метрів. Також тут роблять деталі для турбін, вали та диски.

Підприємство володіє унікальними технологіями обробки жароміцних та нержавіючих сплавів. Завод сам виконує фінішну механічну обробку виробів з точними допусками. Для цього діє термічна ділянка з газовими та електричними печами. Вся готова продукція повністю відповідає жорстким світовим стандартам якості. Протягом 2022–2026 років робота підприємства ПАТ «Констар» перейшла у формат кризового менеджменту. Завод зіткнувся з наслідками тривалого процесу реструктуризації, боргами та загальною нестабільністю в країні. Великі замовлення на турбіни практично припинилися. Зараз виробничі площі частіше використовуються в межах оренди окремих цехів. Штат працівників суттєво скоротився, проте ковальсько-пресовий комплекс продовжує періодично виконувати точкові замовлення на сепаратори та кільцеву продукцію для промислових підприємств регіону.

Така ситуація в період 2022–2026 років вимагає кардинальної зміни підходів до виробництва. Утримання застарілого та енергомісткого обладнання стає нерентабельним. Робота ковальсько-пресових ліній у напівавтоматичному режимі призводить до перевитрат металу та енергії. В умовах дефіциту ресурсів кожен дефектний виріб приносить прямі збитки.

Це напряму пов'язує стан заводу з темою випускної роботи. Впровадження системи автоматичного регулювання розрізу прокату на кільцеровкатному стані дозволяє оптимізувати залишки ковальського цеху. Автоматизація контролю геометрії кілець зменшує припуски на подальшу обробку деталей. Завод отримує можливість економити дефіцитний метал, знижувати споживання електрики та газу на нагрів. Модернізація системи керування стає єдиним способом зберегти конкурентоспроможність та відновити ефективне виробництво поковок на базі наявних потужностей.

1.2 Опис технологічного процесу прокатки на кільцеровкатному стані

1.2.1 Технологічний процес виробництва катаних кілець

Виготовлення безшовних кілець на криворізькому заводі «Констар» - це складний комплекс термічних та деформаційних операцій. Ковальський цех підприємства має все необхідне обладнання для повного циклу обробки. Сюди входять нагрівальні печі, завантажувальні маніпулятори, гідравлічний прес та безпосередньо кільцеровкатний стан.

Технологія базується на пластичній деформації гарячого металу. Спочатку заготовки завантажують у печі. Там їх розігрівають до температури 1120-1180 °С. Точний рівень нагріву залежить від марки сталі. Нагрітий блок подають на прес для осаджування під задані технологічні розміри. Далі виконують прошивку отвору. Щоб прошивне розганяло не застрягло в гарячому металі, у зону обробки додають вугільний пил. Під дією високої температури він виділяє газ. Цей тиск допомагає виштовхнути інструмент із деталі. Відходи після прошивки (видри) відправляють на переплавку. Після цього майбутнє кільце знову нагрівають до температури прокатки.

Коли заготовка досягає потрібного термічного стану, маніпулятор переносить її на робочий стіл кільцеровкатного стану. Оператор починає процес формування виробу. Розкатка може відбуватися за один або кілька етапів. Кількість підходів визначається геометрією кільця та властивостями сталі. Саме на цьому етапі виникає головна технологічна проблема, яка обґрунтовує тему випускної роботи. Під час розкатки оператор контролює розміри візуально або за допомогою застарілих приладів. Метал деформується швидко, через що важко впіймати точний момент зупинки. Як наслідок, геометричний розріз кільця виходить із відхиленнями. Впровадження системи автоматичного регулювання розрізу прокату дозволяє вирішити цю проблему. Автоматика контролює товщину стінки та діаметр у реальному часі. Сигнали з датчиків коригують положення валків без участі людини. Це гарантує стабільну форму виробу.

Готові гарячі кільця по рольгангу переміщуються на ділянку охолодження. За потреби їх відправляють у термічні печі для загартування чи відпалу. На фінальній стадії кожна деталь проходить суворий контроль. Фахівці перевіряють точність геометричних розмірів та твердість металу. Після успішного тестування на кільце наносять клеймо та перевозять його на склад.

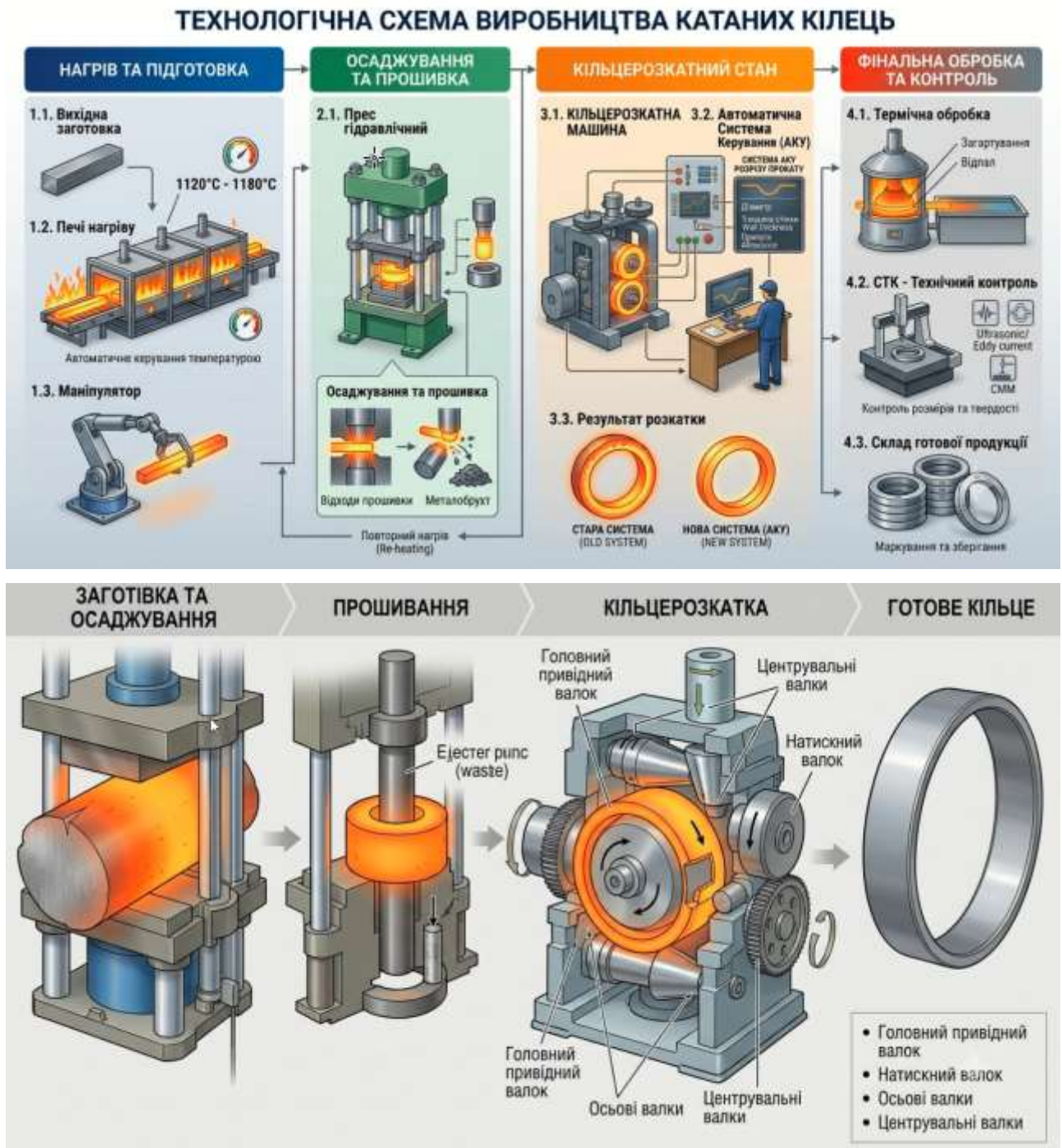


Рис. 1.1. Узагальнена технологічна схема виробництва катаних кілець

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Таблиця 1.1

Технологічна схема виробництва розкатаних кілець
Послідовність операцій та закріплене обладнання ковальсько-пресового цеху ПАТ «Констар»

№	Назва операції	Технологічний зміст операції	
1	Приймання та підготовка	Контроль вихідного металу у вигляді штампів чи бломів. Розвантаження, сортування за марками сталі та проведення первинної дефектоскопії.	Мостовий кран, інспекційні стелажі, прилади ультразвукового контролю.
2	Порізка на блоки	Поділ довгомірних металевих штанг на окремі штучні заготовки з точним дотриманням заданої маси та лінійних розмірів.	Прес-ножиці для холодної або гарячої різки, стрічковий верстат.
3	Нагрів під ковку	Термічна обробка металу в печі до температури 1120–1180 °С. Забезпечує високу пластичність і мінімальний опір під час деформації.	Газові або електричні методичні нагрівальні печі зі штовхальним механізмом.
4	Транспортування	Вивантаження розігрітого ковальського блоку з печі. Максимально швидка доставка до преса для запобігання охолодженню поверхні.	Рейковий або підлоговий ковальський маніпулятор з дистанційним керуванням.
5	Осаджування заготовки	Вертикальне стискання заготовки між бойками преса. Зменшує висоту деталі та пропорційно збільшує її зовнішній діаметр.	Гідравлічний ковальсько-пресовий комплекс (зусилля деформації 1000–3000 тонн).
6	Прошивання отвору	Формування центрального наскрізного отвору за допомогою прошивного розганяла. Вугільний пил запобігає заклинюванню. Видалення відходу (відри).	Гідравлічний прес (спеціалізована робоча позиція або інструментальний блок).
7	Повторний нагрів	Проміжне термічне кондиціонування пустотілої заготовки. Відновлює температуру розкатки та знімає поверхнєві напруження.	Камерні або кільцеві нагрівальні печі опору.
8	Кільцезоркатка (основна стадія)	Розкатка стінки кільця за товщиною та висотою до креслярських параметрів. Система автоматичного регулювання (САР) розрізу прокату безперервно коригує положення валків за сигналами датчиків.	Кільцезоркатний стан, модернізований контуром автоматичного керування (валок привідний, натискний, осові та центрувальні).
9	Охолодження	Транспортування гарячого виробу з робочої зони стану. Рівномірний розподіл деталей на майданчику для стабільного встигання.	Вихідний роликотий конвеєр (рольганг), завантажувальний маніпулятор.
10	Термічна обробка	Остаточна стабілізація мікроструктури сталі. Виконання відпалу, нормалізації або гартування для досягнення нормативних механічних властивостей.	Термічні газові або електричні печі, механізовані гартувальні баки.
11	Фінішна обробка та СТК	Видалення шару технологічної окалини. Механічна обробка припусків. Суворий інспекційний контроль геометрії розрізу та твердості готового виробу.	Дробоструминні камери, токарно-карусельні верстати, ультразвукові дефектоскопи, твердоміри.



Рис. 1.2. Основна стадія кільцезоркатки

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

1.2.2 Конструктивні особливості кільцезокатного стана

Станина агрегату та її верхня траверса виконані у вигляді суцільнозварених сталевих конструкцій підвищеної жорсткості. Головний привідний валок розміщений у спеціальній швидкозмінній касеті. Цей вузол змонтований у верхній зоні рамної конструкції машини. Процес фіксації та розблокування касети повністю автоматизований і запускається оператором з головного пульта керування. Комплектація стана двома такими касетами дозволяє проводити переналагодження та заміну робочого інструменту з мінімальними втратами часу.

Конструкція касети передбачає можливість її точного вертикального позиціонування. Це необхідно через те, що висота робочих бандажів змінюється залежно від габаритів оброблюваних кілець. Відхилення від базової висоти валка компенсуються за допомогою набору дистанційних розпірних втулок.

Обертання головного валка забезпечують електродвигуни постійного струму через редуктори з можливістю точного регулювання кутової швидкості. Силкові агрегати та трансмісія інтегровані всередину станини й частково заглиблені у фундамент. Передача крутного моменту від редуктора до валка здійснюється через зубчасту муфу з круговим профілем зубів. Важливо зазначити, що вся радіальна сила деформації під час прокатки генерується виключно головним валком. Швидкість його обертання регулюється плавно і безступінчасто. Це дозволяє гнучко підлаштовувати кінематику процесу під поточний стан металу.

Нижня опора розкатної оправки закріплена на радіальних санчатах, які здійснюють горизонтальне переміщення. Оправка має надійну двосторонню фіксацію як у нижній, так і у верхній точці. Кожна з цих опор оснащена індивідуальним гідроприводом. Завдяки цьому забезпечується не лише керований горизонтальний рух інструменту під навантаженням, а й його чітке підняття або опускання вздовж вертикальної осі.



Рис. 1.2. Зовнішній вигляд кільцєрозкатного стану

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

1.2.3 Особливості фіксації робочої оправки та обслуговування зони деформації

Конструктивне виконання швидкозмінної касети передбачає її базування на нижньому опорному вузлі оправки з можливістю вертикального регулювання положення (рис.1.3). Команди на затискання та фіксацію інструментального вузла подаються оператором дистанційно з центрального пульта керування. Для підвищення жорсткості та усунення вібрацій під час прокатки передбачено додаткове двостороннє утримування оправки.



Рис. 1.3. Зовнішній вигляд змінної касети

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Щойно вона досягає свого крайнього верхнього робочого положення, на її верхній кінець автоматично опускається верхня люнетна опора. Необхідне притискне зусилля створюється гідроциліндром, який надійно фіксує вал за допомогою конічних підшипникових втулок.

Транспортні операції, пов'язані із завантаженням вихідних пустотілих брусків та вивантаженням розкатаних кілець, здійснюються виключно у вихідному положенні каретки оправки. Ця зона відповідає максимальному лінійному видаленню деформаційного інструмента від головного привідного валка. Для забезпечення вільного простору під час маніпуляцій кранового обладнання верхня траверса опорного пристрою відводиться у бік головного валка. Завдяки такому просторовому зміщенню робоча зона прокатного столу залишається повністю відкритою зверху, що значно спрощує обслуговування агрегату та заміну оснащення.

1.2.4 Ділянка радіального пресування та кінематика деформації

В процесі прокатки верхня та нижня люнетні опори, що жорстко утримують робочу оправку з обох кінців, синхронно переміщуються по горизонтальних напрямних у бік головного привідного валка. Стабільність та узгодженість їхнього сумісного руху гарантується роботою дискретної електрогідравлічної системи стеження. Контур керування також дозволяє виконувати технологічне мікрорегулювання - зміщувати верхню опорну точку відносно нижньої в межах ± 5 мм для компенсації перекосів інструменту.

Для підвищення продуктивності агрегату та скорочення часу допоміжних операцій під час стикування елементів стана, механізм вертикального ходу верхньої опори оснащений функцією прискореного опускання. Величина цього швидкісного переміщення попередньо програмується за допомогою задавального потенціометра, розташованого в шафі керування електронікою. Після подолання цієї відстані на високій швидкості, верхній люнет плавно сідає на конічний хвостовик оправки з регламентованим робочим зусиллям притискання.

При обробці специфічного ряду кілець із внутрішнім фасонним профілем, геометрія якого унеможливорює стандартне виведення оправки вниз по завершенню циклу, застосовується альтернативна технологічна схема. У цьому

разі деформаційний вал залишається зафіксованим у верхній робочій позиції, а зняття готового виробу та подача нової заготовки здійснюються за допомогою спеціалізованого цехового вантажопідйомного маніпулятора.

Геометричні параметри та діаметри гідроциліндрів, що генерують деформаційні сили на верхній та нижній опорах, суттєво відрізняються між собою. Таке конструктивне рішення обумовлене необхідністю компенсації плеча прикладання сили (ефекту важеля) під час прокатки виробів різної висоти при незмінній довжині самої оправки. Завдяки такій конфігурації електрогідравлічного приводу забезпечується вихід на максимальні режими радіального тиску, що особливо критично для заготовок заввишки понад 150 мм. Безпосереднє радіальне зусилля прокатки формується як результат горизонтального притискання рухомої оправки, яка через стінку оброблюваного кільця передає силовий потік на нерухому вісь головного валка.

1.2.5 Ділянка осьового прокату

На основній рамі стана змонтована осьова кліть (рис.1.4). Вона може рухатися по горизонтальних напрямних на роликах. Цей вузол утримує конічні осьові валки. Верхній валок встановлений у вертикальних санчатах. Він переміщується вгору та вниз паралельно осям заготовки й головного валка. Завдяки цьому відбувається торцеве стискання кільця. Всі рухи та робочі зусилля кліті забезпечує гідравлічний привід.

Обидва торцеві валки мають спільний привід від одного електродвигуна постійного струму. Швидкість їхнього обертання змінюється автоматично. Вона синхронізована із частотою обертання головного валка.

Між робочими валками розташований вимірювальний ролик. Під час деформації він постійно торкається зовнішньої поверхні виробу. Датчики пристрою визначають поточний зовнішній діаметр кільця. Сигнал від цього ролика передається в головну систему керування станом для контролю всього технологічного циклу.

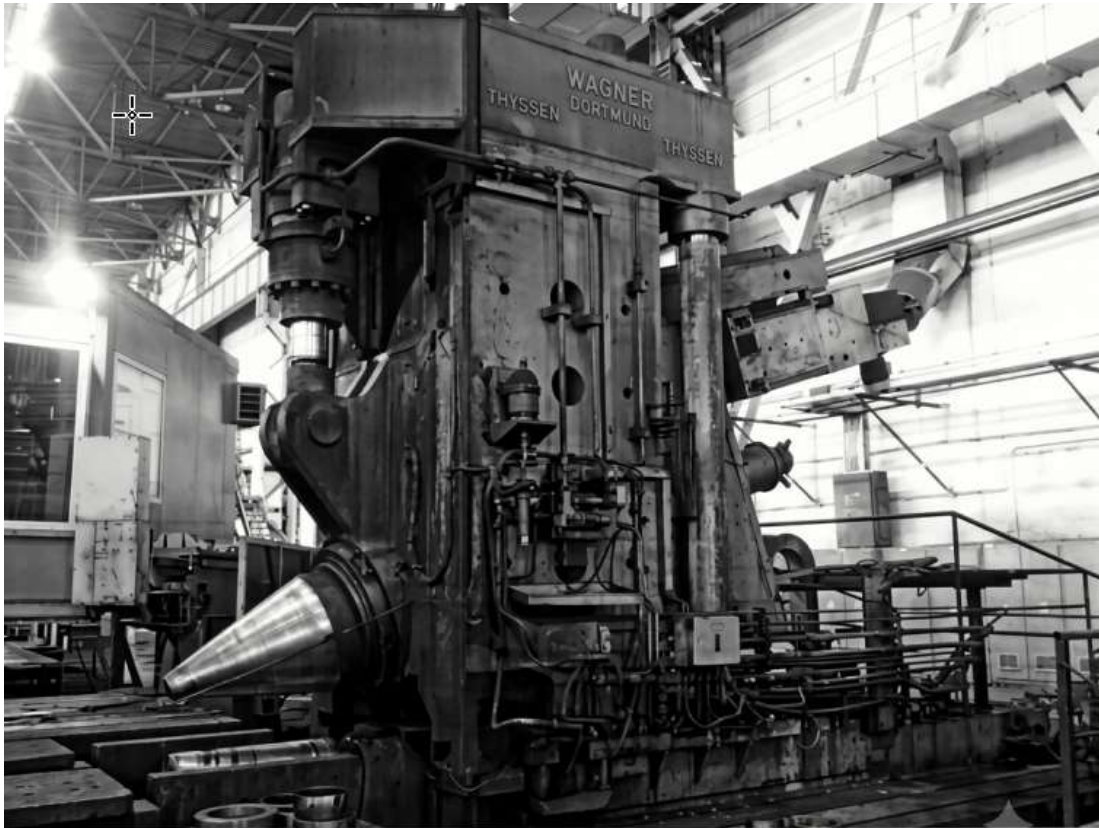


Рис. 1.4. Зовнішній вигляд аксіальної кліті

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

На початку обробки виникають сильні удари. Для захисту від цих динамічних навантажень ролик може тимчасово відводитися автоматикою.

Всі деталі машини мають високу міцність. Зубчасті колеса та передавальні вали виготовлені зі спеціальних сталей. Головний валок викований з легованого сплаву. Оправка зроблена з жароміцної інструментальної сталі для роботи з гарячим металом. Усі рухомі осі, вали та оправка закріплені у підшипниках кочення. Для утримання кільця під час деформації служить прокатний стіл. Він змонтований на радіальних санчатах і рухається по горизонталі на роликах. Висоту столу можна регулювати під конкретний розмір деталі. Точну геометрію та округлість виробу забезпечує центрувальний механізм. Він складається з двох роликів із вертикальними осями обертання. Ролики притискаються до кільця ззовні. Вони закріплені у знімних тримачах, тому їх легко знімати та встановлювати під час переналагодження стана.

1.2.6 Алгоритм автоматизованого циклу прокатки

Після активації селекторного перемикача робочий цикл починається з відведення вимірювального ролика в початкове (заднє) положення. Після завершення витримки часу, заданої на реле, вимірювальний пристрій автоматично притискається до кільцевої заготовки, розпочинаючи процес деформації згідно з програмою. Якщо заготовка набуває необхідної геометрії раніше, ніж завершиться таймер, оператор може вручну перервати автоматичний режим та перевести станок у ручне керування для завершення прокатки.

У процесі деформації діаметр кільця постійно збільшується. Для забезпечення якісної осьової прокатки без проковзування інструменту необхідно постійно коригувати положення заготовки відносно осьового калібру. Це завдання виконує система електронного автоматичного позиціонування осьової кліті.

Зміна розмірів кільця відстежується вимірювальним роликом. Його переміщення слугує сигналом для системи керування, яка в реальному часі регулює швидкість та величину зміщення кліті. Це дозволяє утримувати теоретичний центр осьових валків безпосередньо в середній площині кільця, створюючи ідеальні умови для стабільної обробки.

Для захисту обладнання від критичних навантажень передбачено динамічне обмеження зусилля: при контакті заготовки з вершиною конуса валків (малий хід ролика) осьове зусилля обмежене значенням 1300 кН. У міру переміщення вимірювального ролика (збільшення ходу) ліміт зусилля плавно підвищується. При досягненні ходу 410 мм система дозволяє прикладати до заготовки повне номінальне зусилля прокатки. Частота обертання осьових валків розраховується як функція, що залежить від двох ключових факторів: поточного положення кільця між валками (за даними вимірювального ролика) та його позиціонування відносно центрувального пристрою.

1.3 Технологічні особливості САУ регулювання розміру прокату кільцездозкатного стану

Система автоматизованого керування геометричними параметрами



Рис.1.5. Зовнішній вигляд цифрової обчислювальної машини

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [1]

Моніторинг розмірів кільця на стані виконується за допомогою цифрового обчислювального комплексу, що отримує сигнали від прецизійних магнітних датчиків. Оброблені дані надходять до наступних функціональних вузлів:

- інтерфейс оператора: для візуалізації поточних параметрів прокату в реальному часі;
- приводи постійного струму: контролери двигунів забезпечують корекцію частоти обертання робочих валків;

- обчислювальний модуль "Fraba": аналогова система, яка відповідає за керування гідравлікою та підтримку заданих зусиль у зонах осьової та радіальної деформації.

Частота обертання валків коригується автоматично з урахуванням фактичного діаметра кільця, що обробляється.

Робочі зусилля в зонах прокатки визначаються програмними алгоритмами, які базуються на безперервному відстеженні положення золотників сервоклапанів гідроциліндрів. Ключовим параметром процесу є «крива прокатки» - технологічна програма, яку оператор задає перед стартом. Вона визначає цільову зміну розмірів заготовки протягом усього циклу деформації, забезпечуючи дотримання вимог до геометрії готового виробу.

Взаємозв'язок технологічного алгоритму та силових параметрів гідросистеми

Виконання «крової прокатки» - це безперервний процес програмного управління, де цільові розміри виробу на кожному етапі співставляються з поточними показниками стану. Обчислювальний блок «Fraba» порівнює задану оператором геометрію із даними від датчиків положення.

На основі цього розбіжності (сигналу помилки) система формує керуючі впливи на гідравлічні сервоклапани. Принцип роботи полягає у наступному:

1. Формування керуючого сигналу: Якщо поточний діаметр кільця відхиляється від програмної кривої, контролер змінює електричний струм, що подається на котушки сервоклапанів.
2. Регулювання потоку рідини: Зміна положення золотника сервоклапана пропорційно змінює кількість робочої рідини, що надходить у порожнини гідроциліндрів осьової або радіальної кліті.
3. Зворотний зв'язок по зусиллю: Оскільки положення виконавчих механізмів безпосередньо впливає на тиск у гідроциліндрах, система постійно коригує зусилля деформації. Це дозволяє «вписувати» процес прокатки у задану криву, навіть за наявності коливань властивостей металу або температури заготовки.

Таким чином, «крива прокатки» виступає динамічним еталоном для системи автоматичного регулювання, яка через сервоклапани перетворює програмні установки на реальні зусилля прокатки.

Таблиця 1.1

Характеристика вимірювальних пристроїв системи автоматизації

Тип датчика	Вимірюваний параметр	Призначення в системі
Ультразвуковий	Хід вимірювального ролика	Визначення поточного діаметра кільця
Ультразвуковий	Висота кільця (h_{2x})	Контроль геометричних параметрів по висоті
Цифровий (дигітайзер)	Переміщення осьової кліті	Розрахунок діаметра кільця під час осьової прокатки
Спеціалізований	Товщина стінки кільця	Синхронізація роботи приводів стана
Датчик тиску	Радіальне зусилля (FR)	Контроль зусилля радіальної деформації
Датчик тиску	Осьове зусилля (FA)	Контроль зусилля осьової деформації
Датчик тиску	Зусилля центрування (FZ)	Забезпечення стабільного положення заготовки
Динамометричний	Позиція заготовки (SAG)	Регулювання положення кільця у просторі
Силовий вузол	Зусилля (Fвпуск / Fвипуск)	Контроль навантажень при завантаженні/вивантаженні
Канальний сенсор	Робоче переміщення (SM3x)	Моніторинг динаміки робочих органів стана

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [3]

Система контролю висоти заготовки

Пристрій для відстеження геометричних параметрів по висоті інтегрований у верхній вузол осьової кліті, безпосередньо в зоні руху осьових санчат.

Принцип роботи механізму: Переміщення осьових санчат здійснюється за рахунок зусилля гідравлічного циліндра. Конструктивно санчата обладнані напрямним штоком, на якому зафіксовано спеціальний кільцевий магніт. У процесі робочого ходу штока магніт переміщується вздовж стрижня датчика переміщень. Ця взаємодія дозволяє системі отримувати безперервний сигнал про поточну вертикальну позицію виконавчого органу, що еквівалентно визначенню висоти заготовки.

Обробка даних (рис. 1.6): дані, отримані від вимірювального вузла, надходять до обчислювальної машини «Fraba» для подальшої обробки за наступним алгоритмом:

1. Порівняння значень: система зіставляє фактичне положення (актуальне значення) із програмною уставкою (заданим значенням).
2. Обчислення розбіжності: На основі вимірних даних вираховується величина відхилення, яка використовується для корекції робочого ходу кліті.
3. Видача команд: Обчислювальний комплекс формує керуючі імпульси, що регулюють роботу гідравлічного приводу для досягнення цільової висоти кільця.

Використання магнітного способу вимірювання забезпечує високу точність та стабільність показників незалежно від зовнішніх умов прокатки.

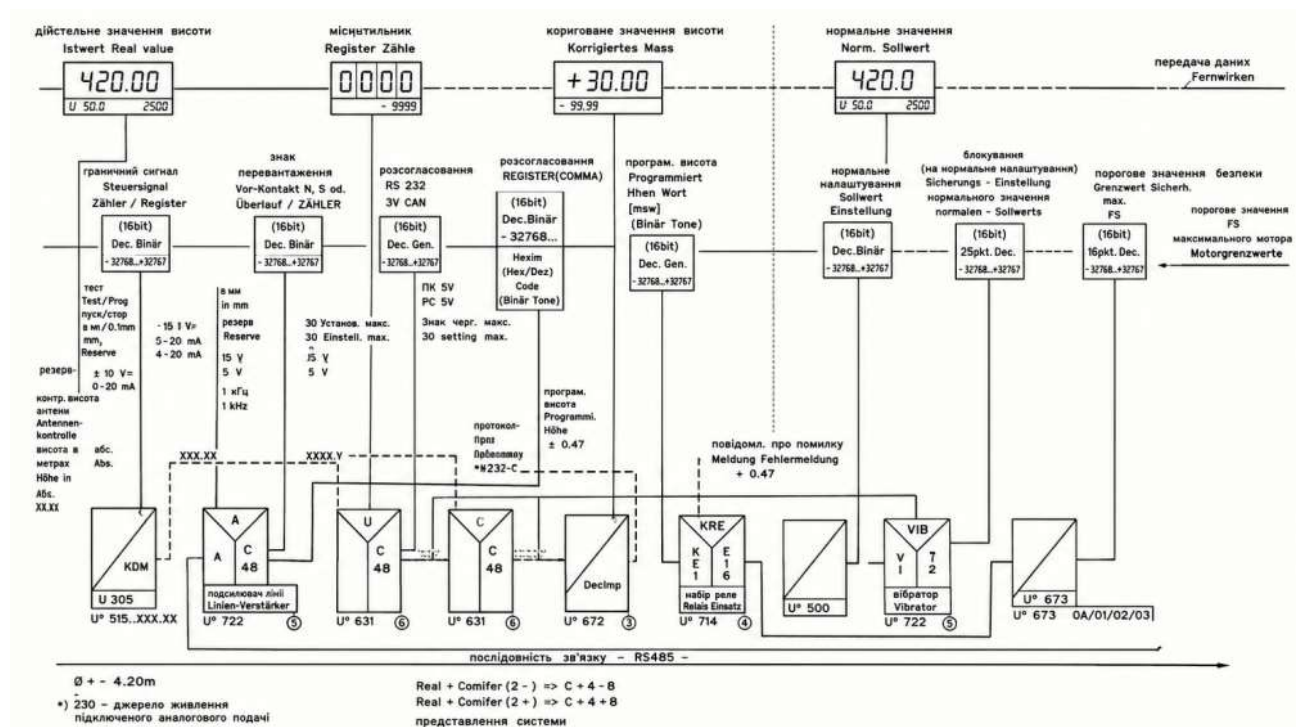


Рис.1.6. Схема обчислення висоти кільця цифровою обчислювальною машиною "Fraba"

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [4]

Контроль товщини стінки кільцевої заготовки

Для відстеження зміни товщини стінки в процесі радіальної деформації застосовується система на основі датчика лінійних переміщень.

Особливості технічної реалізації: розміщення датчика: Ультразвуковий вимірювальний пристрій жорстко закріплений на бічній несучій рамі стану, що забезпечує стабільність сигналу та відсутність вібраційних шумів. Синхронізація з механізмом: На радіальних санчатах, які відповідають за формування радіального профілю кільця, змонтовано спеціальне кріплення з кільцевим магнітом. Робочий цикл: У міру того, як радіальні санчата виконують робочий хід, магнітний елемент переміщується вздовж чутливої зони датчика. Фіксація цього переміщення в реальному часі дає змогу обчислювальній системі визначати поточну товщину стінки виробу з високою точністю.

Завдяки такій схемі система автоматизації отримує безперервний зворотний зв'язок про ступінь обтискання кільця, що необхідно для досягнення заданої точності розмірів готової деталі.

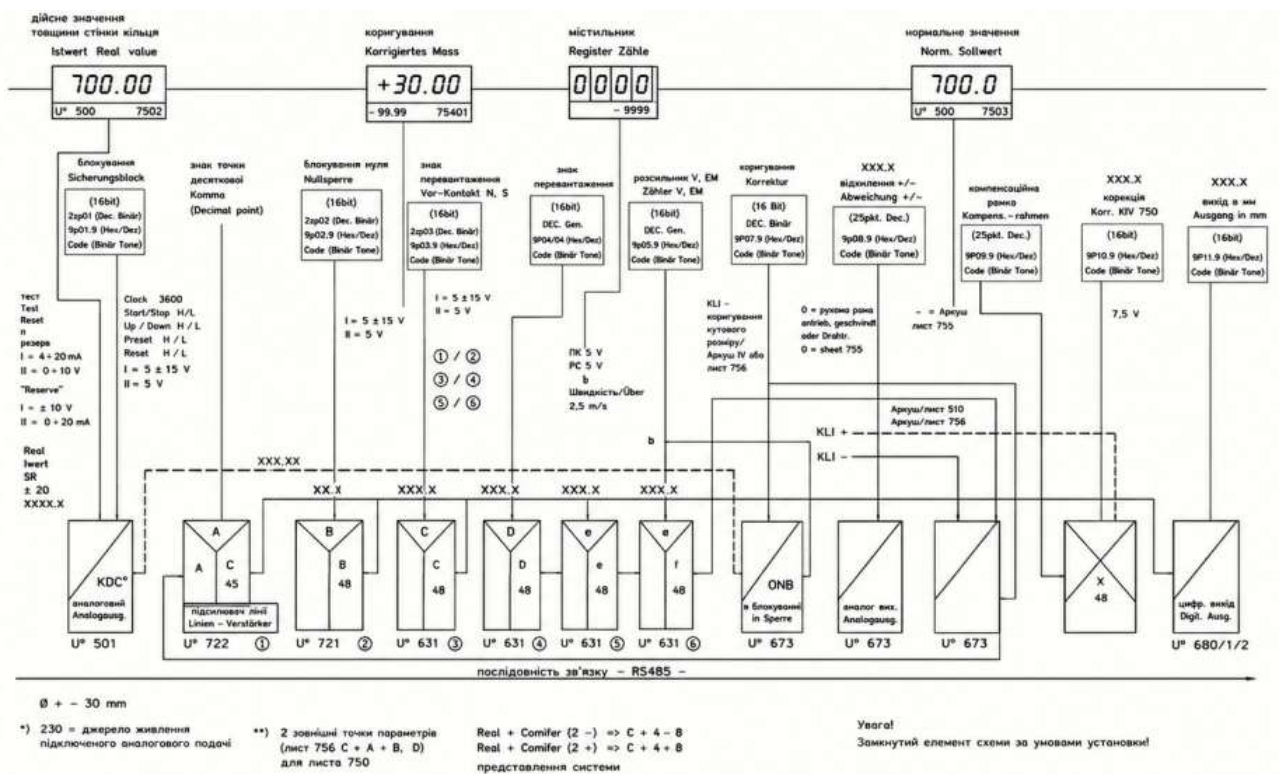


Рис.1.7. Схема обчислення товщини стінки кільця вгорі цифровою обчислювальною машиною "Fraba"

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [4]

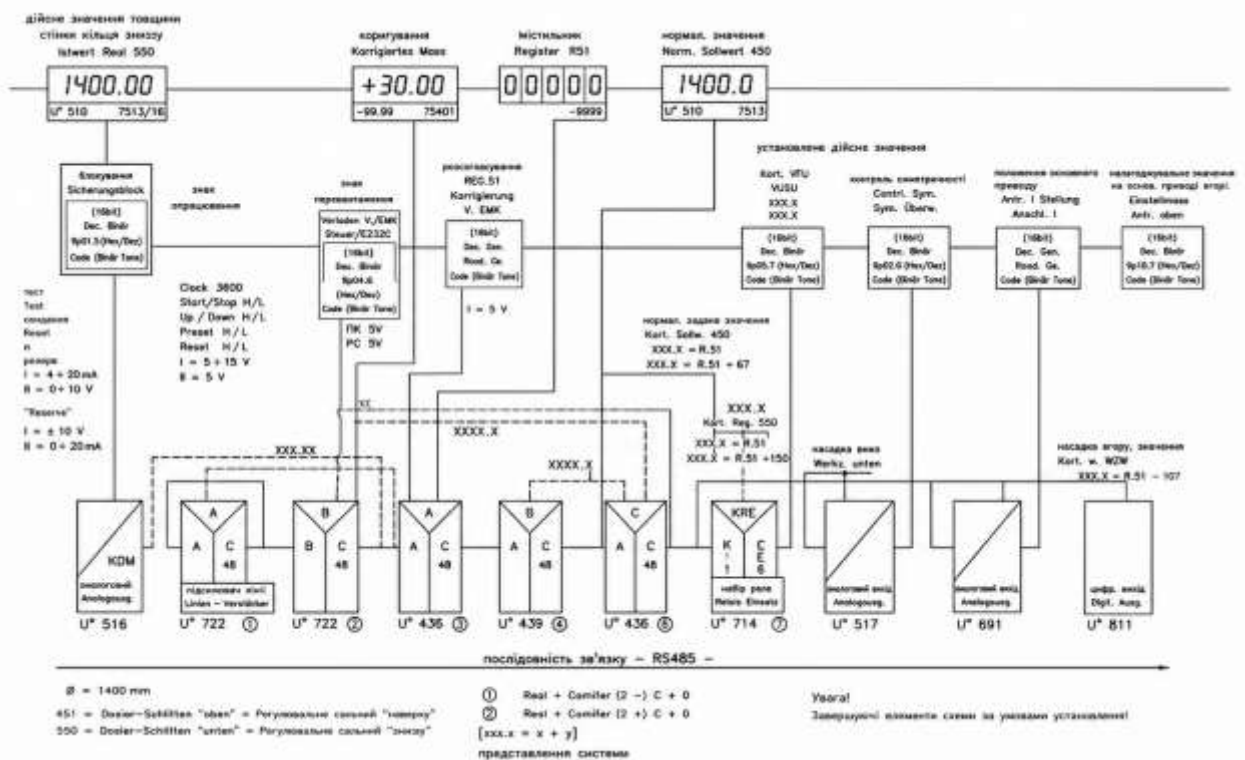


Рис.1.7. Схема обчислення товщини стінки кільця знизу цифровою обчислювальною машиною "Fraba"

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [4]

Вимірювання діаметра кільця та переміщення осьової кліті

Система автоматизації використовує інтегрований підхід для визначення геометричних характеристик заготовки, поєднуючи дані з різних вимірювальних каналів. Контроль осевого положення перерізу кільця: За цей параметр відповідає ультразвуковий датчик переміщень, зафіксований на нижній частині осьової кліті. Вимірювальний елемент (кільцевий магніт) змонтований на кріпленні, що взаємодіє з напрямними штоками вимірювального ролика. Під час вертикального руху ролика магнітний елемент зсувається вздовж стрижня датчика, що дозволяє системі точно фіксувати положення перерізу кільця в зоні деформації.

Вимірювання ходу осьової кліті: Механізм контролю переміщення кліті закріплений на основній рамі стану. До складу пристрою входить вимірювальний візок, з'єднаний з кліттю через шарнірний вал. Прецизійний

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [4]

1.4 Огляд існуючих рішень

З огляду на фізичне та моральне старіння вимірювальних систем на діючих кільцеровкатних станах, виникає актуальна потреба в оновленні апаратної бази. На сьогодні існує кілька ключових стратегій вирішення цієї проблеми.

1. Капітальний ремонт обладнання і оновлення існуючої бази.

Це найбільш економічно доцільний підхід, що передбачає поетапне оновлення компонентів системи без повної заміни технологічної лінії: Оновлення вимірювальних засобів: Заміна застарілих сенсорів (ультразвукових датчиків переміщення, дигітайзерів, датчиків тиску та динамометричних пристроїв) на сучасні аналоги з вищими метрологічними характеристиками. Інтелектуалізація вузлів: Перехід на нові промислові контролери для автоматизації окремих вузлів стану. Модернізація обчислювального комплексу: Впровадження продуктивнішої обчислювальної техніки, здатної обробляти дані в режимі реального часу з підвищеною частотою опитування каналів.

2. Впровадження безконтактних оптико-лазерних систем

Сучасні системи для моніторингу складних профілів дозволяють здійснювати безперервний контроль якості в умовах потокового виробництва: Високотемпературна адаптація: Системи розраховані на стабільну роботу в гарячій зоні прокату ($+900^{\circ}\text{C} \dots +1200^{\circ}\text{C}$), а також ефективні при контролі холодних виробів ($0^{\circ}\text{C} \dots +60^{\circ}\text{C}$). Принцип оптичної тріангуляції: Метод базується на лазерному скануванні профілю виробу. Цифрові камери високої роздільної здатності фіксують проекцію лазерного променя на поверхні металу, що дозволяє миттєво будувати точну модель перерізу.

3. Оптиелектронні комплекси контролю

Ці рішення розроблені спеціально для роботи в умовах прокатного цеху з урахуванням інтенсивного теплового випромінювання об'єктів: Стійкість до випромінювання: При температурі металу понад 700°C система веде моніторинг за власним випромінюванням заготовки. Якщо температура нижча, використовується метод активного підсвічування (дифузійний, паралельний або лазерний). Метрологічні характеристики: Застосування ПЗЗ-матриць (приладів

із зарядовим зв'язком) у поєднанні з алгоритмами цифрової обробки відеоданих дозволяє досягти високої координатної чутливості (на рівні 0,05%). Сучасні системи такого типу забезпечують похибку вимірювання в межах 0,1...0,5% від поля зору, що значно перевершує традиційні методи.

1.5 Технічні вимоги до розроблюваної системи автоматизації

Майбутня автоматизована система керування кільцезокатним станом повинна відповідати комплексу функціональних та експлуатаційних критеріїв, необхідних для стабільної роботи обладнання.

Функціональні обов'язки системи:

Безперервний моніторинг: Систематичний контроль координат розташування рухомих робочих органів стана в реальному часі.

Синхронізація швидкостей: Динамічне коригування частоти обертання робочих валків та автоматичне коригування позиції кільцевої заготовки для забезпечення рівномірності деформації.

Управління силовими параметрами: Комплексне регулювання гідравлічних контурів, що включає моніторинг та підтримку заданих зусиль на деформуючих валках.

Експлуатаційні та метрологічні параметри:

Стійкість до промислових умов: Апаратна частина та сенсорні вузли мають бути адаптовані до специфіки ковальсько-пресового виробництва (високі температури, запиленість, вібрації).

Високотемпературна вимірювальна здатність: Забезпечення коректних замірів лінійних параметрів прокату за умов нагріву заготовки до температур 1180 ± 20 °C.

Точність позиціонування: Гранично допустима похибка вимірювання лінійних розмірів гарячого металу становить ± 5 мм. Дотримання цих вимог дозволить значно підвищити якість готової продукції та мінімізувати частку браку, забезпечуючи при цьому надійний захист механізмів стану від перевантажень.

2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка функціональної та структурної схеми системи та вибір технічних засобів автоматизації

2.1.1 Розробка функціональної схеми автоматизації

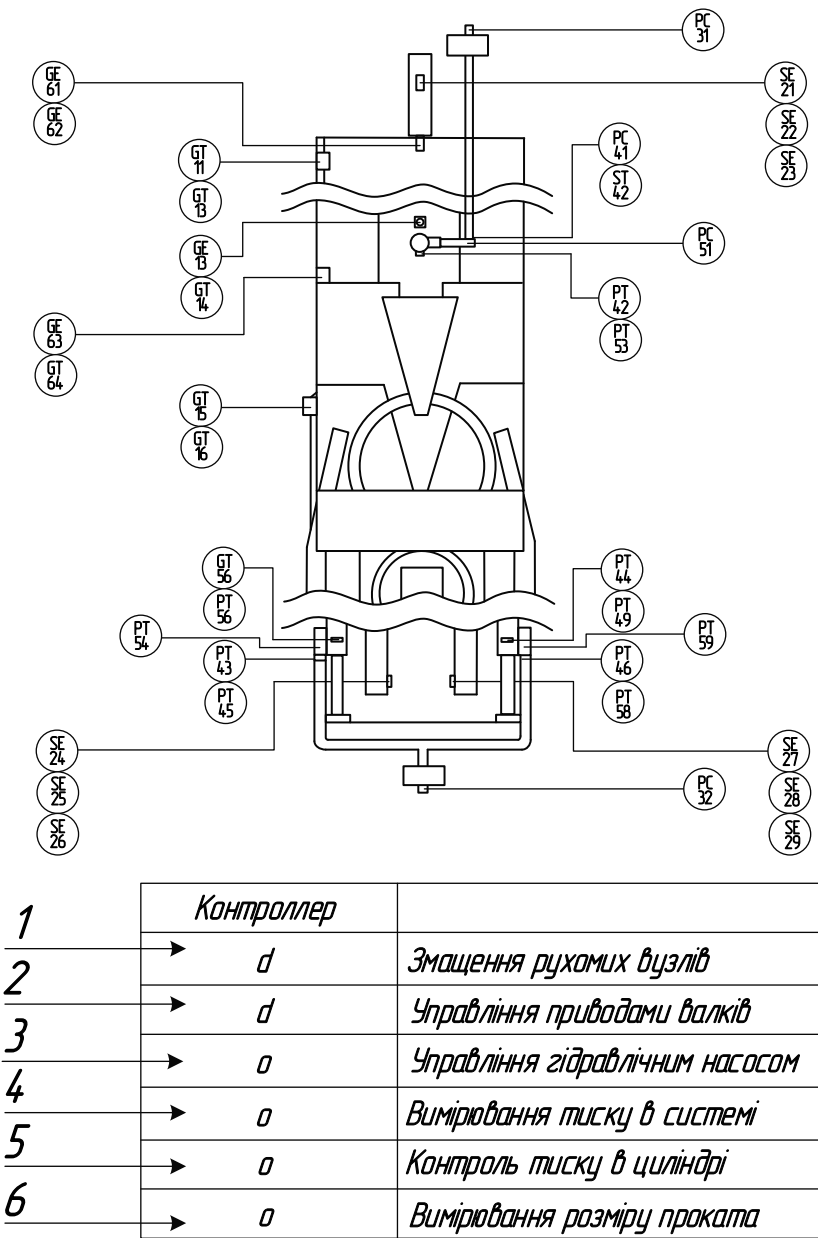


Рис. 2.1. Функціональна схема автоматизації управління гідравлічною системою кшъцерозкатного стана

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

Для розробки функціональної схеми нам потрібно зрозуміти, які саме вузли стану найбільше впливають на розміри кільця. Основне навантаження при деформації металу створює гідравліка. Тому головне завдання полягає у правильному керуванні сервоклапанами.

Розглянемо, як працює подібна гідравлічна система. Вона складається з чотирьох основних вузлів.

Перший - це насос із сервоприводом. Він подає точно дозований потік робочої рідини.

Другий - електрогідравлічний сервоклапан. Цей пристрій контролює вхідний тиск у системі.

Третій - гідроциліндр. Він створює необхідне зусилля для прокатки заготовки.

Четвертий - це зворотні датчики. Вони передають дані про поточний стан системи назад до електронного контролера. На основі цих даних контролер подає на сервоклапан електричний сигнал, що коригує його роботу. Для цієї системи найкраще підходить насос, де швидкість потоку регулюється електричним сигналом. На лінії подачі ми обов'язково встановлюємо запобіжний клапан. Він захищає насос від стрибків тиску. Максимальний тиск у системі ми обмежуємо з запасом у 15–25 відсотків від робочого максимуму. У гідравліці є ще багато важливих деталей. Це фільтри для очищення мастила, датчики для вимірювань та вузли безпеки. На схемі вони не відображені, але без них стабільна робота обладнання неможлива. Гідроциліндри та двигуни ми підбираємо з великим запасом потужності. Вони повинні легко витримувати потрібні зусилля прокатки та забезпечувати необхідну швидкість обробки металу. Такий підхід до побудови гідросистеми дозволить нам точно контролювати хід деформації кільця та гарантувати високу якість готових виробів. Розрахунок потужності та вибір гідроциліндрів - це відповідальний етап, оскільки від них залежить, чи зможе стан впоратися з прокатом металу заданих розмірів та міцності. Основний принцип тут базується на подоланні сил опору під час деформації. Спочатку ми визначаємо максимальне зусилля прокатки, яке потрібне для зміни форми

заготовки. Це зусилля залежить від марки сталі, температури нагріву кільця та ступеня обтискання за один прохід.

Знаючи це зусилля, ми розраховуємо діаметр поршня гідроциліндра. Площа поршня повинна бути такою, щоб робочий тиск у системі не перевищував номінальний рівень навіть при максимальному навантаженні. Ми обов'язково закладаємо коефіцієнт запасу міцності, щоб обладнання не працювало на межі своїх можливостей. Потім ми визначаємо швидкість руху штока. Вона залежить від необхідної швидкості прокатки, яку задає оператор у «кривій прокатки». Від швидкості руху залежить об'єм рідини, який має подати насос за одиницю часу. Насос ми обираємо так, щоб його продуктивність забезпечувала роботу всіх циліндрів одночасно, навіть якщо система працює в режимі високої інтенсивності. Крім того, ми перевіряємо систему на стійкість до гідравлічних ударів, які можуть виникати при різкій зміні напрямку руху кліті. Для цього ми правильно підбираємо діаметри трубопроводів та налаштовуємо запобіжну апаратуру.

Таким чином, потужність гідроприводів - це сума зусиль деформації плюс втрати на тертя у вузлах та запас на динамічні навантаження. Це гарантує, що стан працюватиме стабільно і впевнено впродовж всього циклу прокатки.

2.2 Обґрунтування вибору засобів автоматизації

Щоб реалізувати метод оптичної тріангуляції, нам потрібно доповнити існуючу схему керування станом сучасними вимірювальними приладами. При їх підборі ми враховуємо не лише точність розрахунків, а й специфіку роботи в умовах прокатного цеху.

2.2.1 Підбір вимірювальних перетворювачів

Для відстеження фактичних розмірів заготовки найефективніше застосувати тріангуляційний принцип. Зокрема, для безперервного контролю

діаметра кільця під час його деформації ми замінимо традиційний механічний вимірювальний ролик на лазерний датчик відстані.

Це рішення дає нам кілька переваг:

Безконтактність, тобто лазер не торкається гарячого металу, тому він не зношується і не деформується в процесі роботи.

Надійність монтажу, датчик встановлюється безпосередньо на стаціонарній рамі стана, що спрощує його обслуговування та захищає від ударних навантажень.

Швидкість реакції, лазерний пристрій миттєво фіксує зміну діаметра, передаючи дані в реальному часі на контролер.

Завдяки заміні контактного ролика на оптичну систему ми позбавляємося похибок, викликаних механічним тертям або люфтами, і отримуємо набагато точніші дані для керування процесом прокатки.

Для вимірювання дійсних розмірів кільця є можливість використання методу тріангуляції. Для вимірювання діаметра кільця, під час процесу розкатки, будемо використовувати лазерний датчик вимірювання відстані (рис.2.2). Він замінить вимірювальний ролик. Встановлюється на рамі машини.



Рис. 2.2. Зовнішній вигляд лазерного датчик Leuze ODS 96

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

Для автоматизації контролю параметрів на кільцезокатному стані в системі регулювання розрізу прокату застосовуються оптичні засоби вимірювання.

Використання лазерних датчиків відстані серії Leuze ODS 96 базується на методі оптичної тріангуляції. Ці пристрої забезпечують формування аналогового вихідного сигналу (0-10 В або 4-20 мА), значення якого пропорційне віддалі до контрольованого об'єкта. Лінійка обладнання дозволяє працювати в різних діапазонах вимірювань: від 100-600 мм до 250-5000 мм.

Ключові експлуатаційні особливості датчиків серії ODS 96:

- висока стійкість до зовнішньої засвітки;
- наявність вбудованої клавіатури та OLED-дисплея для налаштування;
- візуалізація вимірюваних значень у реальному часі (для моделей ODS 96B);
- гнучке налаштування порогових значень та аналогових виходів;
- можливість вибору режимів роботи (precision, speed, standard) для балансу між швидкістю та точністю вимірювань.

Безпосередньо для визначення геометрії прокату - зокрема, товщини стінки та висоти кільця - використаємо датчик лазерного сканування (cs5-cs 4k web 01), що також базується на принципі лазерної тріангуляції (рис.2.3).



Рис. 2.3. Зовнішній вигляд лазерного датчик Leuze ODS 96

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

Для високоточного сканування об'єктів у складі системи автоматизації застосовуються компактні лазерні датчики серії C5-CS, що базуються на методі лазерної тріангуляції. Принцип дії пристрою полягає у проектуванні лазерної лінії на поверхню об'єкта, яка переміщується вздовж нього. 3D-профіль виробу фіксується внутрішньою камерою датчика.

Інтегровані алгоритми обробки зображень дозволяють датчику формувати точні дані про 3D-геометрію об'єкта. Завдяки застосуванню сучасної архітектури FPGA, пристрої забезпечують високу швидкість обробки профілів - до 25 кГц, незалежно від типу обраного алгоритму обчислень.

Технічні можливості серії C5-CS охоплюють широкий діапазон конфігурацій: від роздільної здатності 648 точок на профіль до версії 4K Ultra-HD (4096 точок на профіль). Робочі зони вимірювання становлять до 10 600 мм за шириною та 2800 мм за висотою.

Конструктивне виконання датчиків орієнтоване на роботу в умовах промислового виробництва: корпус характеризується підвищеною жорсткістю та відповідає класу захисту IP67. Обладнання підтримує протокол передачі даних Gigabit Ethernet та повністю сумісне зі стандартом GigE-Vision, що дозволяє легко інтегрувати датчики в існуючі системи управління.



Рис. 2.4. Зовнішній вигляд датчика тиску ОВЕН ПД 1 ОО ДИ- 25-111-0,25

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

Для контролю тиску середовищ, що є хімічно нейтральними до нержавіючих сталей марок AISI 316L та AISI 304S (зокрема газу, пара, технічна вода та слабоагресивні рідини), використовуються перетворювачі тиску з такими параметрами: функціональне призначення: вимірювання надлишкового, вакуумметричного або комбінованого (надлишково-вакуумметричного) тиску. Вихідний сигнал: уніфікований аналоговий струм у діапазоні 4-20 мА. Діапазон вимірювань (ВПІ): від 10 кПа до 100 МПа. Точність: основна зведена похибка становить 0,25%, 0,5% або 1,0% від верхньої межі вимірювань. Перевантажувальна здатність: пристрої витримують тиск, що перевищує верхню межу вимірювань у 2 і більше разів. Ступінь захисту: конструкція корпусу та електричного роз'єму відповідає класу IP65. Електромагнітна сумісність: обладнання відповідає вимогам класу А згідно з ГОСТ Р 51522, що забезпечує стабільну роботу в умовах промислових електромагнітних завад. Ці технічні дані дозволяють інтегрувати датчик у систему автоматичного регулювання кільцезокатного стану для моніторингу гідравлічних або пневматичних систем.

2.2 Вибір виконавчих механізмів

Безпосередньо на розмір кільця впливають валки, зусилля яких регулюється гідравлічною системою за допомогою серво-клапанів.



**Рис. 2.5. Зовнішній вигляд серво-клапана зі встроєним підсилювачем
LSVHG-06EH 900**

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

2.2.3 Обґрунтування вибору мікропроцесорних засобів

Управління технологічним процесом реалізовано на базі інтегрованого комплексу, до складу якого входять промисловий контролер та аналогова обчислювальна машина типу «Fraba». Таке поєднання забезпечує високу надійність та швидкість обробки даних у реальному часі.

З метою підвищення інформативності інтерфейсу оператора та зручності візуалізації поточних параметрів виробництва, до складу системи також введено персональний комп'ютер. Це рішення дозволяє в наочній формі відображати динаміку зміни технологічних змінних, що значно спрощує контроль та аналіз роботи кільцезокатного стану.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд промислової обчислювальної машини "Fraba"

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

Для опрацювання масивів даних, сформованих компактним лазерно-триангуляційним сканером, та подальшого обчислення лінійних параметрів об'єкта, базових можливостей датчика недостатньо. З метою забезпечення необхідної точності та швидкості аналізу до контуру системи інтегровано спеціалізований апаратний комплекс обробки візуальної інформації.



Рис. 2.7. Система для захоплення зображення, обробки, відображення і функцій введення / виводу Matrox 4Sight GP

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

Matrox 4Sight GP (рис.2.7) - це високопродуктивна вбудована обчислювальна платформа, спеціалізована для завдань машинного зору, включаючи захоплення, інтелектуальну обробку, візуалізацію та управління сигналами введення-виведення. Апаратна основа системи - процесор Intel® Core™ 3-го покоління, доповнений швидкісними інтерфейсами Gigabit Ethernet та USB 3.0, а також шиною розширення PCIe® 3.0. Попри компактний та стійкий до механічних впливів корпус, пристрій забезпечує обчислювальну потужність на рівні сучасних десктопних станцій, дозволяючи виконувати кодування відео високої роздільної здатності за стандартом H.264 в режимі реального часу.

Переваги системи:

Висока обчислювальна потужність: ефективна обробка масивів візуальних даних завдяки використанню багатоядерної архітектури Intel® Core™.

Апаратне кодування: підтримка стиснення H.264 для відео високої чіткості, що знижує навантаження на центральний процесор.

Гнучка інтерфейсна підтримка: пряма інтеграція з камерами стандартів GigE Vision® та USB3 Vision®. Можливість підключення промислових інтерфейсів CameraLink®, CoaXPress, DVI та SDI шляхом використання додаткових фреймграбберів Matrox.

Синхронізація: узгодження роботи зі стороннім обладнанням через цифрові входи та виходи загального призначення.

Можливість масштабування: наявність двох слотів PCIe® (повної висоти та половинної довжини) дозволяє розширювати функціонал системи.

Візуалізація: підтримка одночасної роботи двох незалежних моніторів оператора.

Програмна екосистема: робота в стабільному середовищі Microsoft® Windows® Embedded Standard 7 із застосуванням стандартних інструментів Microsoft та бібліотек розробки Matrox Imaging Library (MIL), що значно скорочує час впровадження прикладного ПЗ.

Завдяки своїм ергономічним габаритам та конструктивній міцності, система оптимізована для експлуатації в умовах обмеженого монтажного простору та виробничих середовищ з підвищеним рівнем впливу зовнішніх чинників.

2.3 Розробка структурної схеми системи

На основі сформульованих технічних вимог було розроблено структурну схему системи автоматичного керування (САК). Графічне представлення алгоритму функціонування системи в номінальному режимі роботи наведено на рисунку 2.8. Вузлом, що забезпечує необхідну прецизійність контролю, є підсистема безпосереднього вимірювання геометричних параметрів прокату. На відміну від застарілих технічних рішень, де розміри виробу визначалися опосередковано - через моніторинг положення виконавчих механізмів стана, - запропонована архітектура базується на прямих вимірюваннях. Такий підхід

дозволяє суттєво мінімізувати вплив люфтів та деформацій механічних вузлів на загальну похибку вимірювань, підвищуючи достовірність отриманих даних.

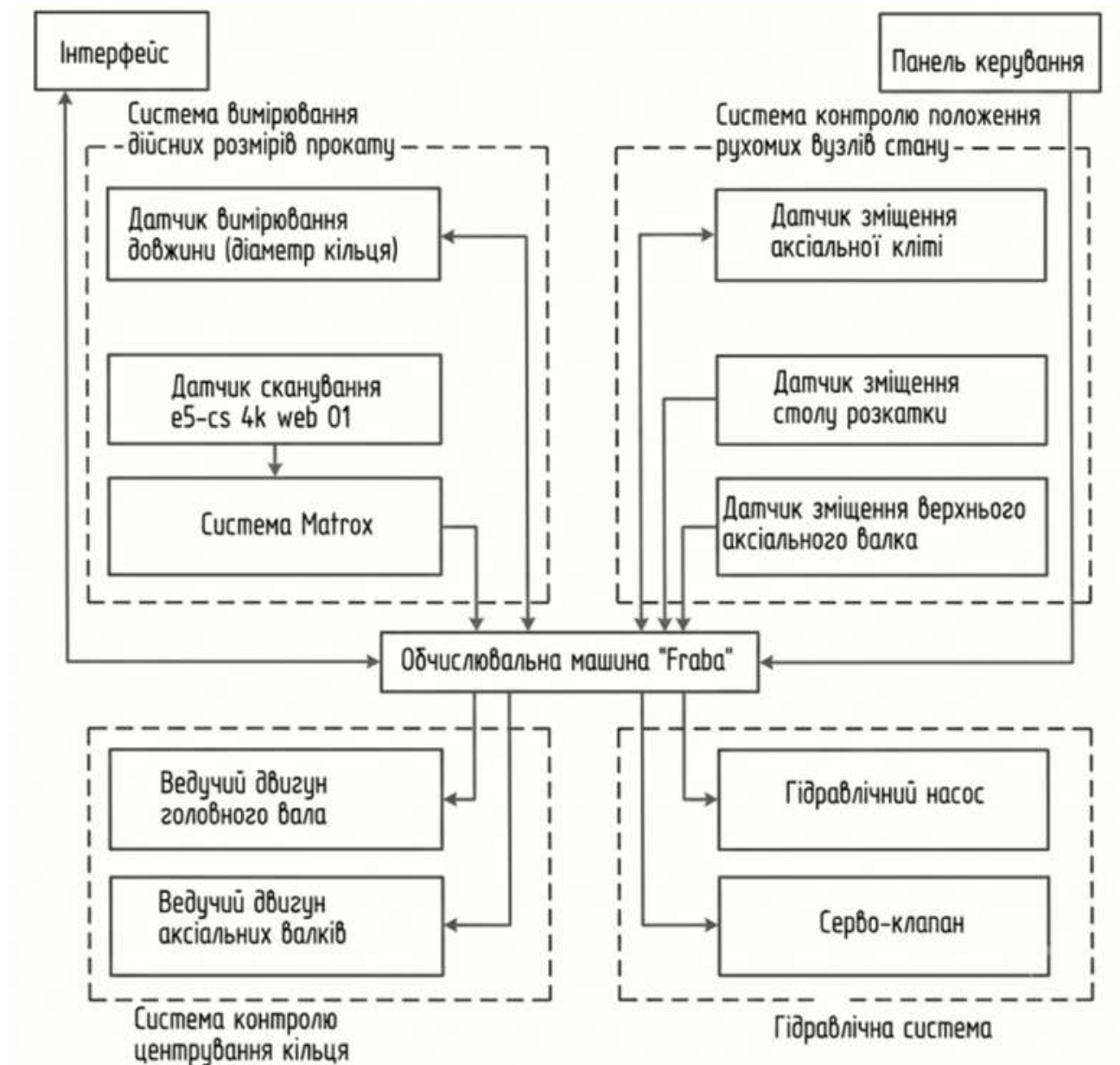


Рис. 2.8. Структурна схема САР розмірами прокату кільцеразкатного стану

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

У запропонованій системі збережено базові вимірювальні вузли стану, проте їхні функції обмежені моніторингом переміщень основних виконавчих механізмів: осьової кліти, столу розкатки, а також положення верхньої та нижньої

оправок. Хоча така архітектура не забезпечує прецизійної точності вимірювань, її параметри відповідають встановленим технічним вимогам до розробки.

Функціонал системи автоматизації поширюється на керування електродвигунами, які забезпечують необхідну швидкість обертання кільця та утримують його в заданій зоні обробки. Паралельно з цим, гідравлічна підсистема здійснює безпосередній вплив на динаміку переміщення рухомих вузлів стана, безпосередньо формуючи зусилля для деформації заготовки.

2.4 Моделювання системи та розробка алгоритму

2.4.1 Вибір регулятора і розрахунок його параметрів

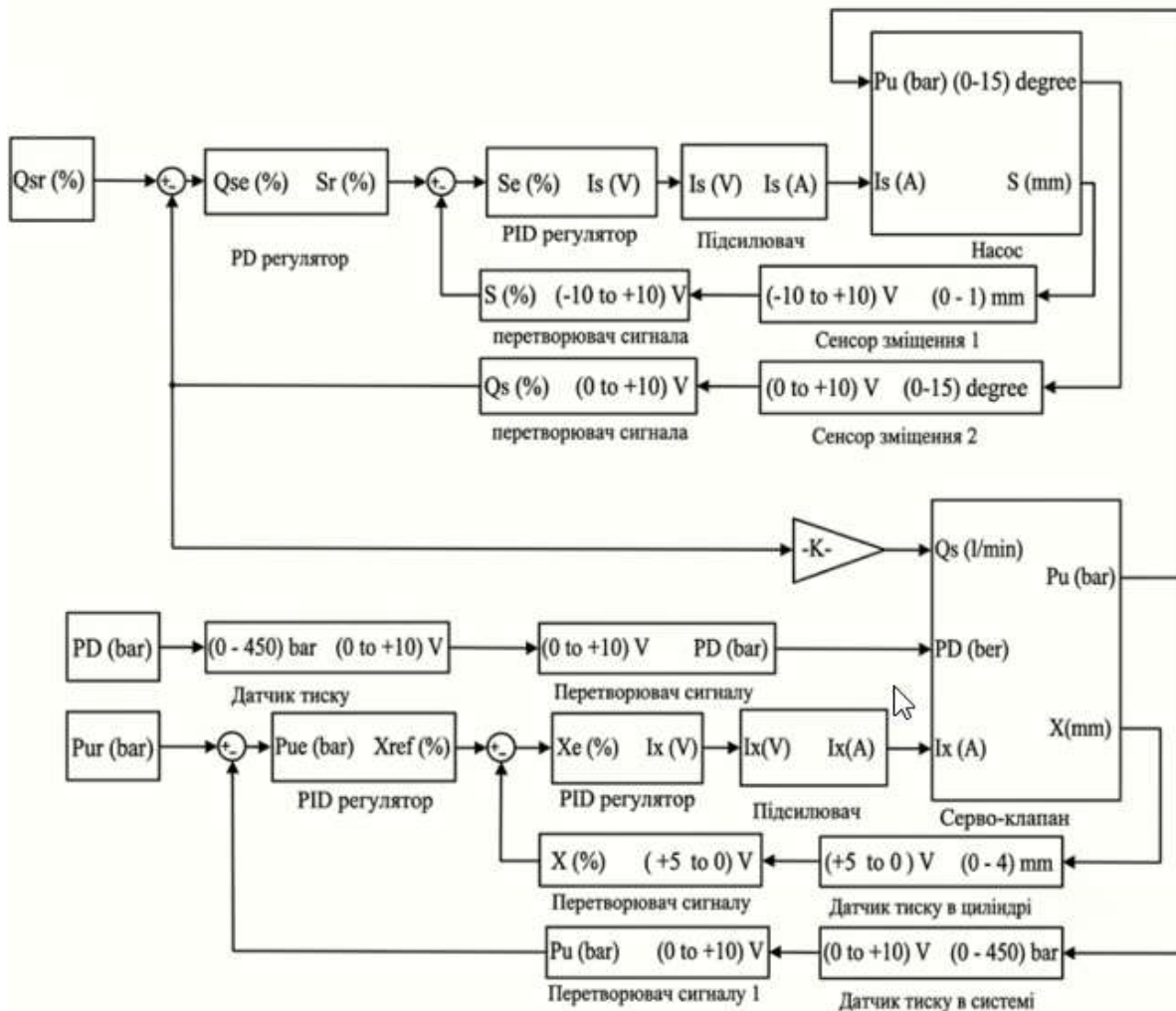


Рис. 2.9. Загальна електрична система управління
Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

2.5 Аналіз структури системи керування

Як відображено на рисунку 2.9, загальна електрична система автоматизації базується на взаємодії двох незалежних, але функціонально пов'язаних контурів управління: першого - для регулювання потоку насоса (Q_s), та другого - для керування сервоклапаном та вихідним тиском (P_u). Кожна із зазначених систем побудована на принципі двоконтурного зворотного зв'язку.

Система регулювання насоса. Внутрішній контур призначений для позиціонування пропорційного золотника за допомогою ПІД-регулятора та датчика переміщення. Останній фіксує актуальне положення золотника ($\$ \$ \$$) і передає сигнал на перетворювач, який нормалізує отримані дані відносно початкової точки. ПІД-контролер обробляє сигнал помилки (S_r) і генерує керуючу напругу (I_s), яка після підсилення подається на електромагнітний клапан. Зовнішній контур управління побудований на базі PD-регулятора; використання симетричного гідроциліндра як фізичного інтегратора дозволяє системі мінімізувати статичну похибку до нуля.

Система керування сервоклапаном. Архітектура контуру управління тиском аналогічна системі регулювання насоса. Тут внутрішній контур відповідає за стабілізацію тиску в гідроциліндрі, тоді як зовнішній - коригує вхідний тиск за допомогою ПІД-регуляторів. Механізм компенсації працює за принципом зворотного зв'язку: при підвищенні вхідного тиску ступінь відкриття сервоклапана автоматично коригується, забезпечуючи стабільність вихідних параметрів, незалежно від зовнішніх збурень.

Інтерактивна взаємодія контурів. Варто відзначити, що дані підсистеми є взаємозалежними: продуктивність насоса прямо впливає на характеристики роботи сервоклапана, а вхідний тиск - на динамічні властивості насосного обладнання. Комплексне керування витратою насоса та положенням сервоклапана дозволяє здійснювати прецизійний моніторинг швидкості та навантаження при розкатці, забезпечуючи високу якість формування прокату.

Controller Parameters

	Tuned
Kp	5.211
Ti	21.9536
Td	5.4884
N	

Performance and Robustness

	Tuned
Rise time	0.249 seconds
Settling time	51.4 seconds
Overshoot	32.2 %
Peak	1.32
Gain margin	Inf dB @ Inf rad/s
Phase margin	30.6 deg @ 5.21 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Рис. 2.10. Параметри налаштування ПД - регуляторів

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [5]

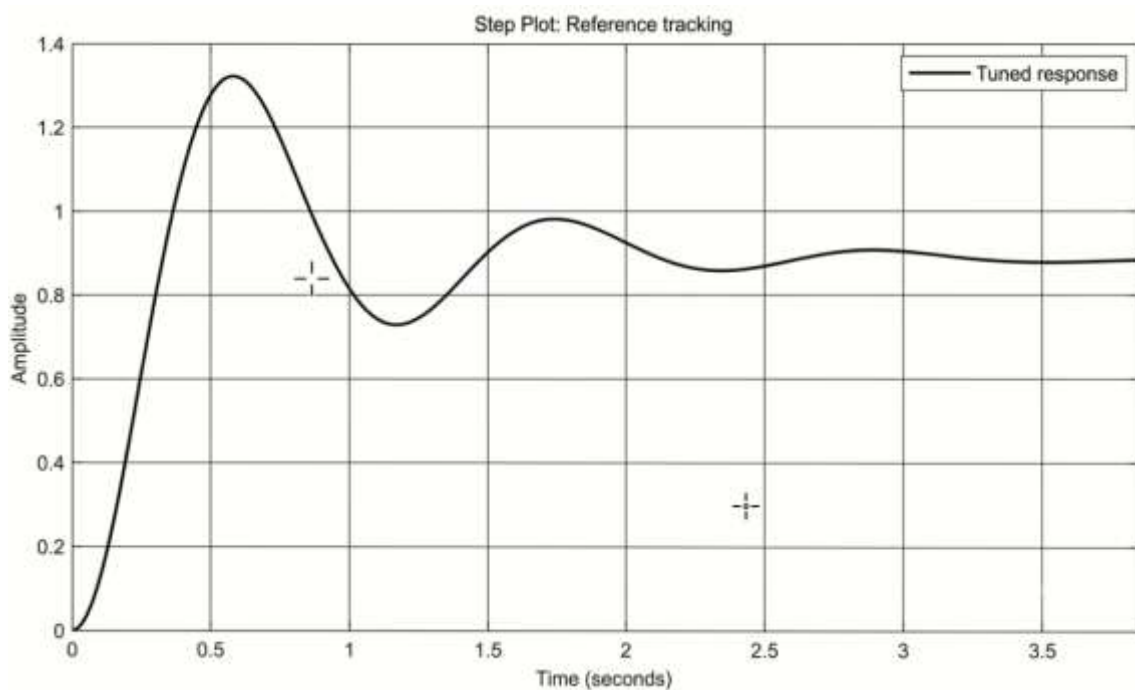


Рис. 2.11. Налаштування ПД регуляторів в PID tuner, Matlab

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [6]

2.6 Розрахунок показників надійності системи

Надійність автоматизованих систем керування визначається сукупністю експлуатаційних чинників, включаючи можливі наслідки відмов та умови функціонування обладнання. Визначення цільових показників надійності покладається на розробника проекту на етапі проектування. Вибір часового інтервалу, для якого розраховується ймовірність безвідмовної роботи (ІБР), базується на регламенті технічного обслуговування та ремонту (ТОіР). Для розрахунку ІБР прийнято гіпотезу про нормальний закон розподілу напрацювання до відмови, де середньоквадратичне відхилення становить:

$\sigma \leq 0,2 \cdot T_{\text{ср.р.}}$, а період між технічними перевірками елементів системи $T_{\text{п.т.}} \leq 0,3 \cdot T_{\text{ср.р.}}$ ($T_{\text{ср.р.}}$ - середній ресурс обладнання, год). Забезпечення необхідного рівня надійності в умовах проектування досягається шляхом резервування компонентів. Для послідовної схеми з'єднання незалежних елементів загальна ймовірність безвідмовної роботи визначається за формулою:

$$P_c(\tau) = \prod_{i=1}^n P_i(\tau) \quad (2.1)$$

де $P_i(\tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи i -го елемента.

Розрахунок для системи автоматичного керування:

Вихідні дані щодо надійності компонентів:

Датчики тиску (4шт): $T_{\text{ср.р.}} = 4700$ год, $\sigma = 500$ год.

Сервоклапан: $T_{\text{ср.р.}} = 7000$ год, $\sigma = 1300$ год.

Пульт керування: $T_{\text{ср.р.}} = 30000$ год, $\sigma = 1200$ год.

Розрахунок проводиться для напрацювання до чергового технічного огляду $T_{\text{п}} = 1800$ год. Згідно з нормальним законом розподілу, ймовірність визначається через табульовану функцію Лапласа:

$$P_i(T_{\text{п}}) = F(U) \quad (2.2)$$

де квантиль нормального розподілу U розраховується як:

$$U = \frac{T_{\text{ср.р.}} - T_{\text{п}}}{\sigma} \quad (2.3)$$

Передавальна функція ПІД-регулятора описується виразом:

$$W(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.5)$$

Для кожного контуру управління було підібрано відповідні коефіцієнти (K_p , T_i , T_d):

Контур управління насосом:

ПІД-регулятор: $K_p = 1$, $T_i = 0,01$, $T_d = 0,001$.

PD-регулятор: $K_p = 1$, $T_i = \infty$, $T_d = 0,02$.

Контур управління сервоклапаном:

Регулятор положення: $K_p = 1$, $T_i = 0,007$, $T_d = 0,005$.

Регулятор тиску: $K_p = 20$, $T_i = 0,2$, $T_d = 5 \cdot 10^{-5}$.

Після налаштування регуляторів було проведено серію симуляційних експериментів. Метою досліджень є аналіз швидкодії системи та оцінка перехідного процесу сервоклапана при подачі одиничного ступінчастого вхідного сигналу.

Після налаштування регуляторів було проведено серію симуляційних експериментів. Метою досліджень є аналіз швидкодії системи та оцінка перехідного процесу сервоклапана при подачі одиничного ступінчастого вхідного сигналу.

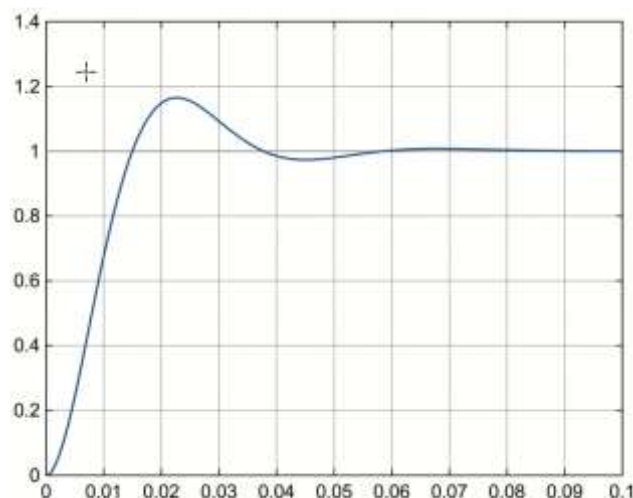


Рис. 2.13. Моделювання системи управління електрогідравлікою

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [6]

2.8 Розробка алгоритму функціонування системи керування

Функціональним ядром системи управління є спеціалізований обчислювальний комплекс «Fraba» на базі мікропроцесорної архітектури SIEMENS. Алгоритм роботи побудований на циклічному опитуванні периферійних датчиків, що забезпечують зворотний зв'язок із технологічним процесом. До складу цієї системи входять: датчики положення виконавчих механізмів, тахометричні вимірювачі швидкості, пристрої захисту електродвигунів, контролери параметрів гідравлічної та охолоджувальної систем, а також оптичні засоби вимірювання геометрії прокату.

Мікропроцесорна система забезпечує автоматизацію ключових етапів роботи кільцеразкатного стана, зокрема: позиціонування аксіальної кліті, стабілізацію частоти обертання валків, регулювання зусилля деформації, управління системою змащення та моніторинг параметрів безпеки.

Етапи функціонування системи:

1. Діагностика при запуску: після подачі живлення обчислювальна машина проводить ініціалізацію та самотестування всіх підсистем. При виявленні відхилень або несправностей система блокує запуск та видає діагностичне повідомлення про необхідність обслуговування конкретного вузла.
2. Підготовчий етап: система автоматизовано перевіряє вихідні позиції аксіальної кліті та верхньої опори дорнового вала.
3. Технологічний цикл розклатки: Після розміщення заготовки на столі система проводить її центрування за допомогою спеціальних валків та фіксацію аксіальною кліттю.

Гідравлічний привід, керований сигналами з контролера, створює необхідне зусилля на валках, запускаючи процес поступової пластичної деформації.

Протягом усього циклу підсистема вимірювання в режимі реального часу передає дані про розміри кільця до контролера, який коригує траєкторію розклатки для досягнення цільових геометричних характеристик.

4. Завершення циклу: після досягнення заданих параметрів здійснюється «вигладжування» (обертання без додаткового тиску) протягом 10 секунд. Після цього аксіальна кліть розводиться, а сформований виріб транспортується на рольганг за допомогою системи автоматичної видачі. По завершенні циклу обладнання автоматично переходить у стан готовності до наступної заготовки.

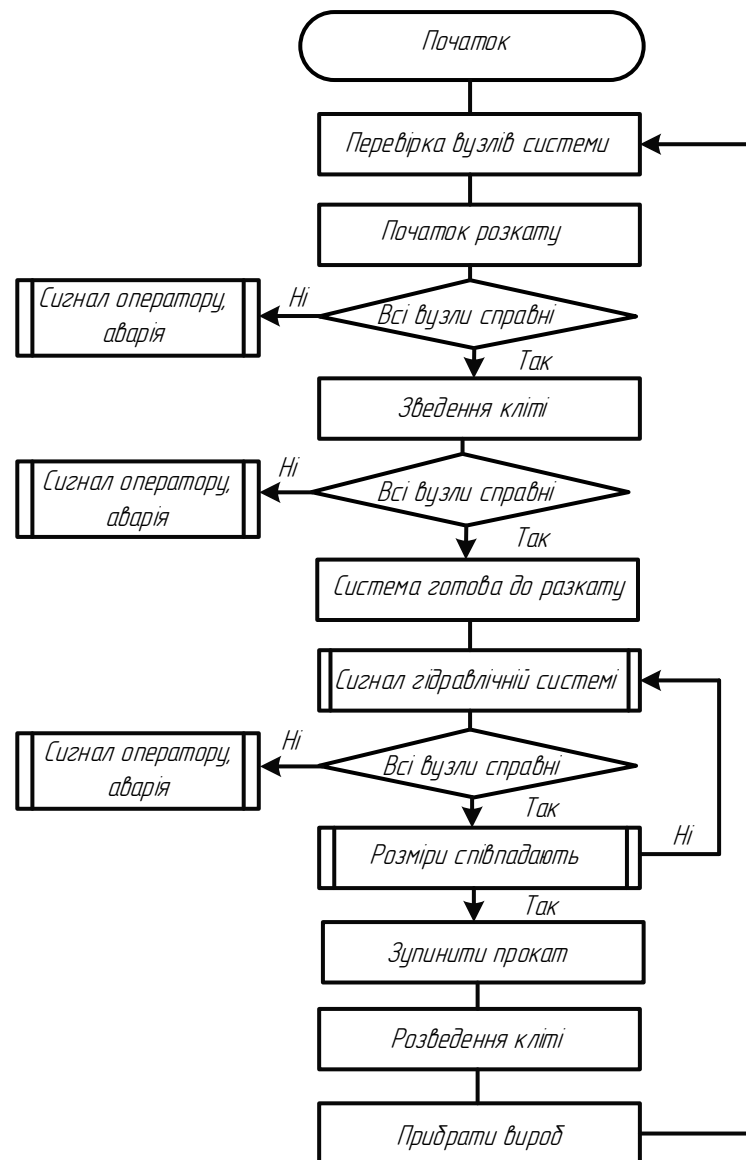


Рис. 2.14. Загальний алгоритм функціонування системи автоматичного регулювання розмірш прокату кшьцерозкатного стану

Примітка. Джерело: Розроблено із використанням [6]

2.9 Заходи із охорони праці та безпеки при експлуатації сепаратора

2.9.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Процес гарячої кільцевої розкатки характеризується високою енергоємністю та роботою в умовах екстремальних фізико-хімічних навантажень. Впровадження системи автоматичного регулювання (САР) геометричних параметрів прокату безпосередньо впливає на профіль безпеки виробничого середовища.

1. Термічні фактори

Основним виробничим фактором є інтенсивне теплове випромінювання від заготовки, нагрітої до температури 1180 ± 20 °С.

Ризик для обладнання: Перегрів електронних компонентів системи (датчиків тріангуляції, оптичних систем, контролерів).

Заходи захисту: Застосування спеціалізованих захисних кожухів із системами повітряного охолодження або повітряних завіс, що запобігають осіданню окалини та перегріву оптики.

2. Механічні та кінематичні небезпеки

Наявність рухомих вузлів (аксіальна кліть, валки, дорновий вал) створює зону підвищеної небезпеки.

Ризик: Травматизм через неконтрольоване переміщення виконавчих механізмів, виліт заготовки при неправильному позиціонуванні.

Заходи захисту: Інтеграція в САР алгоритмів блокування руху при виході параметрів за межі допусків («аварійний стоп»), використання датчиків контролю положення виконавчих вузлів для унеможливлення механічних зіткнень.

3. Електротехнічні чинники

Висока потужність приводів (електродвигуни постійного струму) генерує значні електромагнітні перешкоди.

Ризик: Порушення цілісності сигналів зворотного зв'язку, що передаються від датчиків тиску та положення, що може призвести до збоїв у роботі ПІД-регуляторів.

Заходи захисту: Використання екранованих кабелів, гальванічна розв'язка сигнальних кіл, організація контурів заземлення згідно з вимогами ДСТУ для промислової автоматики.

4. Гідравлічні небезпеки

Система керування зусиллями розклатки базується на високому тиску в робочих циліндрах.

Ризик: Розгерметизація гідромагістралей, що загрожує викидом гарячого масла під тиском.

Заходи захисту: Впровадження в алгоритм САР постійного моніторингу тиску в системі (Pu), автоматичне скидання тиску при критичних відхиленнях, застосування запірної арматури з дистанційним керуванням.

5. Вібраційні та шумові навантаження

Процес пластичної деформації металу супроводжується значними вібраціями конструкції стана.

Ризик: Механічна втома кріплень датчиків та вібраційне «шумування» сигналу.

Заходи захисту: Віброізоляція кріпильних елементів вимірювальних пристроїв, використання цифрових фільтрів у програмному забезпеченні контролера (Matlab/Simulink) для виключення гармонік, що не належать до технологічного процесу.

2.9.2 Засоби зниження дії небезпечних і шкідливих виробничих чинників

Заходи щодо мінімізації впливу виробничих небезпек та шкідливих факторів

Для забезпечення стабільної експлуатації системи автоматизованого керування кільцеразкатним станом, а також для гарантування безпеки обслуговуючого персоналу, передбачено комплекс технічних та організаційних

рішень. Засоби нейтралізації негативного впливу зовнішніх чинників інтегровані безпосередньо в архітектуру системи.

1. Технічний захист вимірювальних каналів та електроніки

З огляду на інтенсивне теплове випромінювання, оптичні датчики, що реалізують метод лазерної тріангуляції, захищені наступним чином:

Теплоізоляційні бар'єри: використання корпусів з активним повітряним охолодженням, які унеможливають перегрів чутливих елементів.

Очищення оптики: встановлення системи подачі стисненого повітря, що створює надлишковий тиск перед захисним склом, запобігаючи осіданню металевого пилю та продуктів згоряння мастил.

2. Електромагнітна сумісність та надійність сигнальних ліній

Система управління працює в умовах значних перешкод, зумовлених роботою потужних приводів змінного та постійного струму.

Кабельні системи: застосування спеціалізованих кабелів з подвійним екрануванням, прокладених у металевих заземлених коробах, що мінімізує вплив наведень на сигнали зворотного зв'язку.

Гальванічна ізоляція: використання ізоляторів сигналів між польовим рівнем (датчиками) та промисловим контролером, що дозволяє уникнути виходу з ладу процесорного блоку при коротких замиканнях у ланцюгах живлення датчиків.

3. Гідравлічна безпека та контроль цілісності контурів

Для запобігання ризикам, пов'язаним з роботою гідравлічного обладнання під високим тиском:

Дистанційний моніторинг: впровадження програмно-апаратних фільтрів, які аналізують швидкість зміни тиску (dP/dt). При виявленні аномального падіння тиску, що вказує на розрив рукава високого тиску, САР автоматично переводить систему в безпечний режим (зупинка приводів, перекриття магістралей).

Дублювання датчиків: для підвищення достовірності даних і виключення хибних спрацювань системи захисту застосовується мажоритарна логіка опитування датчиків тиску.

4. Організаційно-технічні заходи безпеки

Алгоритмічне блокування: програмне забезпечення мікропроцесора «Fraba» містить підпрограми «безпеки розкати», які постійно звіряють поточні координати рухомих вузлів із гранично допустимими межами. У разі виходу за межі дозволеної зони здійснюється негайний розрив силових кіл.

Віброзахист: датчики вимірювання розмірів та положення змонтовані на спеціальних демпфуючих опорах, що знижує амплітуду передачі механічних коливань від конструкції стана на електронні вузли.

Реалізація цих заходів дозволяє не лише забезпечити безперервну роботу системи в жорстких виробничих умовах, але й суттєво підвищити довговічність прецизійної вимірювальної апаратури. Обраний комплекс засобів повністю відповідає вимогам промислової безпеки для об'єктів ковальсько-пресового виробництва.

2.9.3 Інженерно-технічні заходи захисту від ураження електричним струмом

Експлуатація системи автоматичного керування (САК) кільцеровкатного стана пов'язана з наявністю джерел живлення промислової напруги та підсистем високої потужності, що вимагає впровадження багаторівневої системи електробезпеки. Захисні заходи реалізовані відповідно до вимог чинних нормативних документів (ПТЕЕС, ПУЕ).

1. Системи заземлення та вирівнювання потенціалів

Для захисту персоналу від небезпечного впливу напруги при пошкодженні ізоляції застосовано наступне:

Захисне заземлення: усі металеві корпуси приводних двигунів, гідравлічних агрегатів та обчислювального блоку «Fraba» об'єднані в єдиний контур заземлення із опором, що не перевищує 4 Ом.

Система зрівнювання потенціалів: монтаж додаткових провідників між металоконструкціями стана та шафами автоматики для виключення можливості виникнення різниці потенціалів при пробії ізоляції силових кіл.

2. Захист від непрямого дотику

Для забезпечення безпеки в умовах металургійного цеху, де існує підвищена вологість та висока електропровідність підлоги:

Автоматичне відключення живлення: усі лінії живлення датчиків та виконавчих механізмів оснащені пристроями захисного відключення (ПЗВ) з номінальним струмом спрацювання до 30 мА.

Розділові трансформатори: для живлення ланцюгів керування (24 В DC) використовуються промислові блоки живлення з вбудованим гальванічним розділенням від первинної мережі 380 В.

3. Технічні засоби захисту обладнання

Класи захисту оболонок: усі елементи системи управління, включно з датчиками тріангуляції, розміщені в корпусах зі ступенем захисту не нижче IP65, що унеможливорює випадковий доступ до струмоведучих частин під час роботи.

Блокувальні механізми: конструкція шаф керування передбачає кінцеві вимикачі, які автоматично знімають напругу з внутрішніх модулів при спробі відкриття дверцят персоналом, який не має допуску до обслуговування електроустановок.

4. Захист вимірювальних каналів

Оскільки лазерна система вимірювання та контролер з'єднані довгими лініями зв'язку, застосовано:

Оптична та гальванічна розв'язка: виключення прямого електричного зв'язку між «силовими» вузлами стана та «слабкострумовою» обчислювальною частиною за допомогою оптопар. Це не лише підвищує завадостійкість, а й унеможливорює перенесення високого потенціалу на пульт оператора у випадку аварії.

Запропонований комплекс інженерних рішень забезпечує надійний захист персоналу від електротравм шляхом поєднання апаратних методів (ПЗВ, заземлення) та конструктивних засобів (клас захисту IP, блокування). Така структура відповідає концепції «інтенсивного захисту» для промислових об'єктів підвищеної небезпеки.

2.9.4 Пожежна безпека

Експлуатація кільцезокатного стана, що працює з нагрітими заготовками (до $1180 \pm 20^\circ\text{C}$) та гідравлічними системами під високим тиском, висуває підвищені вимоги до системи протипожежного захисту. У межах впровадження системи автоматичного управління (САК) передбачено комплекс технічних та організаційних заходів, спрямованих на запобігання виникненню та швидку локалізацію осередків займання.

1. Профілактика займань у гідравлічних вузлах

Гідравлічна система є найбільш пожежонебезпечною ділянкою через використання горючих робочих рідин (мастил) під тиском.

Автоматичний контроль: САК постійно відстежує параметри тиску та температури гідрорідини. При фіксації виходу значень за межі робочого діапазону, що може свідчити про розгерметизацію, алгоритм «Fraba» ініціює негайну зупинку насосних станцій.

Система витоків: використання безшовних трубопроводів та спеціальних ущільнювальних матеріалів, стійких до температурних деформацій, мінімізує ймовірність розбризкування оливи на гарячі поверхні.

2. Захист систем електропостачання та автоматики

Для запобігання займанням електротехнічного обладнання застосовуються такі інженерні рішення:

Кабельна ізоляція: використання вогнестійких та негорючих кабелів у місцях прокладання поблизу зони деформації металу.

Захисна автоматика: встановлення автоматичних вимикачів із тепловим та електромагнітним розчеплювачами, що виключають тривалі перевантаження ліній електроживлення.

Шафи автоматики: усі пристрої керування розміщені в герметичних металевих шафах зі ступенем вогнестійкості, що відповідає вимогам ДСТУ для металургійних підприємств.

3. Технічні засоби активного пожежогасіння

Проект передбачає інтеграцію засобів локалізації пожежі:

Автоматична сигналізація: система датчиків диму та напівпровідникових сенсорів температури, встановлених над станом та в зоні гідроагрегатів. При спрацюванні сигналізація видає звуковий та світловий сигнал на пульт оператора та в центральну диспетчерську.

Стаціонарні установки: використання порошкових або вуглекислотних систем пожежогасіння, які є найбільш ефективними для ліквідації займань класів В (горючі рідини) та Е (електроустановки під напругою). Активація може здійснюватися як в автоматичному, так і в ручному режимі.

4. Організаційні заходи

Первинні засоби: розміщення сертифікованих вогнегасників (ВП-5, ВВК-2) у безпосередній близькості до зони керування станом.

Періодичний моніторинг: проведення регламентних робіт з очищення прилеглої території від мастильних відкладень та окалини, що є потенційним «паливом» при пожежі.

Запропонована система заходів поєднує інтелектуальний моніторинг стану обладнання (автоматичне відключення при виявленні небезпеки) з надійними засобами активного гасіння. Це дозволяє гарантувати безпеку виробничого циклу, зводячи ризик пожежі до мінімально можливого рівня, що повністю відповідає нормам пожежної безпеки промислових підприємств.

ВИСНОВКИ

У ході виконання випускної роботи спроектовано та впроваджено систему контролю геометричних параметрів прокату на кільцеровозкатному стані. В основі технічного рішення лежить метод лазерної тріангуляції, реалізований із застосуванням сучасних вимірювальних пристроїв. Інтеграція розробленої системи в існуюче обладнання дозволила модернізувати застарілі вузли без їх повної заміни, що забезпечує значний економічний ефект для виробничого підприємства.

Розроблена система відповідає комплексу технічних вимог:

1. Комплексний моніторинг: постійний контроль стану обладнання та просторового положення його рухомих вузлів.
2. Автоматизація керування: забезпечення динамічного регулювання швидкості обертання валків та центрування заготовки в зоні обробки.
3. Гідравлічне управління: стабілізація та контроль зусиль на деформуючих валках у межах технологічного циклу.
4. Експлуатаційна стійкість: здатність системи зберігати працездатність у важких умовах металургійного виробництва.
5. Вимірювальна точність: дистанційний контроль геометричних розмірів прокату, нагрітого до температури 1180 ± 20 °C, із похибкою не більше ± 5 мм.

Таким чином, запропонована система дозволяє підвищити точність виготовлення кілець та оптимізувати енерговитрати технологічного процесу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Fraba - технічна документація, 1986. [упоряд. Ю. І. Калесников та ін.]. Архів технічної документації заводу «Констар».
2. Wagner - Dortmund, кільцеровкатний стан - технічна документація, 1986. [упоряд. Ю. І. Калесников та ін.]. Архів технічної документації заводу «Констар».
3. Методичні вказівки щодо складання функціональних схем автоматизації під час виконання курсових та дипломних проектів (для студентів спеціальностей: П.ОЗ, 10.07, 11.01, 25.04) / уклад.: А. Е. Алуєв, О. С. Єресковський, А. І. Грищенко та ін. Дніпропетровськ : ДМетІ, 1991. 52 с.
4. Денисенко В. В. ПД-регулятори: питання реалізації. *СТА*. 2007. № 4. С. 86-97; 2008. № 1. С. 86-99.
5. Математичне моделювання. Оптимальне управління. *Вісник Нижньогородського університету ім. М. І. Лобачевського*. 2011. № 3 (2). С. 148-151.
6. Іцкович Е. Л. Сучасні алгоритми автоматичного регулювання та їх використання на підприємствах. *Автоматизація в промисловості*. 2007. № 6. С. 39-44.
7. Денисенко В. В. Різновиди ПД-регуляторів. *Автоматизація в промисловості*. 2007. № 6.
8. МИ 2440-97 ГСИ. Методи експериментального визначення та контролю характеристик похибки вимірювальних каналів вимірювальних систем і комплексів.
9. Ротач В. Я. До розрахунку оптимальних параметрів реальних ПД-регуляторів за експертними критеріями. *Промислові АСУ і контролери*. 2006. № 2. С. 22-29.
10. Кучерявий В. І. Теорія автоматичного керування : підручник для студентів вищих навч. закладів. Львів : Новий Світ-2000, 2019. 488 с.

- 11.Петренко В. П., Денисенко В. В. Автоматизація промислових процесів : навч. посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 320 с.
- 12.Воротніков І. М. Методи обробки вимірювальних сигналів у системах технічного зору. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». 2022. № 1 (14). С. 45-52.
- 13.Шевченко С. В. Лазерні системи вимірювання геометричних параметрів об'єктів у гарячому стані. Технічна електродинаміка. 2023. № 4. С. 112-118.
- 14.ISO 9001:2015. Quality management systems - Requirements. Geneva : International Organization for Standardization, 2015. 48 p.
- 15.Зінковський А. С. Синтез алгоритмів ПД-регулювання для нелінійних об'єктів з транспортним запізненням. Автоматизація виробничих процесів. 2024. № 2. С. 78-85.
- 16.Приймак М. В. Проєктування інтелектуальних систем керування на базі програмованих логічних контролерів: підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 256 с.



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

151-24д-2026врб

Автор

151-24д-2026врб

Науковий керівник / Експерт

Модло Є.О.

ІД документу

334292938

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

підрозділ

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/12/2026

Дата редагування

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.



КПІ 1

7817

Кількість слів



КЛЦ

65300

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		0
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		2

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 фразКолір тексту

НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)

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

Я, Хороз Юрій Романович, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Автоматизація металургійного виробництва. Система автоматичного регулювання розрізу прокату кільцезокатного стану» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавав і не одержував 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. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформований, що відповідно до 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 з умовами такого розміщення.

Дата 01.06.2026

Підпис