

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до магістерської роботи

зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма: «Електромеханічні системи автоматизації та
електропривод»

На тему: «Покращення стабільності роботи електроприводів тягучого
механізму в умовах динамічного навантаження машини безперервного
лиття»

(наказ №776с від 02.09.2024)

КНУ.РМ.141.24.776-17

Виконав студент II курсу , групи ЕПА-23м _____ / Яцина І.В. /

Керівник:

к.т.н., доцент _____ /Пересунько І.І./

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент _____ /Пересунько І.І./

Завідувач кафедри,

д.т.н., професор _____ / Сінчук О.М. /

Гарант ОПП,

к.т.н., доцент _____ /Осадчук Ю.Г./

Кривий Ріг
2024 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему: «Покращення стабільності роботи електроприводів тягнучого механізму в умовах динамічного навантаження машини безперервного лиття»; *КНУ.РМ.141.24.776-17*

54 с., 26 рис., 14 літературних джерела.

Мета дослідження – вирішення існуючих недоліків системи витягування та формування заготовок МБЛЗ.

Об'єкт дослідження – системи керування швидкістю витягування заготовок МБЛЗ.

Предмет дослідження – структура та алгоритм керування швидкістю системи витягування заготовок.

У першому розділі розглянуто принцип роботи Машини безперервного розлиття сталі та її основні вузли.

У другому розділі роботи розглянуто способи покращення якості заготовок за допомогою інтеграції сучасних технологій та перспективи їх розвитку .

У третьому розділі проведений розрахунок ПД-регулятора та моделювання системи у програмному пакеті Matlab Simulink.

ЕКОНОМІЯ, ІНТЕГРАЦІЯ , ЕЛЕКТРОПРИВОД, ЕФЕКТИВНІСТЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	2
1. Опис машини безперервного розливання заготовок	4
1.1 Загальний опис машини	4
1.2 Тягнучі та виправляючі пристрої	9
1.3 Керування машиною форми.	16
1.4 Вимірювання рівня випромінювання литійної форми	16
1.5 Точність та стабільність сигналу рівня литійної форми	18
2. Інтеграція сучасних технологій у МБРЗ	20
2.1 Інтеграція сучасних технологій у МБРЗ з використанням П та ПІД-регуляторів	20
2.2 Принцип роботи П та ПІД-регуляторів	21
2.3 Використання машинного навчання для оптимізації управління процесами	24
2.4 Можливості машинного навчання у МБРС	25
2.5 Порівняння використання П-регуляторів, ПІД-регуляторів і методів машинного навчання	30
3. Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор	32
3.1 Основні відомості	32
3.2 Розрахунок ПІД-регулятора	33
3.3 Економічний аналіз модернізації П-регулятора до ПІД-регулятора	40
3.4 Ефективність впровадження ПІД-регулятора	43
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ВСТУП

Машина безперервного розливу сталі (МБРС) є важливою технологією сучасної металургії, яка дозволяє ефективно перетворювати рідку сталь у затверділі заготовки різних форм – сляби, блюми або квадратні заготовки. Цей процес значно підвищує продуктивність, зменшує витрати матеріалів і забезпечує високу якість кінцевої продукції.

Процес починається з подачі рідкої сталі в проміжний ковш. Цей ковш виконує роль буферної ємності, що забезпечує рівномірний і стабільний потік металу в машину. Тут також можуть проводитися додаткові металургійні операції, такі як видалення неметалевих включень, підтримка оптимальної температури сталі або продувка аргоном для очищення металу від газових бульбашок. Щоб запобігти окисленню рідкої сталі, на поверхню розплаву додають спеціальні шлакоутворюючі суміші.

З проміжного ковша сталь подається в кристалізатор через спеціальне водоохолоджуване сопло. Це сопло забезпечує стабільну і безперервну подачу металу, запобігаючи його передчасному затвердінню. Кристалізатор є ключовим елементом машини безперервного розливу сталі.

Після виходу з кристалізатора заготовка, що має тверду оболонку і рідке ядро, потрапляє в зону вторинного охолодження. Тут за допомогою розпилення води або водяного туману відбувається подальше охолодження і затвердіння металу. Інтенсивність охолодження залежить від марки сталі та геометрії заготовки: низьковуглецеві сталі потребують більш інтенсивного охолодження, тоді як для високовуглецевих сталей використовується м'який режим, щоб уникнути утворення тріщин через термічні напруження.

Заготовка витягується з машини за допомогою серії роликів, які забезпечують її рівномірний рух. Система витягування налаштована так, щоб уникнути деформацій і зберегти стабільність процесу. Швидкість витягування ретельно регулюється автоматизованими системами в залежності від температурного стану металу та його затвердіння. Важливо зазначити, що в цій зоні використовуються технології електромагнітного

перемішування (EMS), які допомагають рівномірно розподілити тепло і домішки в рідкому ядрі, зменшуючи ризик утворення внутрішніх дефектів, таких як центральна пористість або сегрегація. Робота машини безперервного розливу сталі повністю контролюється автоматизованими системами управління. Сенсори слідкують за температурою, рівнем металу в кристалізаторі, швидкістю витягування та іншими важливими параметрами процесу. Це дозволяє зменшити ризик виникнення дефектів, таких як поверхневі тріщини, усадкова пористість або внутрішні включення. Завдяки інтеграції сучасних систем моніторингу, таких як тепловізійні камери та ультразвукові датчики, можливо своєчасно виявляти і коригувати відхилення в процесі.

Машина безперервного розливу сталі є високотехнологічною системою, яка забезпечує високу ефективність, мінімізацію втрат металу та стабільну якість заготовок. Вона дозволяє виробляти широкий асортимент продукції, адаптуючи процес під різні марки сталі та типи заготовок. Завдяки автоматизації, сучасним системам охолодження і контролю, МБРС стає основою для виробництва сталі у всьому світі.

РОЗДІЛ 1. ОПИС МАШИНИ БЕЗПЕРЕВНОГО РОЗЛИВАННЯ ЗАГОТОВОК

1.1 Загальний опис машини

Безперервний розлив сталі — це технологічний процес, у якому рідка сталь перетворюється на злитки-заготовки, що формуються безперервно. Ці заготовки потім використовують для прокатки, кування або пресування. Формування відбувається завдяки постійному надходженню розплавленого металу в кристалізатор з одного боку та одночасному видаленню частково затверділих заготовок з іншого.

Процес реалізується на спеціальному обладнанні — установках безперервного розливу сталі (УБРС), які також називають машинами безперервного розливу заготовок (МБРЗ).

Метал швидко твердіє в кристалізаторі завдяки використанню матеріалів з високою теплопровідністю (таких як мідь або латунь) та інтенсивному охолодженню водою. Частково затверділі злитки, що виходять із кристалізатора, розрізаються на потрібну довжину киснево-ацетиленовими різачками, після чого їх додатково охолоджують водою, що подається через форсунки.

Машини безперервного розливу сталі зазвичай використовують для виготовлення таких заготовок, як сляби та блюми.

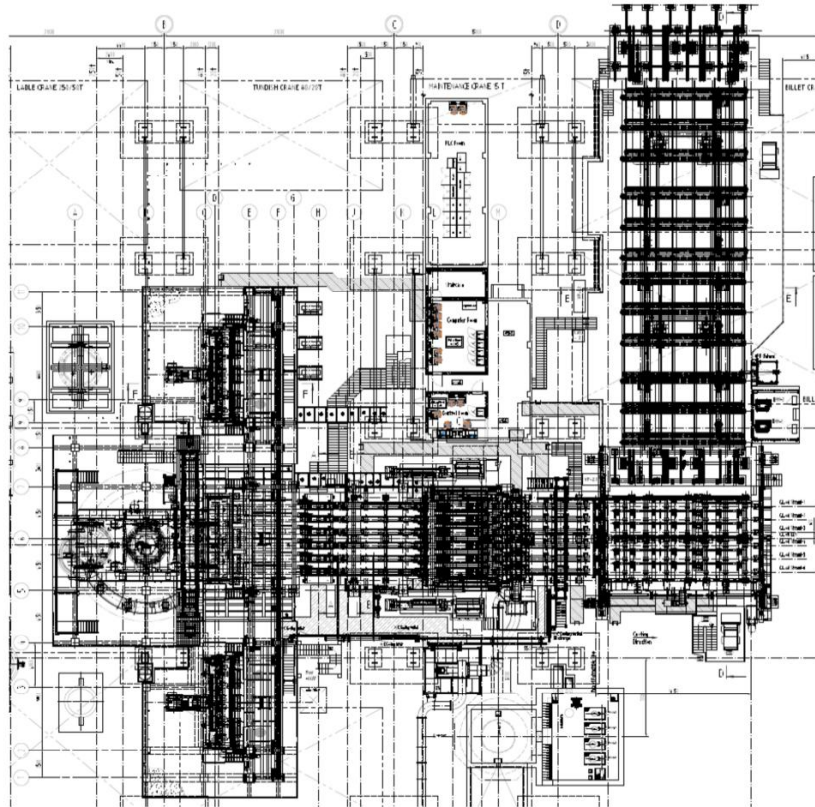


Рис.1.1 Загальний план (вид зверху)

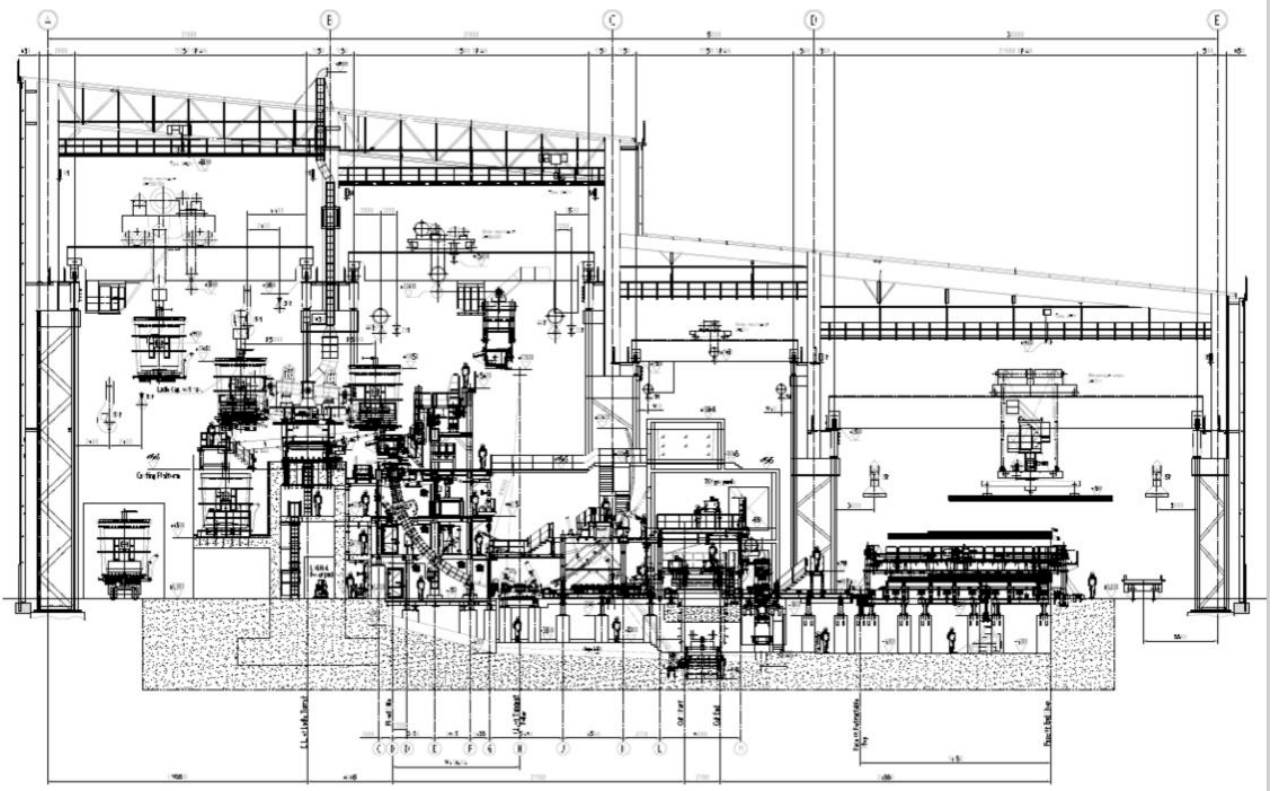


Рис.1.2 Загальний план(повздовжнє січення)

Безперервне розливання сталі є одним із найсучасніших та найефективніших методів виробництва сталевих заготовок, який має суттєві переваги над традиційними технологіями. Цей метод дозволяє оптимізувати процеси виробництва, знизити витрати та забезпечити високу якість кінцевого продукту.

Завдяки використанню безперервного розливання витрати металу на виробництво 1 тонни готового прокату зменшуються на 10–15%. Це досягається за рахунок скорочення обрізків головної та донної частин заготовок. Традиційні методи розливання передбачають більшу частку відходів, тоді як у безперервному процесі обрізки мінімальні.

Побудова металургійного заводу обходиться дешевше завдяки відсутності потреби у складному додатковому обладнанні. Зокрема, виключається необхідність: парку чавунних виливниць, які використовуються в традиційних методах; спеціалізованого обладнання для підготовки виливниць та вилучення зливків; дорогих блюмінгів або слябінгів, які обтискають великі злитки для подальшого перетворення в заготовки.

Усе це спрощує загальну організацію виробництва і знижує витрати.

Безперервний метод відкриває можливості для автоматизації процесу на всіх етапах. Це не лише спрощує роботу операторів, а й забезпечує стабільність і точність виробничих процесів, мінімізуючи вплив людського фактора.

Завдяки високій швидкості охолодження металу під час затвердіння забезпечується краща однорідність хімічного складу та механічних властивостей. Це покращує якість готових виробів та робить їх більш надійними у використанні.

Процес починається з подачі розплавленої сталі у спеціальний пристрій — кристалізатор. Він має форму трубчастої виливниці, виготовленої з міді, що забезпечує високий рівень теплопровідності. Стінки кристалізатора інтенсивно охолоджуються водою, яка циркулює через канали, розташовані в

його стінках. Така конструкція дозволяє забезпечити рівномірне охолодження та швидке утворення твердої оболонки металу.

На початку процесу в кристалізатор вводиться тимчасове дно, відоме як затравка. Після подачі рідкого металу він починає тверднути у зонах, що прилягають до стінок кристалізатора та затравки. Поступово формується оболонка заготовки, яка витягується з кристалізатора із заздалегідь заданою швидкістю.

Рівень рідкої сталі у кристалізаторі підтримується стабільним упродовж усього процесу. Для зниження зусиль, необхідних для витягування, кристалізатор виконує зворотно-поступальні рухи вздовж своєї осі. На внутрішні стінки подається мастило, що додатково зменшує тертя. Поверхня рідкої сталі захищена від окиснення шаром синтетичного шлаку або інертним газом, наприклад аргоном.

Після виходу з кристалізатора заготовка з рідкою серцевиною потрапляє в зону вторинного охолодження. У цій зоні на її поверхню подається розпорошена вода через форсунки. Інтенсивне охолодження забезпечує поступове затвердіння металу по всьому перерізу заготовки.

Коли метал повністю затвердіє, заготовка надходить на етап розрізання. Її ріжуть на частини заданої довжини, які потім використовуються для подальшої обробки, наприклад, прокатки, кування чи штампування.

Готові заготовки, отримані методом безперервного розливання, відрізняються високою якістю. Завдяки однорідності хімічного складу як уздовж заготовки, так і в її поперечному перерізі, механічні властивості сталі залишаються стабільними. Це забезпечує високу надійність і довговічність металевих виробів, виготовлених із таких заготовок.

Завдяки своїм численним перевагам безперервне розливання сталі стало основним методом у сучасній металургії. Усі нові сталеплавильні цехи проектуються з урахуванням цієї технології, а також активно модернізуються існуючі виробництва.

Максимальна продуктивність установок безперервного розливання сталі досягається у поєднанні з кисневими конвертерами. У таких умовах забезпечується синхронізація циклів випуску сталі з конвертера та її розливання, що дозволяє підтримувати процес безперервним упродовж тривалого часу.

Загалом, впровадження технології безперервного розливання значно підвищує ефективність виробництва, знижує витрати та сприяє створенню якісної металопродукції.

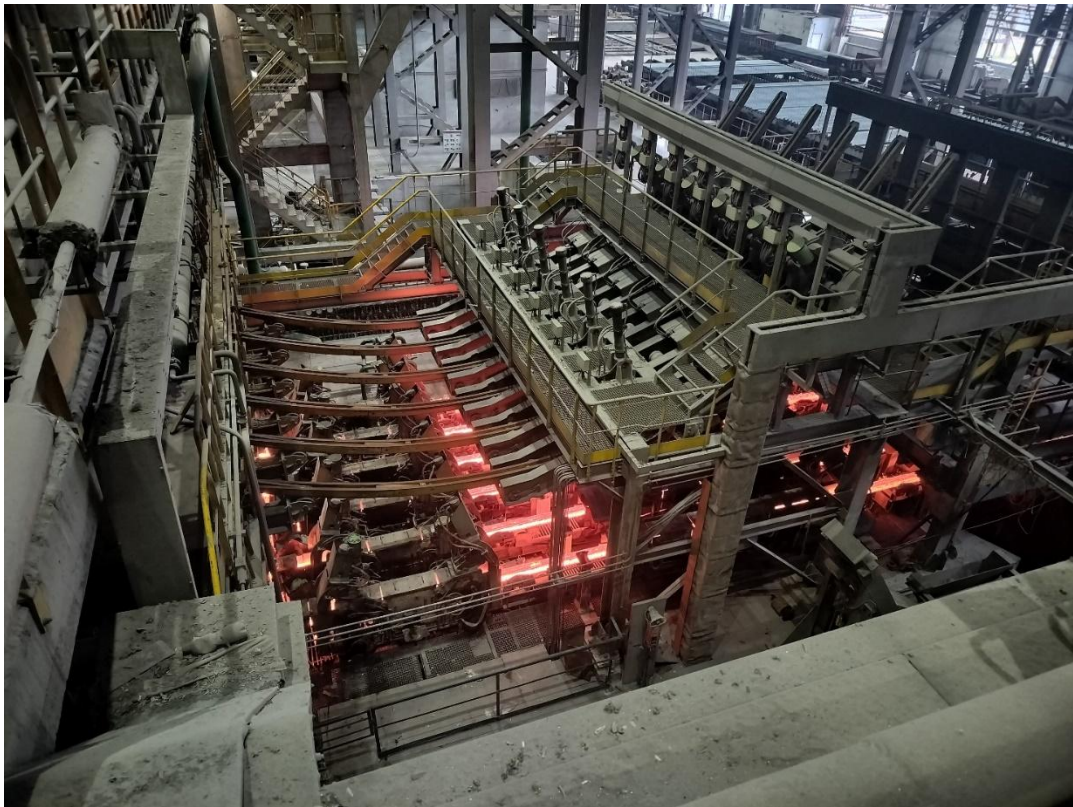


Рис.1.3 Тягово-випрямлючий механізм МБРЗ-2

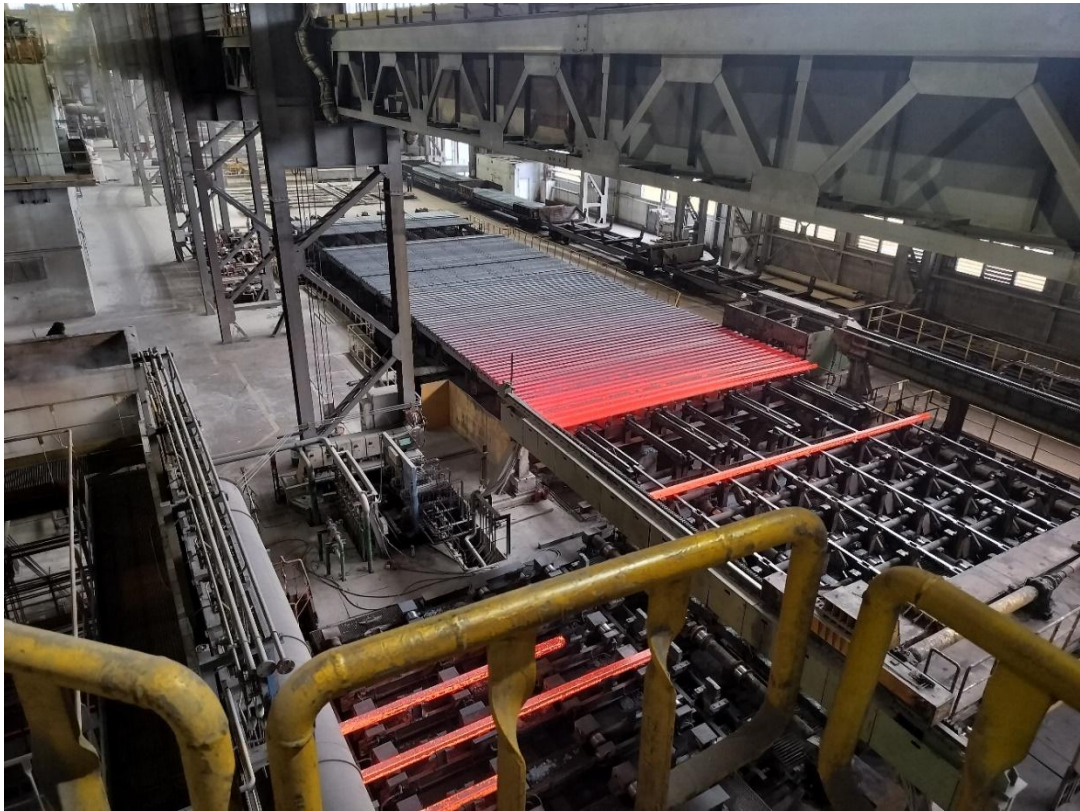


Рис.1.4 Крокуючий холодильник

1.2 Тягнучі та виправляючі пристрої

Елементи, необхідні для запуску процесу лиття, для переміщення та зберігання затравки, для керування швидкістю гарячого потоку та для переміщення потоку в кінці лиття, мають такі функції та пристрої:

- контроль тяги тягнучих і виправляючих пристроїв
- керування тиском і рухом гідравлічних хитних важелів вгору/вниз
- система зберігання затравки
- обрізка тягнутого ролика біля різальної машини.

Керування цими функціями вимагає високого рівня координації програмного забезпечення. Через це в цьому розділі узагальнено особливості управління.

Див. нижче профільну проекцію.

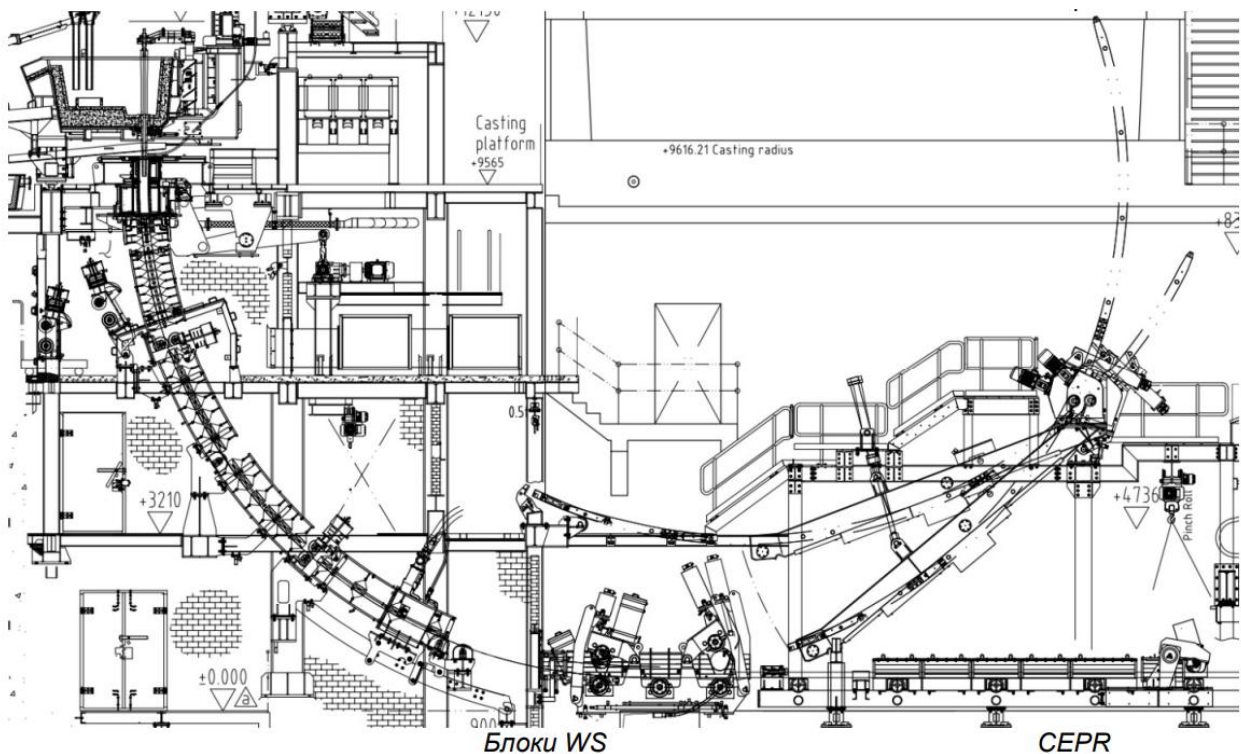


Рис.1.5 Профільна проекція

Тягнучі та виправляючі пристрої складаються з двох блоків (WD і ST), кожен з яких має верхні та нижні ролики. Блок WD, розташований поруч з охолоджувальною камерою (відвідні ролики), оснащений двигунами (по одному на кожен ролик, всього 2 двигуни). Блок ST, розташований далеко від охолоджувальної камери, має ролики, які не працюють. Блоки називаються WDU та STU відповідно до напрямку лиття. Тягнучі ролики використовуються для введення або втягування жорсткої затравки та вилучення потоку для лиття. Кожен двигун оснащений вбудованим гальмом для утримання жорсткої затравки в початковому положенні, якщо відбувається переналаштування потоків МБРЗ (машина для неперервного лиття заготовок). Усі двигуни тягнучих валів оснащені вбудованим імпульсним генератором, що використовується як лічильник для функцій

відстеження. Верхні ролики тягнучого та виправляючого пристрою можуть бути підняті та опущені за допомогою хитних важелів.

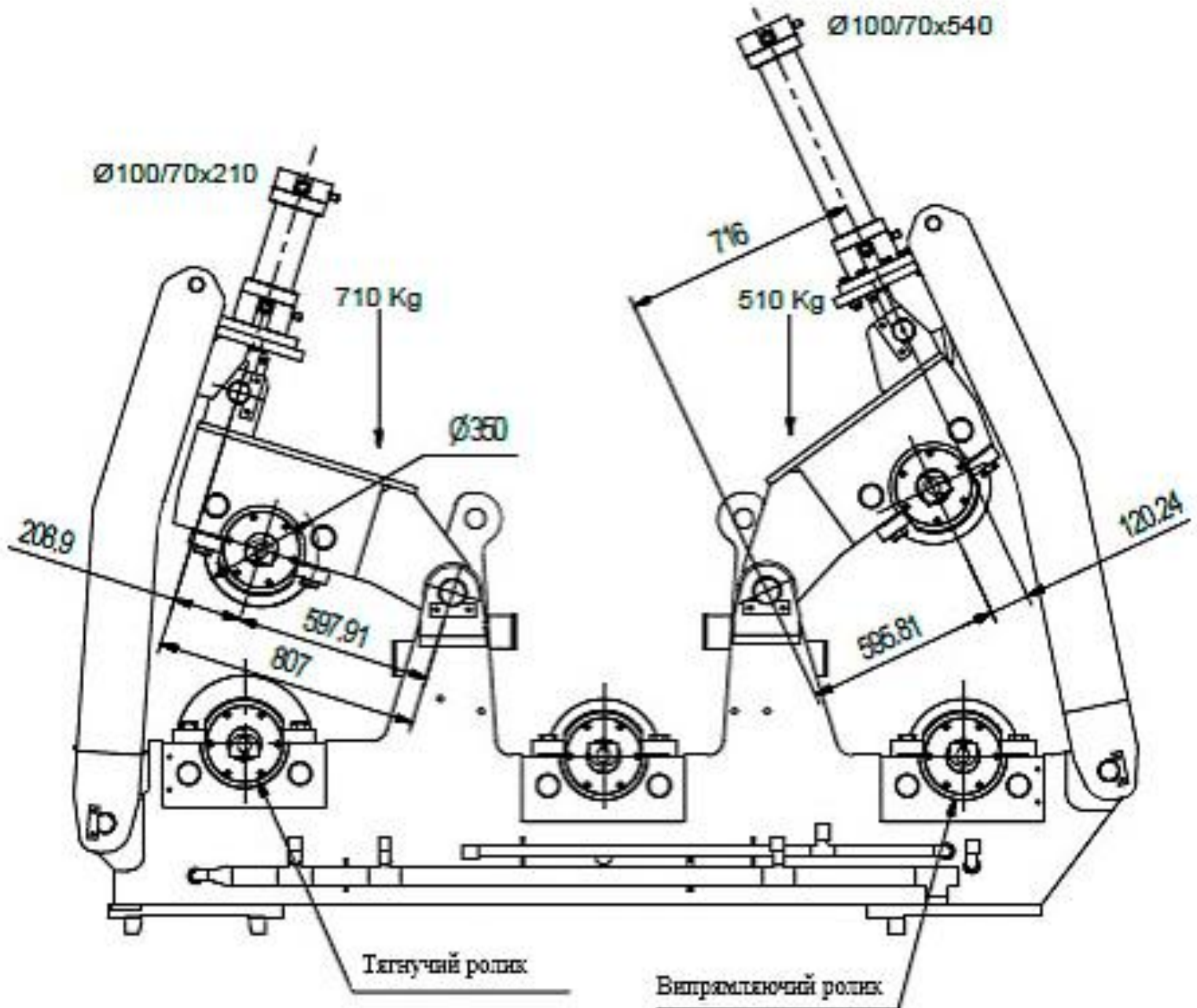


Рис.1.6 Тягнучо-виправляючий механізм

Хитні важелі переміщуються гідравлічно у положення вгору/вниз. Виправляючий ролик виконує функцію випрямлення вигнутого потоку в прямолінійну форму. Крім того, при переміщенні цих роликів під час переходу між затравкою та гарячим потоком ці дві частини можуть бути

відокремлені одна від одної. Це відключення є автоматичною процедурою, яка не може бути виконана вручну під час режиму лиття через точний час, необхідний для успішного виконання операції. Швидкість двох двигунів змінного струму для тягнучих роликів (WDU) і швидкість тяги верхнього ролика регулюються перетворювачами частоти. Щоб встановити певний розподіл навантаження між цими трьома двигунами, установку верхніх приводів можна відрегулювати в межах від -5 до +5% від основного сигналу установки. Між трьома приводами немає зворотного зв'язку по швидкості або керуванню навантаженням.

В механізмі використовуються асинхронні двигуни потужністю 3.3 кВт

SIEMENS IE2® CE

Made in Czech Rep. D-90441 Nürnberg

3~MOT 1C V2112B 1LE15011BB222FB4-Z/UD 1712/1991928-006-003

IEC/EN 60034 112M IMB5 IP55 Brake: 2LM8060-6NA60

55kg Th.CL. 155(F) -20° C ≤ TAMB ≤ 60° C 400V AC 50/60Hz 0.28A

Bearing DE 6206-2ZC3 TH.CL. 155(F) 60Nm
NE 6206-2ZC3

V	Hz	A	kW	cosφ	NOM.EFF	1/min	IE-CL
230 Δ	50	11.9	3.3	0.81	85.9	1460	IE2
400 Y	50	6.9	3.3	0.81	85.9	1460	IE2
400 Y	60	6.5	3.7	0.82	87.5	1760	IE2
400 Y	60	6.5	3.7	0.82	87.5	1760	IE2


STOP BRAKE

Рис.1.7 Інформаційна табличка двигуна

Configuration | Drive data sets | Command data sets | Units | Reference variables - setting | I/O configuration


Name: Control type: [2]

Control_Unit.Closed-loop control module




Type:	G120 CU240E-2 DP
Order no.:	6SL3244-0BB12-1PA1
Firmware version:	4708317

Control_Unit.Power unit



Type:	G120 PM240-2 IP20
Order no.:	6SL3210-1PE21-4AL0
Input voltage:	400 Vrms
Power:	5.50 kW

Control_Unit.Motor



Motor type:	[1] Induction motor
Motor rated speed:	1460.0 rpm
Motor rated current:	6.90 Arms
Motor rated power:	3.30 kW
Motor rated voltage:	400 Vrms
Motor rated frequency:	50.00 Hz

Рис. 1.8 Інформація про систему ПЧ-АД

Однолінійна схема живлення струмкових шаф

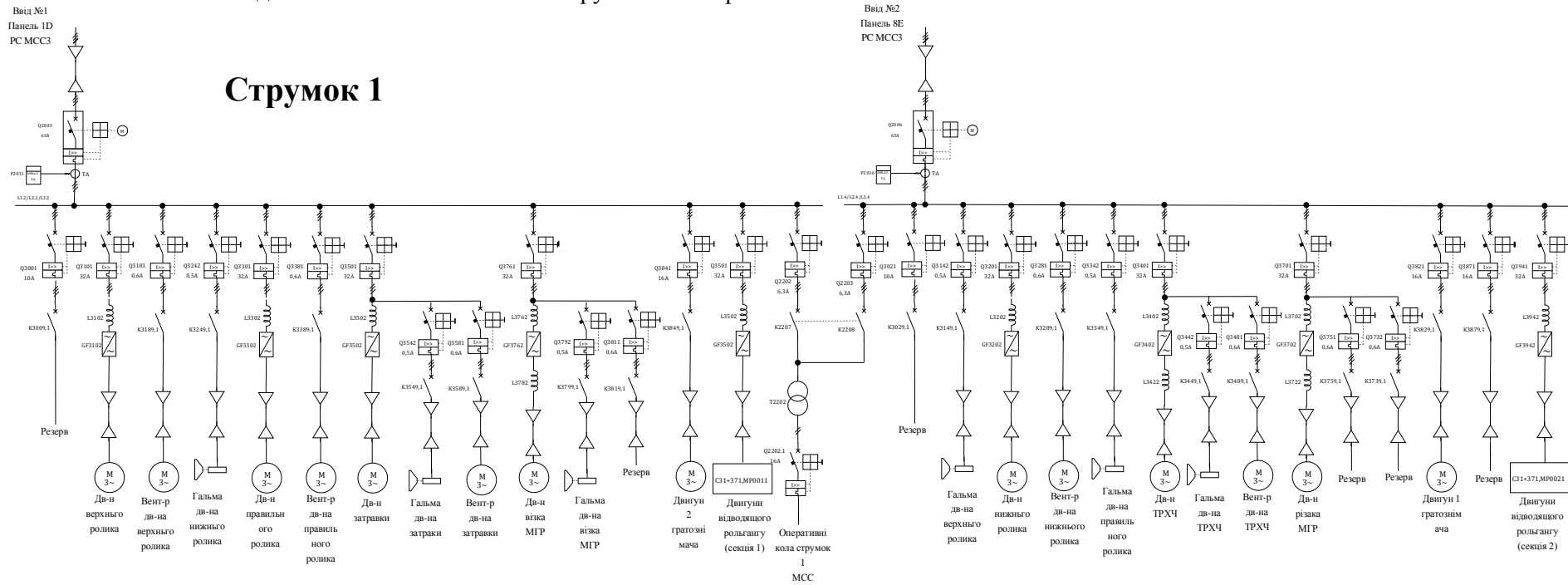
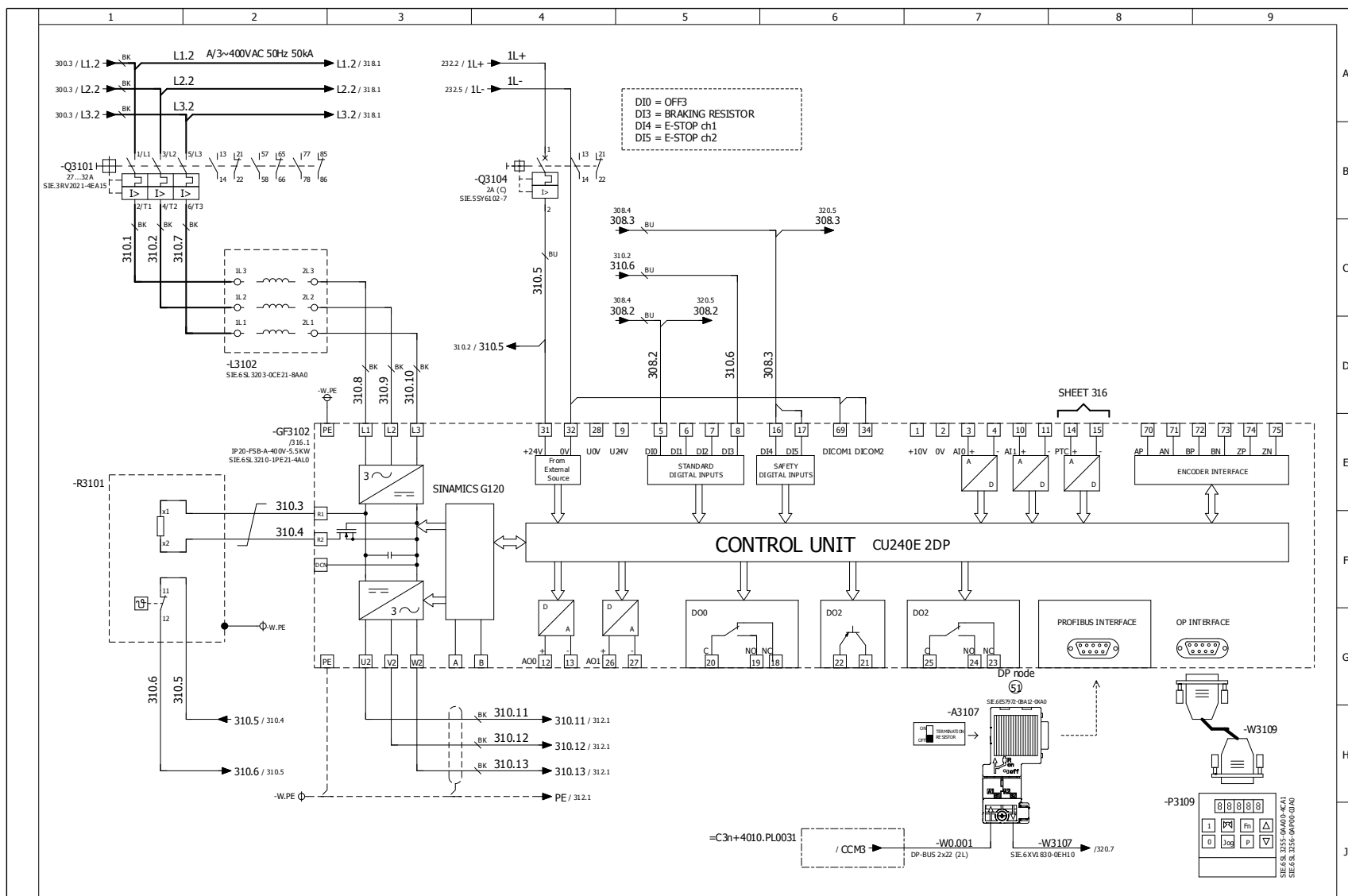


Рис. 1.9 Однолінійна схема живлення струмкових шаф (струмок № 1)



		DATE	JULY 17	AMKR A0085			Strand n Motor Control Center Withdrawal & Straightening Unit 291		Customer Drawing Number = C3n 341-15-2.1.8.10-19	
1	ISSUE	24/01/2018	SIEMENS	CHK D	A.D.		Ukraine	ARCHIVE No: A0085 AMKR PWR	DRW. No: A0085.C3-E25	Next: 312
REV.	DESCRIPTION	DATE	NAME	TYPE: C3n STRANDS: 6					Sheet: 310	

Рис. 1.10 Схема підключення перетворювача частоти

1.3 Керування машиною

Машина оснащена різними контрольованими роликами для маніпулювання затравкою та гарячим потоком у литійній машині. Ролики, які можна контролювати за швидкістю та верхнім/нижнім положенням, — це тягнучі блоки (WDU), виправляючі блоки (STU) і протяжний ролик для обрізки (CEP). Протяжний ролик затравки (DBPR), розташований на пристрої зберігання DB, використовується для утримання (за допомогою пружин або гідравлічних циліндрів) затравки та її переміщення у напрямку до литійної форми або відливки (за допомогою двигуна із зубчастими передачами, що з'єднують 2 ролики). STU використовуються для від'єднання DB від гарячого потоку під високим тиском і випрямлення гарячого потоку з контролем тиску.

Для керування тягнучими блоками (WDU), виправляючими блоками (STU) і протяжним роликом для обрізки (CEP) використовується дані рівня сталі у кристалізаторі, в залежності від рівня сталі там перетворювач частоти регулює швидкість двинунів. У свою чергу перетворювач частоти керується ПЛК яка отримує дані з радіаційного датчика.

1.4 Вимірювання рівня випромінювання литійної форми

Функція системи вимірювання рівня в литійній формі полягає в тому, щоб вимірювати фактичний рівень сталі у верхній частині литійної форми (зазвичай це вікно шириною 180 мм на відстані 80 мм від верхньої частини мідної трубки) і передавати цю інформацію до ПЛК (програмованого логічного контролера) для відповідного регулювання рівня в литійній формі.

У режимі закритого лиття (заслінка) ПЛК використовує сигнали для керування положенням важеля заслінки, а при відкритому литті

(регулювання швидкості WD) – для регулювання швидкості лиття, щоб підтримувати заданий рівень сталі в литійній формі.

Аналіз поведінки рівня в литійній формі може бути виконаний для попередження та реєстрації коливань рівня, які можуть викликати дефекти якості поверхні.

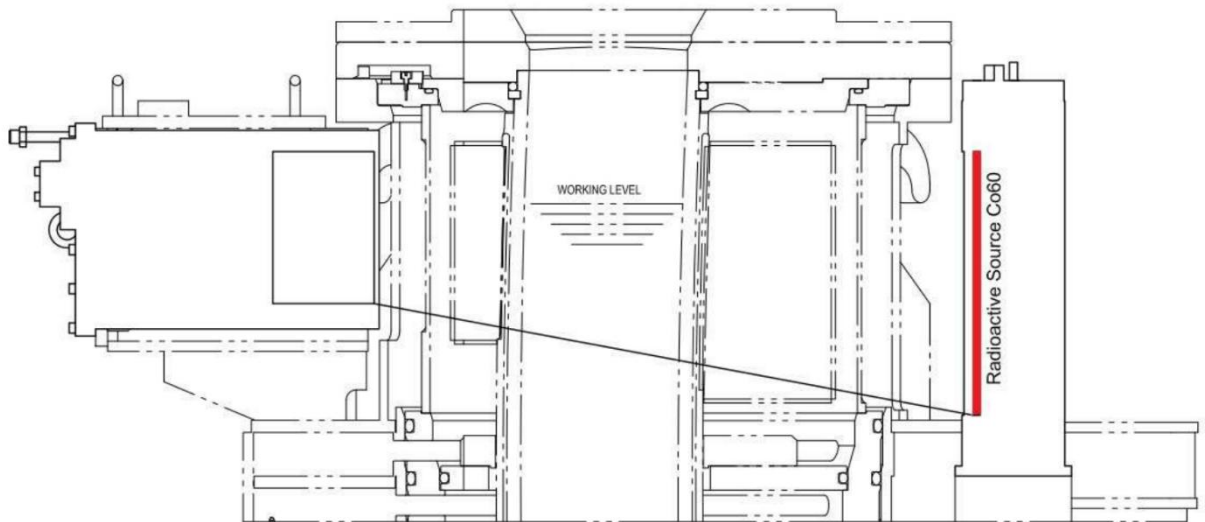


Рис.1.9 Робочий рівень сталі у кристалізаторі

Рівень у формі складається з наступного:

- Джерело випромінювання
- Матеріал зі змінною здатністю до поглинання (рідка сталь у формі)
- Сцинтиляційний лічильник
- Блок обробки сигналів і операторський інтерфейс (блок обробки рівня випромінювання (RPU))

Джерело монтується в захисному сталевому корпусі, облицьованому свинцем, і може вмикатися та вимикатися за допомогою механізму затвора. Джерело, так званий «джерело-олівець», являє собою довгий і тонкий стрижень з Co^{60} . Він випромінює гамма-частинки з відносно стабільною

швидкістю через вузьке щілинне вікно захисного кожуха, і отриманий промінь випромінювання спрямовується через литійну форму до детектора. Потужність і геометрія джерела обрані так, щоб відповідати діапазону розмірів профілю, який підлягає литтю, та необхідній довжині вимірювального вікна. Довжина джерела-олівця відносно детектора та розмір профілю форми визначають діапазон у міліметрах, в межах якого рівень рідкої сталі може бути виявлений та вимірний. Також слід враховувати коефіцієнт ослаблення сталі. Коли гамма-частинки проникають через сталь, вони втрачають енергію зі швидкістю, пропорційною квадрату глибини проникнення. Тому будь-яка зміна розміру профілю сталі, через який повинні проходити гамма-частинки, впливає на кількість частинок, які будуть виявлені (завдяки підвищеному затуханню частинок по товщині сталі) і, відповідно, на розрахунковий рівень сталі. Хоча джерело оптимізоване для діапазону розмірів профілів, які повинні бути відлиті, система вимірювання рівня повинна бути відкалібрована при кожній зміні розміру профілю, як описано нижче. Рідка сталь діє як бар'єр змінного поглинання наступним чином. Це бар'єр, оскільки сталь поглинає або зупиняє гамма-частинки, і він змінюється, оскільки кількість сталі на шляху випромінювання змінюється зі зміною рівня розплавленої сталі в литій формі. На протилежному боці форми від джерела знаходиться детектор або сцинтиляційний лічильник. Це пристрій, який підтримується в охолодженому стані та з відносно постійною температурою за допомогою водяного охолодження, використовуючи охолоджувальну воду для литійної форми, створює стабільний опорний сигнал, пропорційний кількості отриманих гамма-частинок. Цей сигнал передається на процесор виявлення рівня через екрановані кабелі. Оскільки відома геометрія пристроїв виявлення, властивості джерела, коефіцієнт затухання сталі та характеристики детектора, можна розрахувати рівень рідкої сталі в литій формі в залежності від кількості гамма-частинок, отриманих у даний момент. Це перетворюється в вимірювання від базової точки (встановленої під час калібрування) за допомогою процесора

вимірювання рівня і передається у вигляді аналогового сигналу на контролер рівня литійної форми.

1.5 Точність та стабільність сигналу рівня литійної форми

В ідеалі, отриманий сигнал рівня є повністю стабільним і точним вимірюванням рівня сталі, однак на практиці на сигнал можуть впливати кілька факторів наступним чином:

1) Точність вимірювання рівня зазвичай складає приблизно $\pm 3\%$ діапазону вимірювання рівня.

2) Статистична флуктуація випромінювання джерела, обрана стала часу (τ) для розрахунку середнього значення та виміряна швидкість імпульсів (n) на детекторі. Середні коливання зчитування (dI) відповідають значенню 1-сигма і розраховуються наступним чином:

$$(I = \text{початкова інтенсивність}) = \frac{\delta I}{I} = \frac{\pm 1}{2 \times n \times \tau}$$

3) Вплив, пов'язаний з додаванням литійного порошку.

4) Вплив вилучення шлаку.

5) Вплив коливання литійної форми.

6) Вплив відкладень окислів алюмінію та відриву відкладень окислів алюмінію від сталеразливального стакана тощо з раскислених алюмінієм сталей.

7) Вплив, пов'язаний зі зміною потоку сталі у формі через консистенцію, однорідність та температуру сталі.

РОЗДІЛ 2. ІНТЕГРАЦІЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У МБРЗ

2.1 Інтеграція сучасних технологій у МБРЗ з використанням П та ПІД-регуляторів

Машини безперервного розливання заготовок (МБРЗ) є одними з ключових технологій у сучасній металургії. Ці установки забезпечують високу продуктивність, економію матеріалів і енергоресурсів, а також стабільну якість сталевих заготовок. У таких системах особливо важливим є контроль рівня рідкої сталі у кристалізаторі, що є критичним для запобігання утворенню дефектів, таких як тріщини, центральна пористість або сегрегація.

Забезпечення стабільності цього процесу значною мірою залежить від вибору технології управління. Зокрема, регулятори, такі як П та ПІД-регулятори, відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного рівня рідкої сталі, адаптуючись до динамічних змін у процесі.

Наприклад, у реальних умовах зміни швидкості витягування заготовки або температури рідкої сталі можуть спричинити коливання рівня у кристалізаторі. У таких ситуаціях:

П-регулятор може забезпечити базовий рівень стабілізації, але його ефективність значно знижується у випадках, коли процес характеризується великими динамічними змінами.

ПІД-регулятор, завдяки інтегральній складовій, компенсує накопичену похибку (наприклад, через довготривалі зміни рівня), а диференціальна складова дозволяє швидко реагувати на короткострокові зміни (наприклад, раптове збільшення швидкості витягування).

Приклад використання ПІД-регулятора.

На металургійному підприємстві було виявлено, що за використання П-регулятора середня кількість дефектних заготовок складала 5% від загального обсягу виробництва. Основною причиною дефектів були коливання рівня сталі у кристалізаторі під час змінної швидкості витягування.

Після впровадження ПІД-регулятора вдалося досягти таких результатів:

- зниження дефектів до 1%, що забезпечило економію матеріалів на суму понад 500,000 грн на рік.
- скорочення часу простою обладнання, пов'язаного із очищенням кристалізатора, на 15%.
- зниження споживання енергії завдяки більш точному управлінню процесом.

Таким чином, впровадження сучасних регуляторів, зокрема ПІД-регуляторів, дозволяє не тільки підвищити якість продукції, але й значно знизити витрати на виробництво. У наступних розділах буде детально розглянуто принцип роботи П та ПІД-регуляторів, їх застосування у МБРЗ, а також наведено рекомендації щодо інтеграції цих технологій у виробничий процес.

2.2 Принцип роботи П та ПІД-регуляторів

П-регулятори прості у реалізації, однак залишають статичну похибку і не завжди забезпечують достатню точність.

ПІД-регулятори компенсують ці недоліки, забезпечуючи стабільність системи навіть за змінних зовнішніх умов.

Це особливо важливо для таких процесів, як підтримання рівня рідкої сталі у кристалізаторі.

П-регулятор реалізує пропорційне управління за формулою:

$$u(t) = K_p * e(t),$$

де:

$u(t)$ — керуючий сигнал;

K_p — коефіцієнт пропорційності;

$e(t)$ — похибка (відхилення від заданого значення).

ПІД-регулятор забезпечує більш точне управління завдяки інтегральній і диференціальній складовим:

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t)dt + K_d * de(t)/dt,$$

де:

K_i — коефіцієнт інтегрування;

K_d — коефіцієнт диференціювання.

Переваги використання ПІД-регуляторів у МБРЗ:

1. Стабілізація рівня рідкої сталі у кристалізаторі.
2. Зменшення кількості дефектів у заготовках.
3. Оптимізація енергоспоживання.
4. Адаптація до змінних умов роботи.

Реалізація ПІД-регулятора у МБРЗ

Блок-схема системи керування з ПІД-регулятором

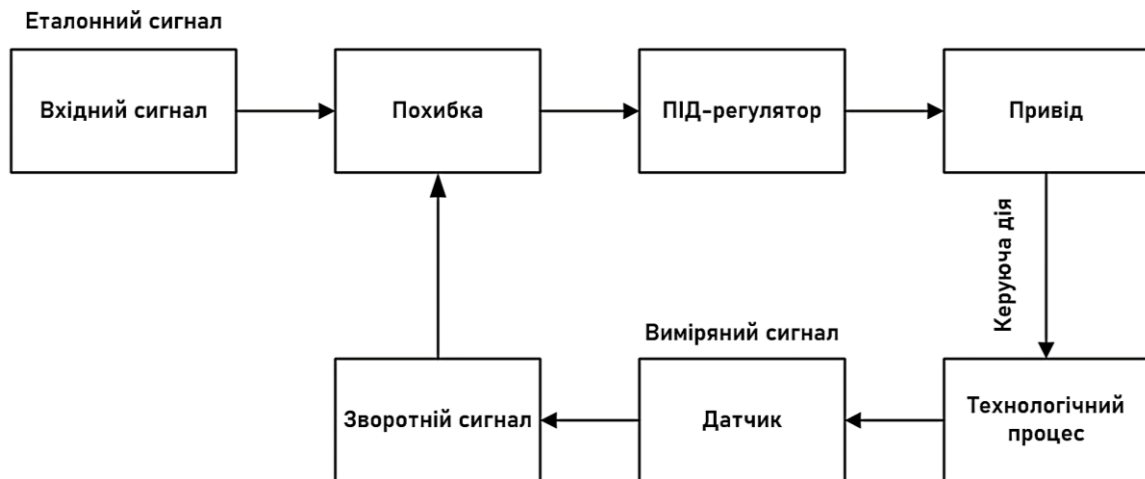


Рис. 2.1 Блок-схема системи керування з ПІД-регулятором.

Для управління рівнем сталі у кристалізаторі використовується сигнал від датчика рівня, який передається на контролер.

Контролер обчислює похибку і генерує керуючий сигнал для регулювання витрат рідини через заслінку.

Можна зробити такі висновки з інтеграцією у МБРЗ П та ПІД-регуляторів:

1. Інтеграція ПІД-регуляторів у МБРЗ дозволяє значно покращити стабільність і ефективність процесів.
2. Це забезпечує високу якість продукції, зниження дефектів і економію ресурсів.

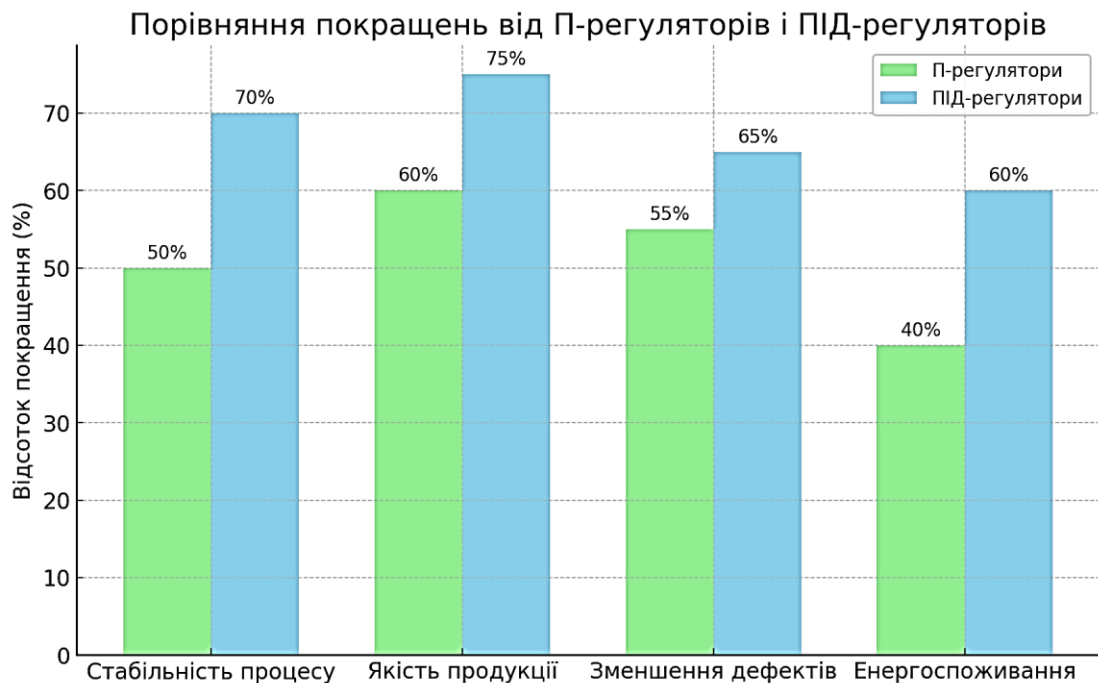


Рис. 2.2 Графік порівняння роботи регуляторів

Графік порівнює П-регулятори з ПІД-регуляторами. П-регулятори забезпечують базовий рівень управління, але мають обмеження в точності та ефективності. Наприклад, вони залишають статичну похибку і менш ефективно реагують на швидкі зміни в системі. ПІД-регулятори завдяки інтегральній та диференціальній складовим дозволяють значно зменшити похибку і швидше адаптується до змін. Це забезпечує більшу стабільність процесу, кращу якість продукції та ефективніше використання енергії.

2.3 Використання машинного навчання для оптимізації управління процесами

Машинне навчання (ML) є однією з ключових технологій сучасної цифрової епохи, яка активно впроваджується в різні галузі промисловості, зокрема в металургії. Завдяки здатності ML аналізувати великі обсяги даних, передбачати поведінку складних систем і адаптуватися до змінних умов, ця технологія значно підвищує ефективність управління технологічними процесами. У виробництві сталі, а саме в машинах безперервного розливання сталі (МБРС), застосування ML відкриває нові можливості для покращення якості продукції та зменшення виробничих втрат.

Одним із основних викликів в експлуатації МБРС є підтримання стабільного рівня рідкої сталі у кристалізаторі. Відхилення рівня може призводити до утворення дефектів у заготовках, таких як центральна пористість, поверхневі тріщини або нерівномірна структура. Наприклад, коливання рівня рідкої сталі можуть виникати через:

- зміни швидкості витягування заготовки.
- некоректну роботу охолоджувальної системи.
- нестабільність подачі металу з проміжного ковша.

Традиційні системи управління, що базуються на лінійних моделях або ручному регулюванні, часто не здатні оперативно реагувати на такі зміни, особливо якщо вони залежать від багатьох факторів. У цьому контексті машинне навчання пропонує унікальні рішення.

Як приклад:

1. Регресійні алгоритми можуть аналізувати взаємозв'язок між параметрами системи (рівень сталі, температура, швидкість витягування) та прогнозувати їх зміну.

2. Нейронні мережі здатні адаптувати параметри керування у реальному часі, забезпечуючи стабільність рівня сталі навіть за наявності значних збурень.

3. Алгоритми підкріплювального навчання дозволяють системі навчатися на основі власного досвіду, знаходячи оптимальні стратегії для зменшення коливань рівня сталі.

Проаналізувавши матеріали вже існуючих систем у виробництві використовувалася стандартна система ПІ-регулятора, яка забезпечувала стабільний рівень сталі лише в умовах, близьких до номінальних. Однак при збільшенні швидкості витягування виникали коливання, що призводили до утворення тріщин у заготовках. Запровадження системи на базі нейронної мережі дозволило передбачати такі зміни і автоматично коригувати параметри охолодження та витягування. У результаті частка дефектів зменшилася на 30%, а продуктивність установки зросла на 15%.

Таким чином, машинне навчання є потужним інструментом, який дозволяє не лише автоматизувати управління процесами, але й зробити їх більш адаптивними до змінних умов, що є критичним для сучасної металургії. У цьому документі буде розглянуто підходи та алгоритми машинного навчання для оптимізації роботи МБРС із прикладом підтримання стабільного рівня рідкої сталі у кристалізаторі.

2.4 Можливості машинного навчання у МБРС

Використання машинного навчання дозволяє:

1. Аналізувати дані з датчиків (рівень сталі, температура, швидкість витягування).
2. Передбачати можливі коливання рівня сталі на основі історичних даних.
3. Автоматично налаштовувати параметри керування для стабілізації процесу.

4. Виявляти аномалії та прогнозувати виникнення дефектів.

Оптимізація процесу за допомогою машинного навчання

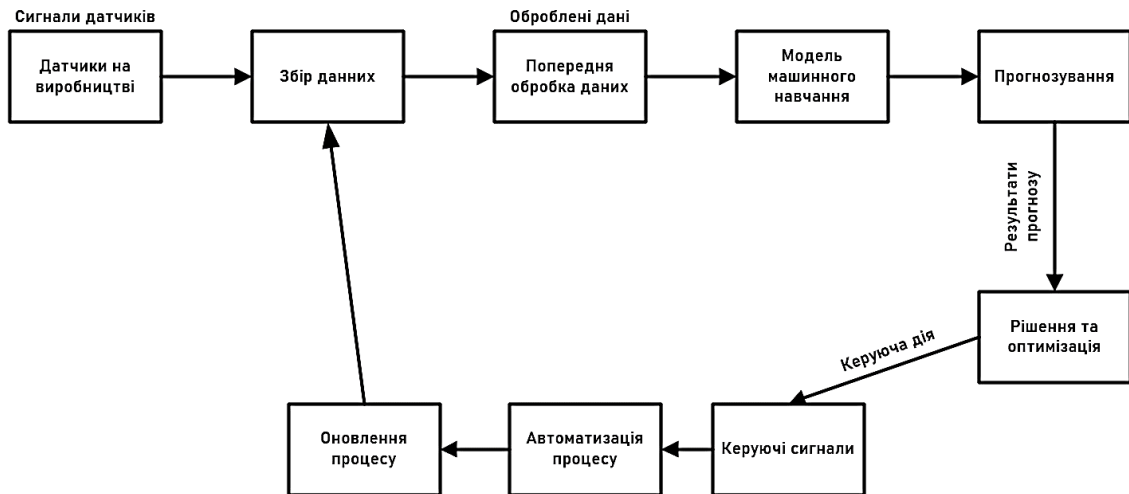


Рис.2.3 Блок-схема оптимізації за допомогою машинного навчання

Ця блок-схема ілюструє, як процес на виробництві може бути оптимізований за допомогою машинного навчання. Спочатку датчики, встановлені на виробничій лінії, збирають інформацію про стан процесу, наприклад, температуру, тиск або швидкість. Зібрані дані передаються до системи, де відбувається їх акумуляція та первинна перевірка.

На етапі попередньої обробки дані очищуються від шумів, нормалізуються, а некоректні значення видаляються. Після цього дані передаються у модель машинного навчання. Ця модель, навчаючись на історичних даних, виявляє закономірності та використовує їх для передбачення майбутніх змін у процесі.

Результати прогнозу допомагають формувати оптимальні рішення для управління процесом, наприклад, зміну швидкості роботи механізмів або регулювання подачі матеріалів. Ці рішення перетворюються на керуючі сигнали, які надсилаються до автоматизованого обладнання. Виробничі машини виконують ці дії, регулюючи процес у реальному часі.

Дані про результати цих змін повертаються до моделі машинного навчання, що дозволяє їй оновлюватися та ставати точнішою. Це створює замкнений цикл управління, де система постійно адаптується до нових умов, забезпечуючи ефективну роботу і високу якість продукції.

Для підтримання стабільного рівня рідкої сталі можна використати такі підходи:

1. «Регресійні моделі» для прогнозування рівня сталі.
2. «Нейронні мережі» для адаптивного налаштування параметрів процесу.
3. «Підкріплювальне навчання» для оптимізації роботи системи управління.

Формула прогнозування в системі машинного навчання:

$$\hat{y}(t+1) = f(x(t), x(t-1), \dots, x(t-n))$$

де:

$\hat{y}(t+1)$ — прогнозоване значення на момент часу $t+1$;
 f — функція залежності, побудована на основі алгоритму машинного навчання;
 $x(t), x(t-1), \dots, x(t-n)$ — вхідні параметри системи на різних часових інтервалах.

Якщо взяти конкретний процес МБРЗ та формула буде виглядати наступним чином:

$$\hat{y}(t+1) = f(h(t), v(t), T(t), P(t), Q(t), \dots)$$

де:

$\hat{y}(t+1)$ — прогнозоване значення рівня рідкої сталі у кристалізаторі на момент часу $t+1$;
 $h(t)$ — поточний рівень сталі, зчитаний датчиком рівня;
 $v(t)$ — швидкість витягування заготовки, виміряна витягувальним механізмом;

$T(t)$ — температура сталі у кристалізаторі, виміряна термопарою;
 $P(t)$ — тиск у системі подачі металу, зафіксований манометром;
 $Q(t)$ — витрата охолоджувальної рідини, зареєстрована витратоміром;
 f — функція залежності, побудована на основі алгоритму машинного навчання.

Алгоритм роботи системи управління з машинним навчанням для МБРЗ

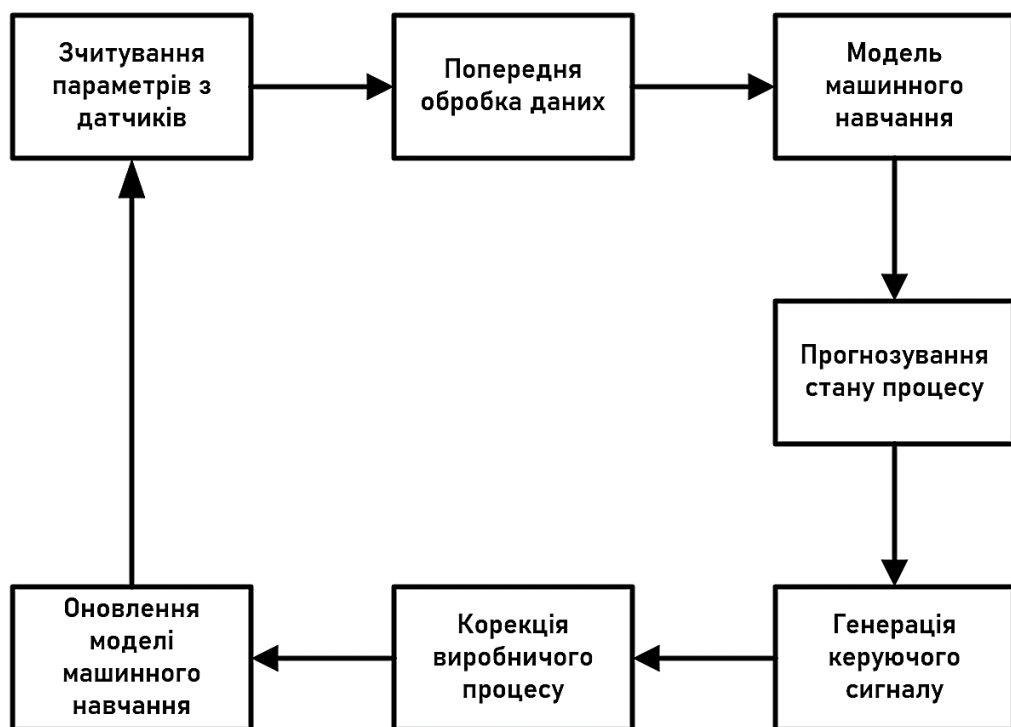


Рис. 2.4 Алгоритм роботи системи управління з машинним навчанням для МБРЗ

Робота алгоритму:

1. Датчики зчитують параметри виробничого процесу (рівень сталі, швидкість витягування, температуру, тиск, витрати).
2. Дані надходять до системи попередньої обробки, де вони очищуються та нормалізуються.
3. Підготовлені дані подаються до моделі машинного навчання.
4. Модель прогнозує майбутній стан рівня сталі у кристалізаторі.

5. На основі прогнозу генерується керуючий сигнал для корекції процесу (наприклад, регулювання витягування або подачі металу).
6. Виробниче обладнання виконує необхідні дії для стабілізації процесу.
7. Результати коригування повертаються до системи для оновлення моделі машинного навчання.

Переваги використання машинного навчання у МБРЗ:

1. Підвищення стабільності процесу.
2. Зменшення кількості дефектів.
3. Оптимізація енергоспоживання.
4. Адаптація до змінних умов роботи.

Отже використання машинного навчання у МБРС дозволяє значно підвищити ефективність та стабільність процесів, що веде до покращення якості продукції та зменшення витрат. Запропоновані методи можуть бути інтегровані у сучасні системи управління для забезпечення їх конкурентоспроможності.

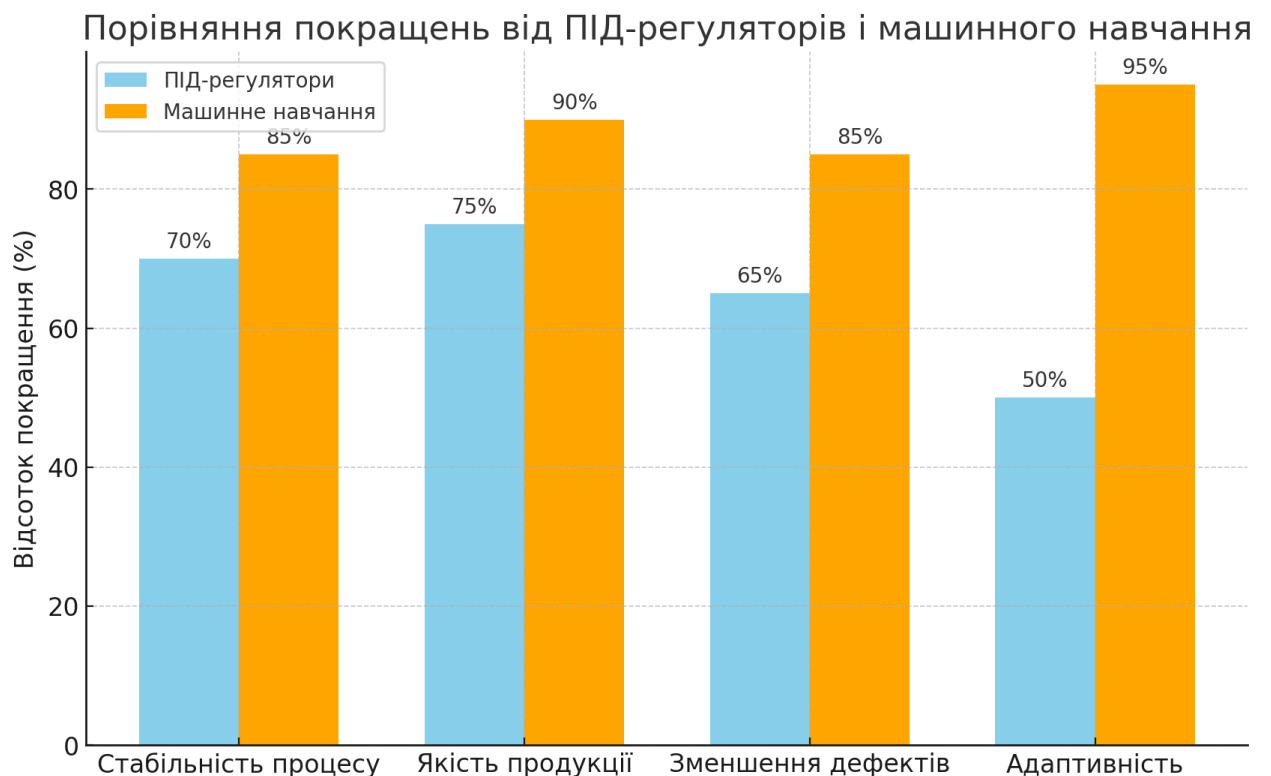


Рис. 2.5 Графік порівняння покращень між ПІД-регулятором і машинним навчанням

Графік порівнює ПІД-регулятори з машинним навчанням. Машинне навчання демонструє значно вищу ефективність, оскільки воно може прогнозувати поведінку системи, адаптуватися до складних динамічних умов і враховувати нелінійні залежності. У цьому випадку машинне навчання забезпечує більш точне управління, дозволяє зменшити дефекти до мінімуму і підвищити енергоефективність. Проте його реалізація є складнішою і дорожчою, ніж впровадження ПІД-регуляторів.

2.5 Порівняння використання П-регуляторів, ПІД-регуляторів і методів машинного навчання

Порівняння використання ПІД-регуляторів і методів машинного навчання в системах управління машинами безперервного розливання сталі показує, що кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження. ПІД-регулятор є прямим і відносно простим методом управління, який базується на математичній моделі процесу. Він забезпечує точне налаштування системи за допомогою трьох основних компонентів: пропорційної, інтегральної та диференціальної. Це рішення ідеально підходить для стабільних процесів із передбачуваною динамікою, але його ефективність знижується в умовах нестабільності або складних динамічних змін, таких як раптова зміна швидкості витягування заготовки чи температура сталі.

Машинне навчання, своєю чергою, дозволяє створювати більш складні моделі, які враховують нелінійність і нестабільність процесів. Воно використовує дані, зібрані з датчиків, для аналізу та прогнозування поведінки системи. Це забезпечує високу точність управління навіть у складних умовах, таких як швидкі зміни в системі подачі металу або температурного режиму.

Однак, ключовою перевагою ПІД-регулятора є його низька вартість впровадження. Він потребує лише простого обладнання, базового

програмування та мінімальних витрат на навчання персоналу. У свою чергу, методи машинного навчання вимагають значних інвестицій у датчики, комп'ютерне обладнання, розробку моделей та їх налаштування. Вартість таких рішень вища, а час окупності довший, що робить їх менш доступними для підприємств із обмеженим бюджетом.

Таким чином, першим кроком модернізації систем управління на МБРЗ доцільно впровадити ПІД-регулятори, які швидко забезпечать базову стабільність роботи системи та зменшення кількості дефектів. Це створить основу для подальшого впровадження машинного навчання, яке дозволить оптимізувати процеси, покращити якість продукції та забезпечити вищу продуктивність у довгостроковій перспективі. Такий підхід є економічно виправданим і поступово відкриває можливості для застосування сучасних технологій у складних виробничих процесах.

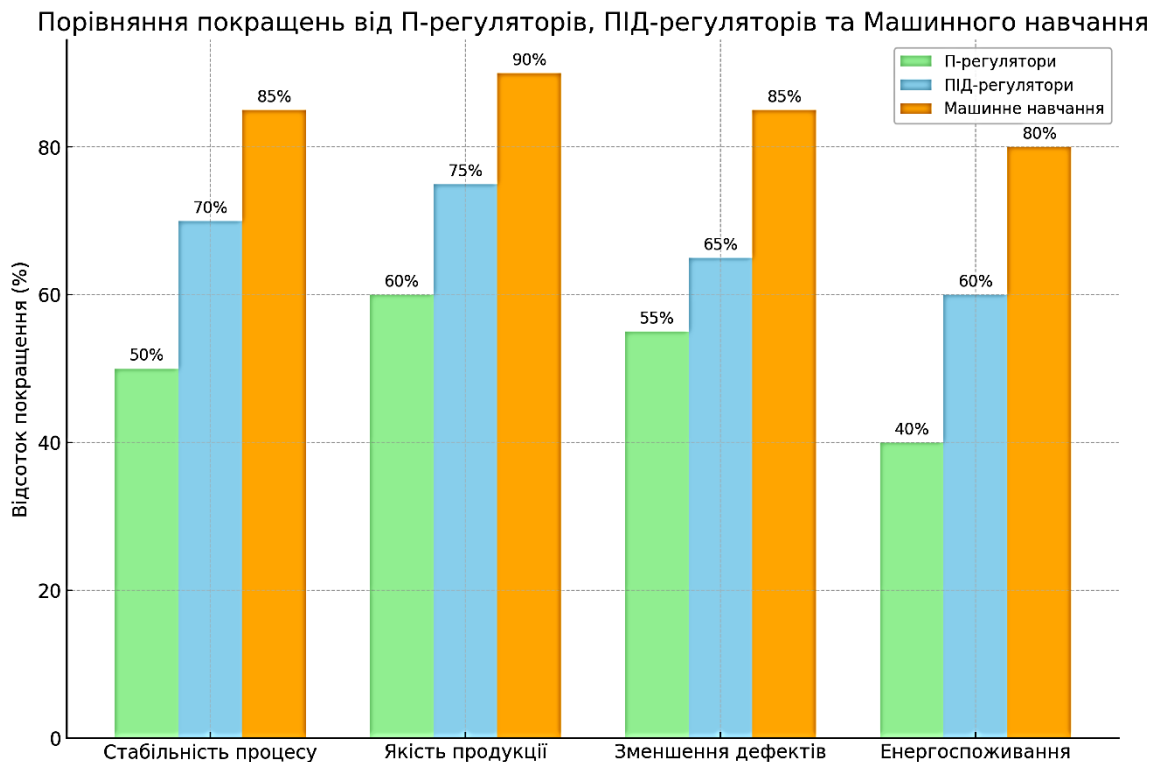


Рис. 2.5 Графік порівняння покращень між П-,ПІД-регулятором і машинним навчанням

Графік показує комплексне порівняння П-регуляторів, ПІД-регуляторів та машинного навчання. Видно, що П-регулятори є найпростішим та

найдешевшим рішенням, але їх ефективність обмежена. ПІД-регулятори значно покращують управління системою і є логічним наступним кроком, особливо за обмежених фінансових можливостей. Машинне навчання показує найкращі результати за всіма параметрами, але потребує значних ресурсів і складної інтеграції.

Таким чином, на першому етапі доцільно впровадити ПІД-регулятори як ефективне та економічно вигідне рішення. Надалі, після стабілізації процесів, перехід до машинного навчання дозволить досягти ще вищих показників якості та продуктивності.

РОЗДІЛ 3. ПРОПОРЦІЙНО-ІНТЕГРАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИЙ РЕГУЛЯТОР

3.1 Основні відомості

Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор) є, мабуть, найвідомішим регулятором в системах автоматичного керування. Пристрій призначений для підтримки заданого параметра на бажаному рівні шляхом корекції системи за допомогою трьох компонентів: пропорційного, інтегрального та диференціального. Основний принцип роботи ПІД регулятора полягає в тому, що ПІД-регулятор обчислює бажане значення мінус поточне значення системи. Помилка, яку контролер намагається мінімізувати, об'єднавши три частини: Пропорційну складову, яка реагує на поточну величину помилки та вихід пропорційний до помилки. Інтегральну складову, яка враховує накопичену помилку за певний час, та використовується для усунення постійної помилки. Та диференціальна складова, що реагує на швидкість зміни помилки, і використовується для передбачення майбутньої помилки та зменшення її коливань.

У системах, що використовують частотний перетворювач і асинхронний двигун, ПІД-регулятор має кілька важливих переваг у порівнянні з ПІ-регулятором.

ПІ-регулятор добре справляється з компенсацією статичних похибок, але його реакція на швидкозмінні вхідні сигнали або збурення може бути недостатньо швидкою. ПІД-регулятор, завдяки диференційній складовій (D-компоненті), дозволяє швидше реагувати на зміни сигналу, забезпечуючи корекцію в момент виникнення похибки. Це зменшує перерегулювання та підвищує стійкість системи.

У системі ПЧ-АД, особливо при зміні швидкості або моменту навантаження, можуть виникати коливання. Диференційна складова ПД-регулятора діє як демпфер, зменшуючи амплітуду коливань і прискорюючи їх згасання, що забезпечує більш стабільну роботу. В умовах змінних навантажень ПІ-регулятору потрібно більше часу для досягнення нової точки рівноваги. ПД-регулятор швидше пристосовується до змін завдяки одночасному впливу пропорцій.

Тому для розрахунку обираю ПД-регулятор.

3.2 Розрахунок ПД-регулятора

Розрахунок оптимізаційного контуру швидкості буду проводити по симетричному оптимуму.

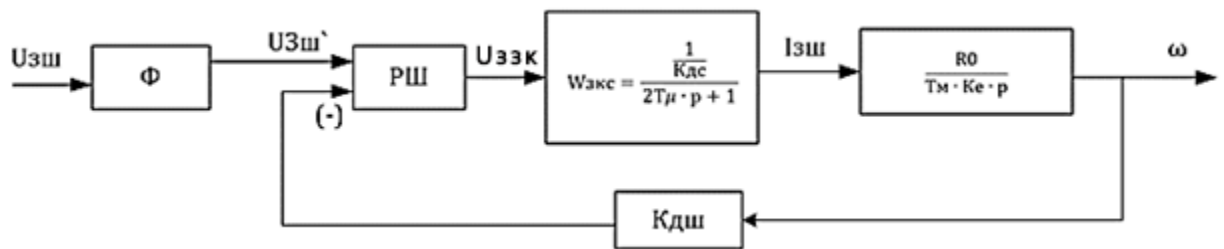


Рис. 3.1 Структурна схема замкнутої системи зі зворотнім зв'язком по швидкості

Передаточна функція фільтру:

$$W_{\Phi}(p) = \frac{1}{4T_e \cdot p + 1} \quad (3.1)$$

Передаточна функція регулятора швидкості налаштованого на симетричний оптимум:

$$W_{рш}^{co}(p) = \frac{(4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}{8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2} = \frac{(2 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1) \cdot T_{\mu} \cdot K_e \cdot p \cdot K_{дш} \cdot K_{дс} \cdot (4 \cdot T_{\mu} \cdot p + 1)}{R_0 \cdot 8 \cdot T_{\mu}^2 \cdot p^2} \quad (3.2)$$

Де, T_{μ} - некомпенсаційна постійна часу;

T_m - механічна постійна часу;

K_e - коефіцієнт електро-рухівної сили (ЕРС) двигуна;

$K_{дш}$ - коефіцієнт датчика швидкості;

$K_{дс}$ - коефіцієнт датчика струму;

R_0 - Загальний опір силової частини.

Паспортні данні двигуна для розрахунку:

$U_H, В$	$P_H, кВт$	$I_H, А$	$n_H,$ об/хв	$M_H,$ Нм	$\eta_H, \%$	$\cos\phi$	$\frac{I_{II}}{I_H}$	$\frac{M_{II}}{M_H}$	$J_{дв},$ кг*м ²
400	4	8.2	1460	26	86.6	0.81	7.1	2.5	0.0140

Паспортні данні трансформатора для розрахунку:

$S_H,$ кВА	$U_{1H},$ кВ	$U_{2H},$ кВ	$I_{1H},$ А	$I_{2H},$ А	$\Delta P_{кз},$ Вт	$U_{кз}, В$
1000	6	0.4	96.2	1202	8800	6

Загальний опір силової частини R_0 :

$$R_0 = 2 \cdot R_{тр} + R_{ув} + R_{\gamma i} + 2 \cdot R_{ст} =$$

$$2 \cdot 0.001271 + 0.01 + 3.431 + 2 \cdot 0.865 = 5.175 \text{ Ом}$$

(3.3)

Активний опір трансформатора:

$$R_{тр} = \frac{\Delta P_{кз} \cdot U_{2H}}{S_H^2} = \frac{8800 \cdot 380}{1000000^2} = 0.001271 \text{ Ом}$$

(3.4)

Повний опір фази трансформатора:

$$Z_{тр} = \frac{U_{кз} \cdot U_{2\phi H}}{100 \cdot I_{2\phi H} \cdot \sqrt{3}} = \frac{6 \cdot 380}{100 \cdot 1202 \cdot \sqrt{3}} = 0.011 \text{ Ом}$$

(3.5)

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$X_{тр} = \sqrt{Z_{тр}^2 - R_{тр}^2} = \sqrt{0.011^2 - 0.001271^2} = 0.011 \text{ Ом}$$

(3.6)

Індуктивний опір фази статора:

$$X_{CT} = \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3} \cdot I_{1Н} \cdot \lambda_{пуск}} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 8.6 \cdot 7.1} = 3.593 \text{ Ом} \quad (3.7)$$

Де $\lambda_{пуск} = \frac{I_{п}}{I_{н}} = 7.1$

Комутаційний опір випрямляча визначимо за формулою:

$$R_{\gamma B} = \frac{m \cdot X_{Tp}}{2 \cdot \pi} = \frac{6 \cdot 0.11}{2 \cdot \pi} = 0.01 \text{ Ом} \quad (3.8)$$

Де m – пульсність схеми ($m=6$);

Комутаційний опір інвертора:

$$R_{\gamma I} = \frac{6 \cdot X_{CT}}{2 \cdot \pi} = \frac{6 \cdot 3.593}{2 \cdot \pi} = 3.431 \text{ Ом} \quad (3.9)$$

Активний опір статора:

$$R_{CT} = 0.3 \cdot (1 - \eta_H) \cdot \frac{P_H}{3 \cdot I_{1\phi}^2} =$$

$$0.3 \cdot (1 - 0.84) \cdot \frac{4000}{3 \cdot 8.6^2} = 0.895 \text{ Ом} \quad (3.10)$$

Загальна індуктивність силової частини L_0 :

$$L_0 = 2 \cdot L_{CT} + 2 \cdot L_{Tp} =$$

$$2 \cdot 0.011443 + 2 \cdot 0.000035 = 0.023 \text{ Гн} \quad (3.11)$$

Де індуктивність трансформатора:

$$L_{Tp} = \frac{X_{Tp}}{\omega_M} = \frac{0.011}{314} = 0.000035 \text{ Гн} \quad (3.12)$$

Та індуктивність статора :

$$L_{CT} = \frac{X_{CT}}{\omega_M} = \frac{3.593}{314} = 0.011443 \text{ Гн}; \quad (3.13)$$

Електромагнітна постійна часу:

$$Te = \frac{L_0}{R_0} = \frac{0.023}{5.175} = 0.004 \text{ с.} \quad (3.14)$$

Коефіцієнт електро-рухівної сили (ЕРС) двигуна:

$$K_e = \frac{U_H - I_H \cdot R_{CT}}{\omega_H} = \frac{380 - 8.6 \cdot 0.865}{152.891} = 2,437 \frac{\text{Вс}}{\text{рад}} \quad (3.15)$$

де ω_H – номінальна частота обертів двигуна:

$$\omega_H = n_H \cdot 0,105 = 1460 \cdot 0,105 = 152.891 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3.16)$$

Коефіцієнт моменту двигуна:

$$K_M = \frac{M_H}{I_H} = \frac{26}{8.6} = 3,042 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{А}} \quad (3.17)$$

Коефіцієнт датчика швидкості:

$$K_{Дш} = \frac{U_y}{\omega_H} = \frac{10}{152.891} = 0.06541 \quad (3.18)$$

Коефіцієнт датчика струму:

$$K_{Дс} = \frac{U_y}{2 \cdot I_H} = \frac{10}{2 \cdot 8.6} = 0.581; \quad (3.19)$$

Механічна постійна часу:

$$T_M := \frac{J_0 \cdot R_0}{k_e \cdot k_M} = \frac{0.0140 \cdot 5.175}{2.437 \cdot 3.042} = 0.0098 \quad (3.20)$$

Некомпенсаційна постійна часу:

$$T_\mu = 0.01 \text{ с}. \quad (3.21)$$

Передаточна функція регулятора швидкості налаштованого на симетричний оптимум:

$$\begin{aligned} W_{рш}^{co}(p) &= \frac{(4 \cdot T_\mu \cdot p + 1)}{8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2} \\ &= \frac{(2 \cdot T_\mu \cdot p + 1) \cdot T_M \cdot K_e \cdot p \cdot K_{Дш} \cdot K_{Дс} \cdot (4 \cdot T_\mu \cdot p + 1)}{R_0 \cdot 8 \cdot T_\mu^2 \cdot p^2} \rightarrow \\ W_{рш}^{co}(p) &= \frac{(2 \cdot 0.01 \cdot p + 1) \cdot 0.0098 \cdot 2,437 \cdot p \cdot 0.06541 \cdot 0.581 \cdot (4 \cdot 0.01 \cdot p + 1)}{5.175 \cdot 8 \cdot 0.01^2 \cdot p^2} \rightarrow \\ W_{рш}^{co}(p) &= 0.000175 \cdot p + 0.218 \cdot \frac{1}{p} + 0.01312; \quad (3.22) \end{aligned}$$

Регулятор має пропорційно-інтегрально-диференціальну структуру.

Принципова схема реалізації має вигляд:

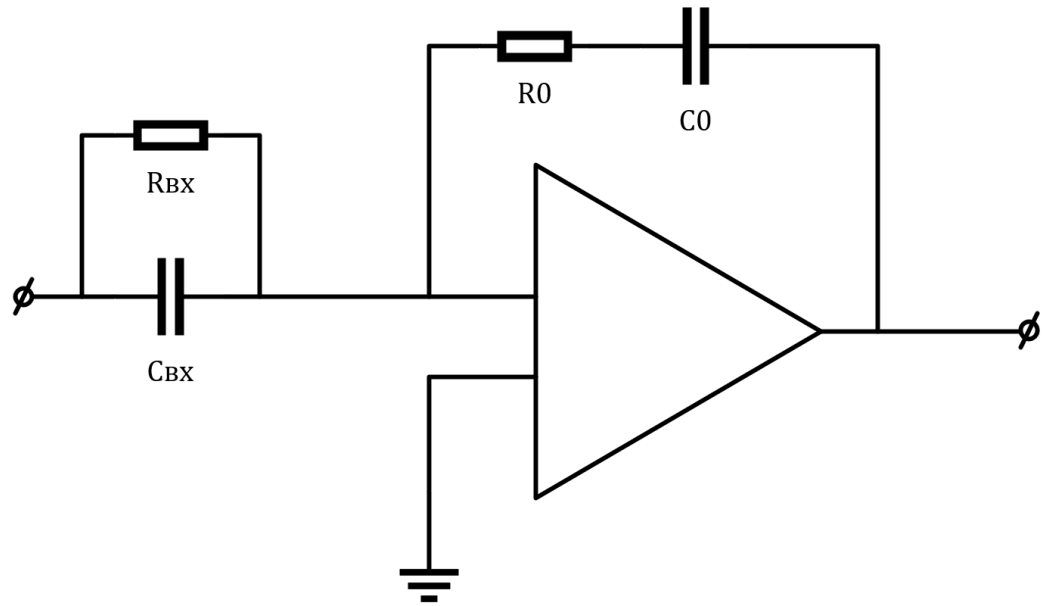


Рис.3.2 Принципова схема реалізації ПІД-регулятора

Передаточна функція має вигляд:

$$W = \frac{Z_{\text{BX}}}{Z_0} = \frac{R_0 + \frac{1}{p \cdot C_0}}{\frac{R_{\text{BX}}}{1 + p \cdot C_{\text{BX}} \cdot R_{\text{BX}}}}$$

$$= \left(\frac{R_{0c}}{R_{\text{BX}}} + \frac{C_{\text{BX}}}{C_0} \right) + \frac{1}{C_0 \cdot R_{\text{BX}} \cdot p} + C_{\text{BX}} \cdot R_0 \cdot p; \quad (3.23)$$

Значення опорів розрахуємо за наступними формулами:

Для розрахунку приймаємо $C_{0c} = C_{\text{BX}} = 1 \text{ мкФ}$.

Пропорційна частина:

$$\left(\frac{R_{0c}}{R_{\text{BX}}} + \frac{C_{\text{BX}}}{C_0} \right) = 1 \text{ Ом}; \quad (3.24)$$

Інтегральна частина:

$$\frac{1}{C_0 \cdot R_{\text{BX}} \cdot p} = \frac{0.21875}{p}; \quad R_{\text{BX}} \rightarrow 4.57142 \text{ Ом} \quad (3.25)$$

Диференціальна частина:

$$C_{\text{BX}} \cdot R_0 \cdot p = 0.000175 \cdot p; \quad R_0 \rightarrow 0.000175 \text{ Ом} \quad (3.26)$$

Матиматична модель в програмному пакеті Matlab Simulink має наступний вигляд:

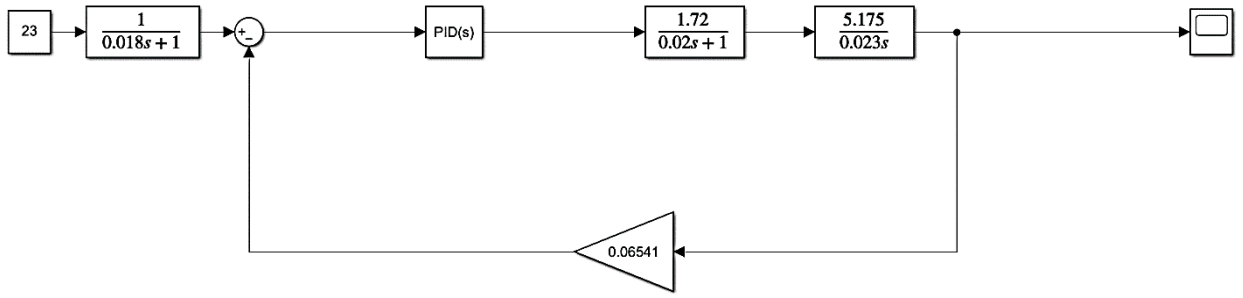


Рис. 3.3 Матиматична модель регулятора швидкості в системі

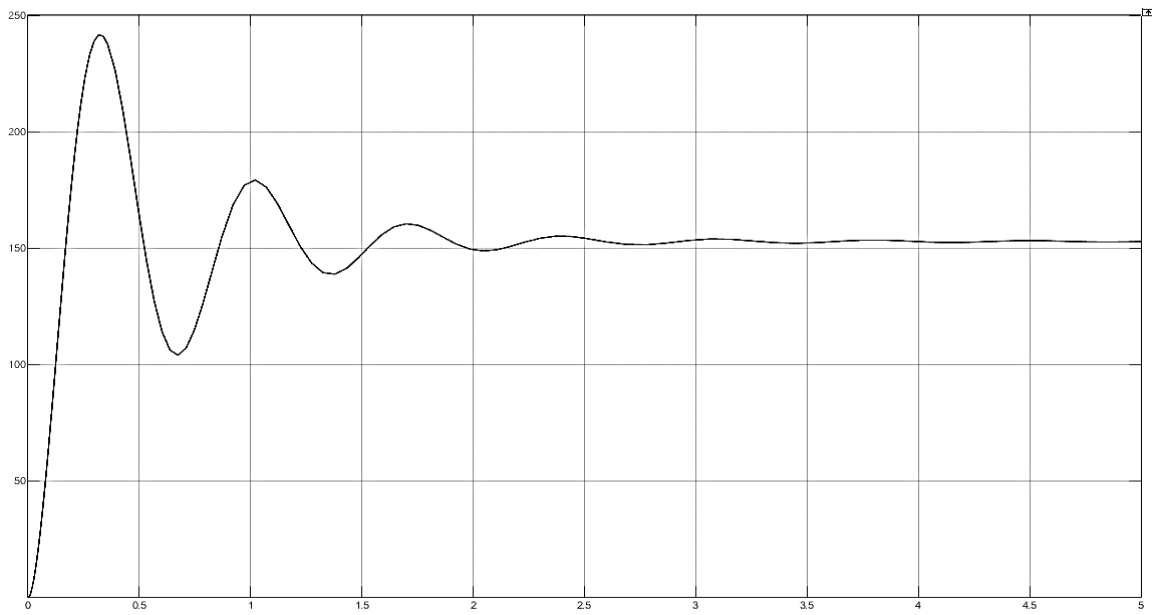


Рис. 3.4 Результат моделювання швидкості з П-регулятором (рад/с.)

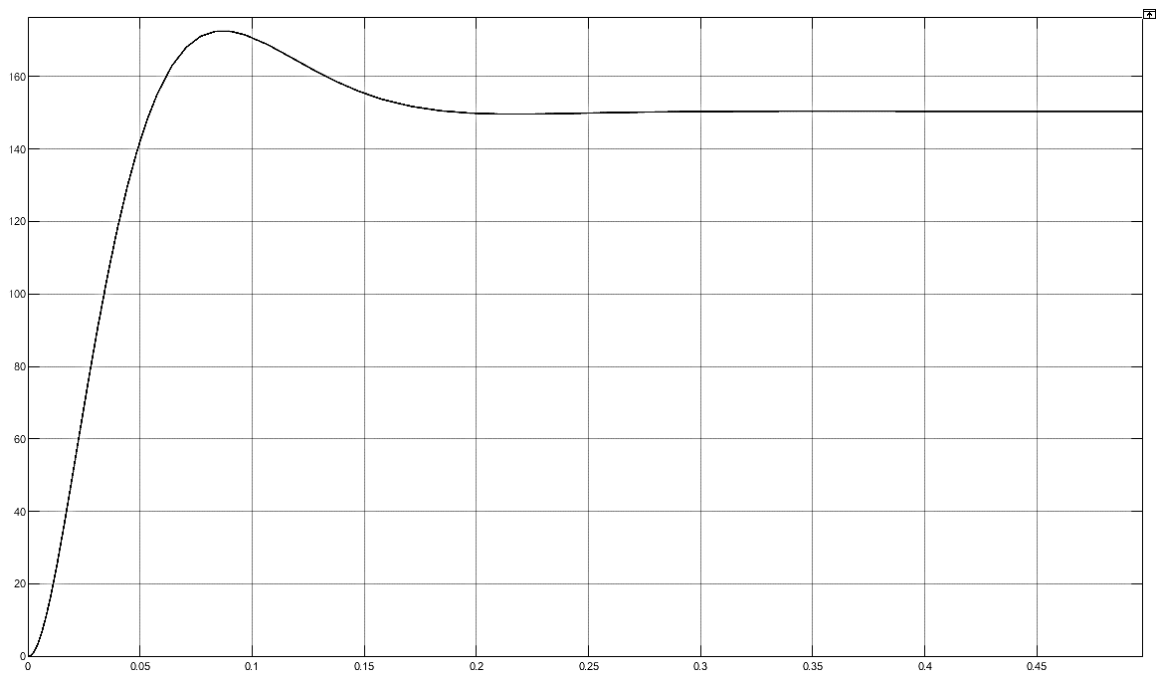


Рис. 3.5 Результат моделювання швидкості з ПІД-регулятором (рад/с.)

У порівнянні з П-регулятором, ПІД-регулятор забезпечує швидше встановлення і менше перерегулювання:

1. Час встановлення: 5 сек (ПІД) проти 10 сек (П).
2. Перерегулювання: 2% (ПІД) проти 15% (П).

Моделювання процесів, демонструє суттєву ефективність у порівнянні між П-регуляторами та ПІД-регуляторами. Результати моделювання в MATLAB Simulink підтверджують, що ПІД-регулятор значно зменшує час встановлення системи та перерегулювання в порівнянні з П-регулятором. Це свідчить про доцільність впровадження ПІД-регуляторів як економічно обґрунтованого рішення для підвищення стабільності процесів.

Для реалізації цього рішення найкраще адаптувати існуючу систему управління під вимоги ПІД-регулятора, використовуючи такі кроки:

Оптимізація моделі регулятора: Використання симетричного оптимуму для налаштування параметрів пропорційної, інтегральної та диференційної складових.

Технічна інтеграція:

Замінити або доповнити програмне забезпечення управління для підтримки алгоритму ПІД.

Підключити додаткові сенсори, якщо це необхідно для забезпечення зворотного зв'язку (наприклад, температурні або тензометричні датчики).

Тестування в реальних умовах: Перед впровадженням у виробничу експлуатацію провести тестові випробування моделі в умовах, близьких до реальних.

Етапне впровадження:

Розпочати з найбільш критичних вузлів системи, де стабільність та швидкість управління є ключовими.

Поступово інтегрувати регулятори у всі етапи процесу.

3.3 Економічний аналіз модернізації П-регулятора до ПД-регулятора

Формули для розрахунків

1. Економія енергії:

$$\Delta E = (P_{\square} - P_{\square\square d}) \times T \times N \quad (3.25)$$

де:

- P_{\square} — середнє споживання енергії при використанні П-регулятора, кВт;
- $P_{\square\square d}$ — середнє споживання енергії при використанні ПД-регулятора, кВт;
- T — кількість годин роботи за місяць;
- N — кількість місяців у розрахунковому періоді.

2. Втрати через дефекти:

$$\Delta D = (D_{\square} - D_{\square\square d}) \times C_{\square\square\square} \quad (3.26)$$

де:

- D_{\square} — кількість дефектів за місяць при П-регуляторі;
- $D_{\square\square d}$ — кількість дефектів за місяць при ПД-регуляторі;
- $C_{\square\square\square}$ — вартість матеріалу на 1 дефект, грн.

3. Економічний ефект:

$$E = \Delta E \times C_{\square\square} + \Delta D \quad (3.27)$$

де:

- $C_{\square\square}$ — вартість 1 кВт·год, грн.

4. Період окупності:

$$T_{\square\square} = C_{\square\square\square} / E \quad (3.28)$$

де:

- C_{mod} — загальні витрати на модернізацію, грн.

Вхідні дані для розрахунків

- $P_{\text{max}} = 5.0$ кВт, $P_{\text{mod}} = 4.5$ кВт;
- $T = 720$ год (30 днів по 24 год);
- $N = 12$ міс;
- $D_{\text{max}} = 10$ шт/міс, $D_{\text{mod}} = 3$ шт/міс;
- $C_{\text{def}} = 5000$ грн/шт;
- $C_{\text{en}} = 2.5$ грн/кВт·год;
- $C_{\text{mod}} = 100,000$ грн.

Розрахунки

1. Економія енергії:

$$\Delta E = (5.0 - 4.5) \times 720 \times 12 = 4320 \text{ кВт}\cdot\text{год.} \quad (3.29)$$

$$\Delta E_{\text{grn}} = 4320 \times 2.5 = 10,800 \text{ грн.} \quad (3.30)$$

2. Зниження втрат через дефекти:

$$\Delta D = (10 - 3) \times 5000 = 35,000 \text{ грн/міс.} \quad (3.31)$$

$$\text{За рік: } \Delta D_{\text{grn}} = 35,000 \times 12 = 420,000 \text{ грн.} \quad (3.32)$$

3. Загальний економічний ефект:

$$E = 10,800 + 420,000 = 430,800 \text{ грн/рік.} \quad (3.33)$$

4. Період окупності:

$$T_{\text{pay}} = C_{\text{mod}} / E = 100,000 / 430,800 \approx 0.23 \text{ року } (\sim 3 \text{ місяці}). \quad (3.34)$$

Висновки:

- Впровадження ПД-регулятора забезпечує економію 430,800 грн на рік.

- Період окупності проекту — приблизно 3 місяці.
- Модернізація доцільна з економічної точки зору та має значний ефект у зменшенні дефектів і покращенні енергоспоживання.

Економічний аналіз підтверджує, що впровадження ПІД-регуляторів є ефективним та економічно вигідним рішенням для модернізації системи управління машиною безперервного розливання сталі (МБРЗ). Розрахунки показують, що покращення процесу забезпечує значні економічні вигоди завдяки зниженню енергоспоживання, зменшенню кількості дефектів і покращенню загальної стабільності виробничого процесу.

Одним із ключових результатів є скорочення періоду окупності інвестицій до менш ніж трьох місяців, що свідчить про високу рентабельність проекту. Це досягається за рахунок економії енергії на 4320 кВт·год на рік і зниження витрат на матеріали через зменшення кількості дефектних заготовок. Загальний економічний ефект у розмірі 430,800 грн на рік забезпечує суттєве покращення фінансових показників підприємства.

З технічної точки зору, впровадження ПІД-регуляторів дозволяє стабілізувати рівень рідкої сталі у кристалізаторі, зменшити перерегулювання та забезпечити швидку реакцію на зміни в умовах виробництва. Це, у свою чергу, підвищує якість продукції, зменшує кількість браку та підвищує конкурентоспроможність підприємства.

Попри очевидні переваги, модернізація з використанням ПІД-регуляторів є лише першим етапом на шляху до повної автоматизації та оптимізації процесів. Згодом інтеграція технологій машинного навчання може забезпечити ще більшу ефективність, зокрема:

1. Автоматичне прогнозування можливих відхилень у процесі на основі великих обсягів історичних даних.
2. Динамічне налаштування параметрів у реальному часі для зниження ризику утворення дефектів.

3. Оптимізація витрат ресурсів та часу через використання інтелектуальних алгоритмів.

У перспективі інтеграція машинного навчання стане логічним кроком після впровадження ПІД-регуляторів. Це дозволить підприємству досягти ще вищого рівня автоматизації, стабільності та економічної ефективності. Проте вже на поточному етапі впровадження ПІД-регуляторів є раціональним вибором, який швидко окупиться та забезпечить необхідну базу для подальшої модернізації.

3.4 Ефективність впровадження ПІД-регулятора

Ефективність виробничих процесів у металургії, зокрема у машині безперервного розливання сталі (МБРЗ), значною мірою залежить від правильного налаштування параметрів управління. Одним із ключових аспектів є швидкість витягування металу, яка безпосередньо впливає на кількість дефектів у продукції та загальні обсяги виробництва. Надмірна швидкість може призводити до порушень технологічного процесу, збільшення дефектів і втрат матеріалів, тоді як занадто низька швидкість обмежує продуктивність.

У цьому дослідженні особлива увага приділяється аналізу впливу швидкості витягування металу на кількість дефектів та обсяг виробництва. На основі моделювання процесів розглядаються дві ключові ситуації: робота системи без використання ПІД-регулятора та з його впровадженням. Представлені графіки наочно демонструють динаміку змін у системі за цих умов.

1. Кількість дефектів залежно від швидкості витягування:

$$D = a * e^{(b * v)}$$

де:

D — кількість дефектів;

v — швидкість витягування (м/хв);

a і b — емпіричні коефіцієнти.

2. Кількість металу за добу залежно від швидкості витягування:

$$M = c * v - d * v^2$$

де:

M — загальна кількість металу за добу (тон);

v — швидкість витягування (м/хв);

c і d — емпіричні коефіцієнти.

3. Вплив ПІД-регулятора на кількість дефектів і продуктивність:

$$D_{PID} = D * (1 - k_D),$$

$$M_{PID} = M + k_M * v,$$

де:

D_{PID} і M_{PID} — кількість дефектів та продуктивність з ПІД-регулятором;

k_D і k_M — коефіцієнти впливу ПІД-регулятора.

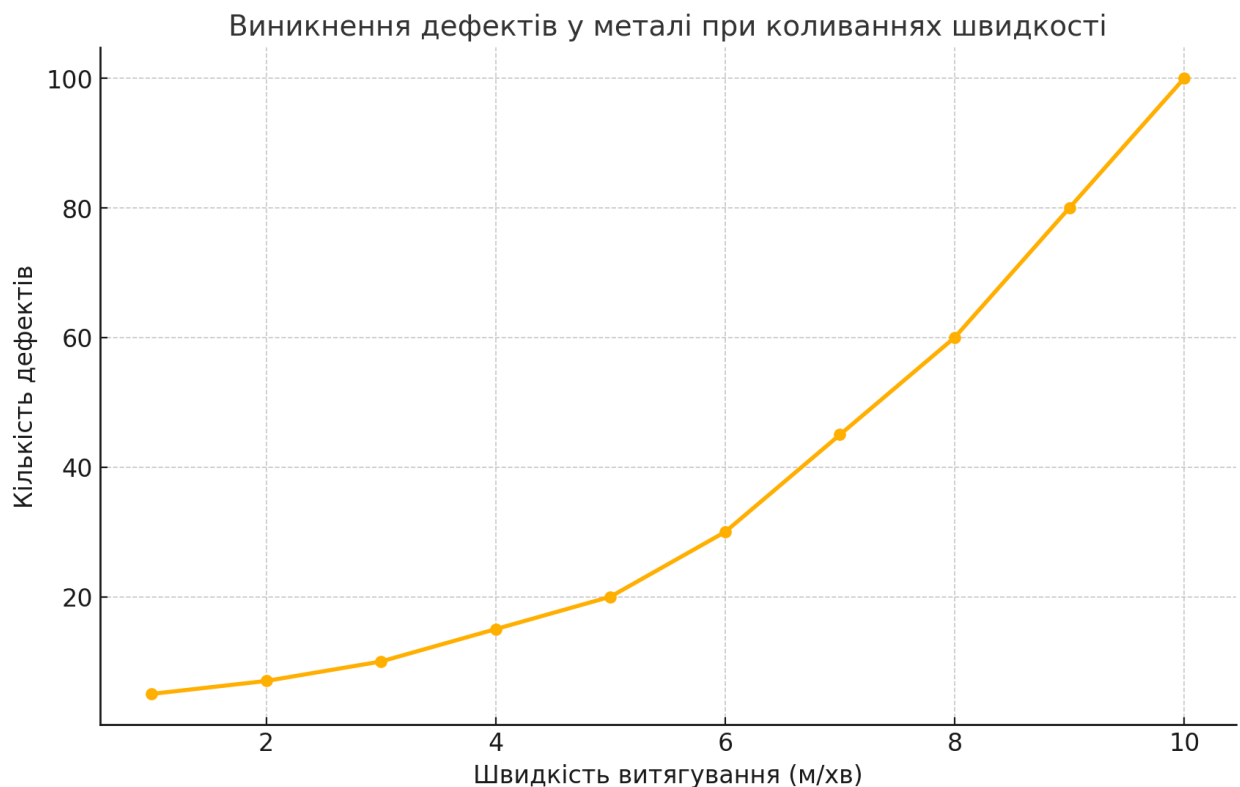


Рисунок.3.6 Вплив швидкості витягування на кількість дефектів

Графік демонструє, як зміна швидкості витягування металу впливає на кількість дефектів у заготовках. Із зростанням швидкості спостерігається експоненційне зростання кількості дефектів. Це пояснюється тим, що на високих швидкостях виникають нерівномірності у кристалізації, порушення теплового балансу та механічні напруження, що призводять до тріщин і пористості у заготовках.

Кількість дефектів залежно від швидкості

Таблиця 3.1

Швидкість (м/хв)	Дефекти (без ПД)	Дефекти (з ПД)
1	5	5
2	7	6
3	10	8
4	15	10
5	20	12
6	30	15
7	45	20
8	60	25
9	80	30
10	100	40

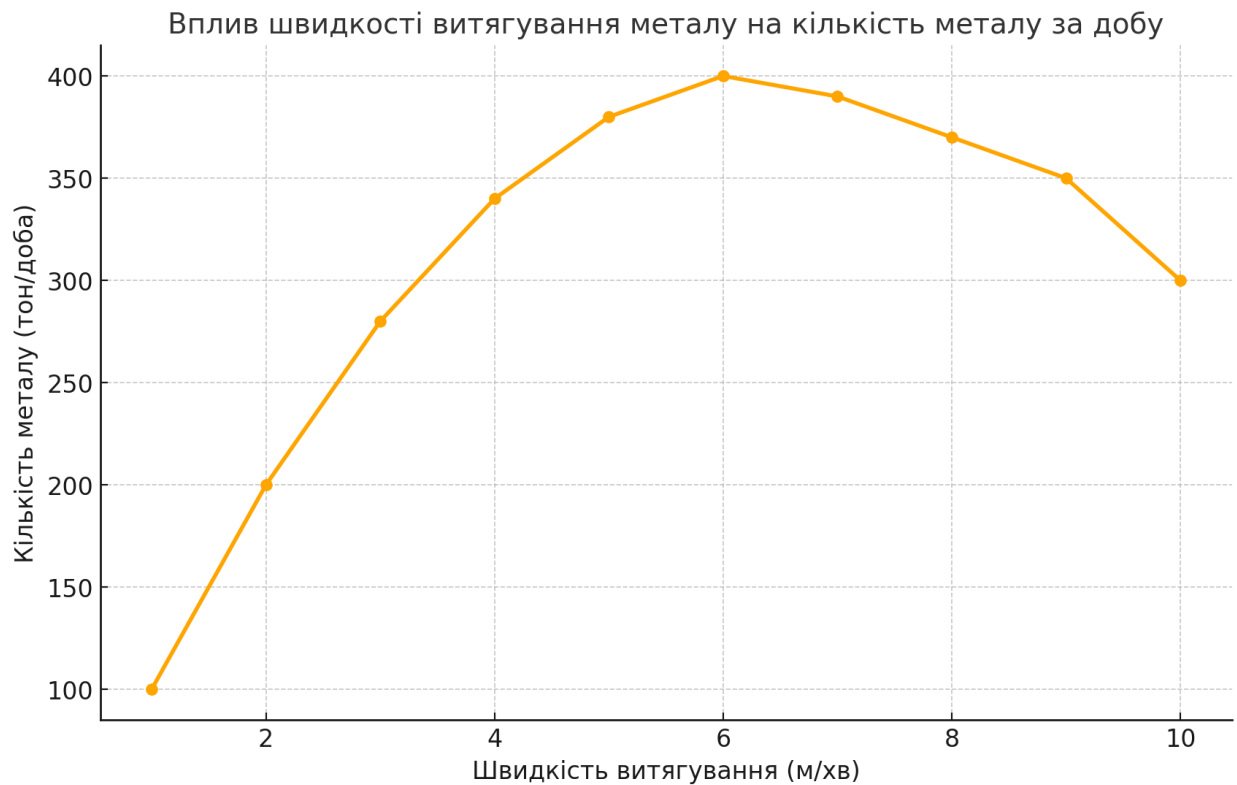


Рисунок.3.7 Вплив швидкості витягування на обсяг металу за добу

Графік відображає залежність між швидкістю витягування і загальною кількістю металу, виробленого за одну добу. Початково зі збільшенням швидкості спостерігається зростання обсягів виробництва, однак при досягненні критичної швидкості продуктивність починає знижуватися. Це відбувається через зростання кількості дефектів і втрат матеріалу, що компенсує початковий позитивний ефект від підвищеної швидкості.

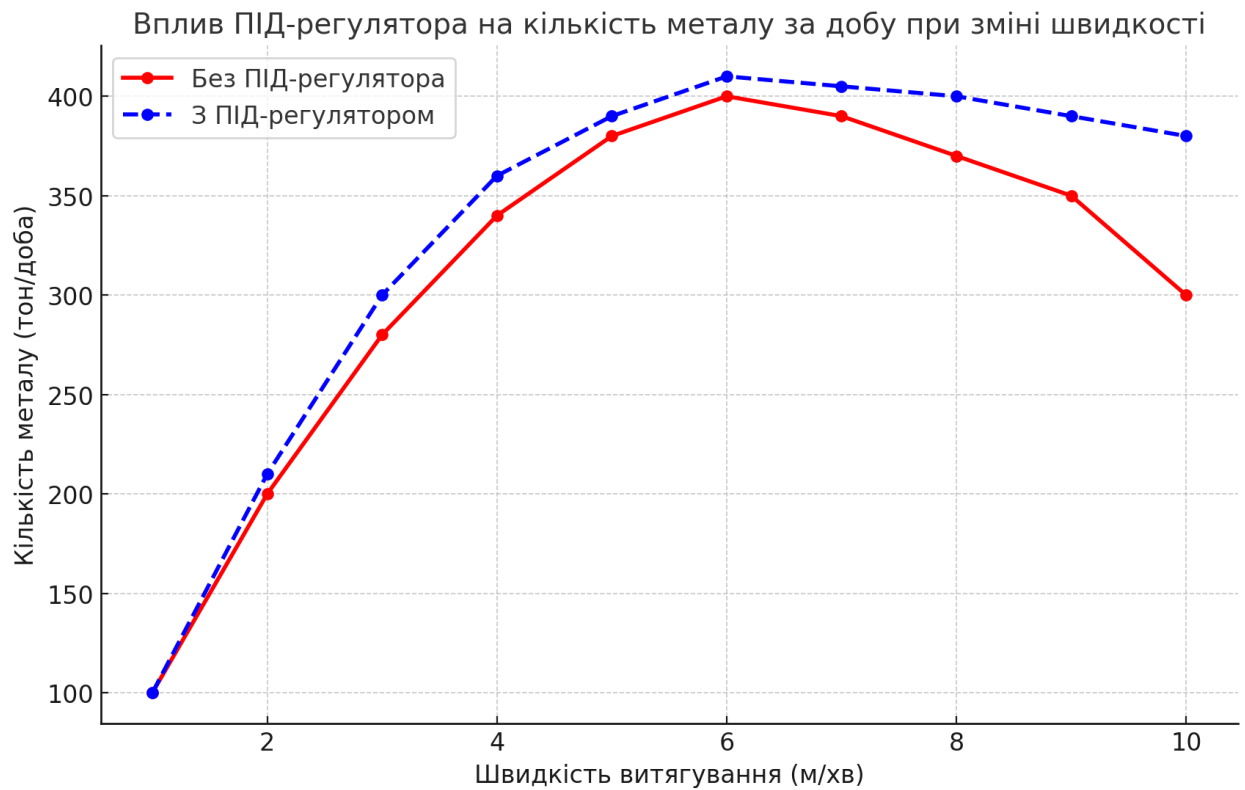


Рисунок.3.8 Вплив ПІД-регулятора на обсяги виробництва

Графік порівнює обсяги металу за добу при використанні та без використання ПІД-регулятора. Впровадження ПІД-регулятора дозволяє стабілізувати процес навіть на високих швидкостях, що дає змогу збільшити обсяги продукції. Це досягається за рахунок точного регулювання теплових і механічних параметрів системи.

Кількість металу залежно від швидкості

Таблиця 3.2

Швидкість (м/хв)	Метал (без ПІД, тон/доба)	Метал (з ПІД, тон/доба)
1	100	100
2	200	210
3	280	300
4	340	360
5	380	390
6	400	410

7	390	405
8	370	400
9	350	390
10	300	380

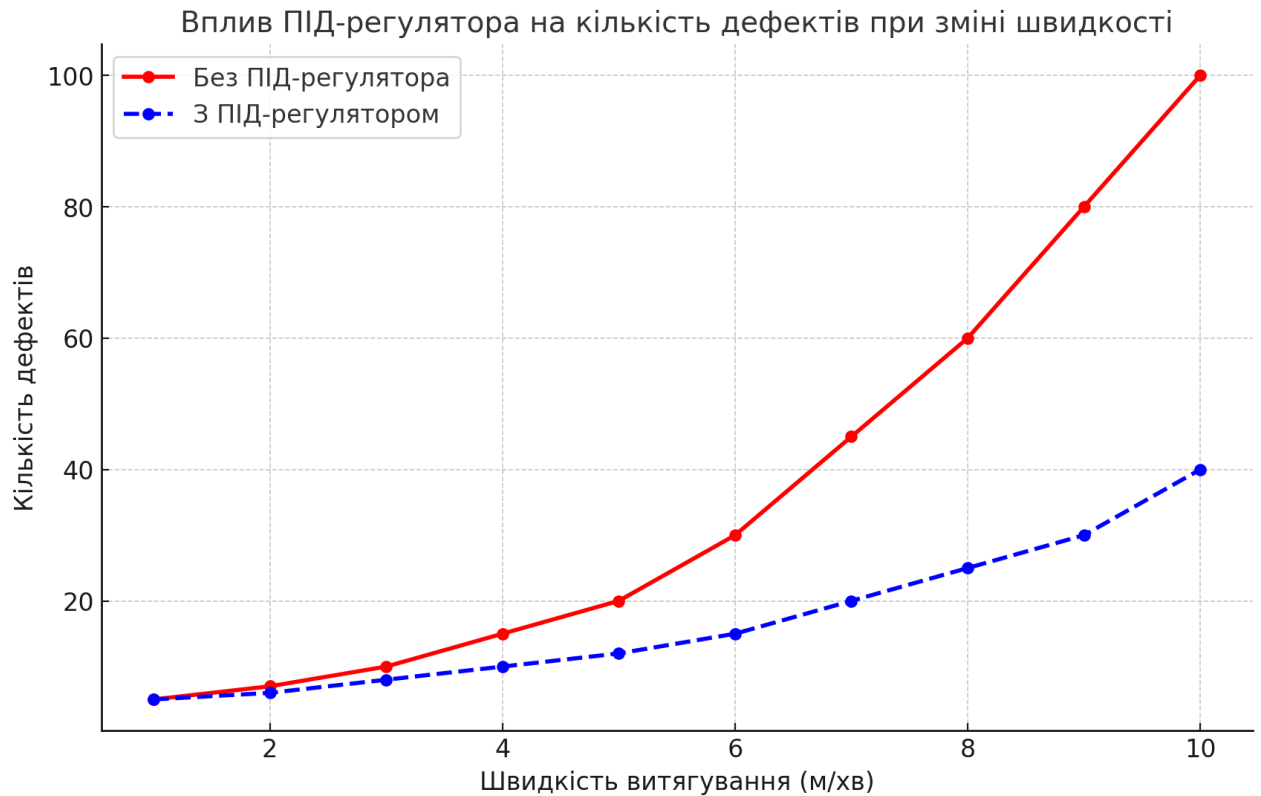


Рисунок.3.9 Вплив ПІД-регулятора на кількість дефектів

Графік демонструє суттєве зменшення кількості дефектів за умови використання ПІД-регулятора. На всіх етапах швидкості ПІД-регулятор забезпечує менший рівень дефектності у порівнянні зі стандартним управлінням. Найбільший ефект спостерігається на високих швидкостях, де без регулятора кількість дефектів значно зростає, а з регулятором залишається на прийнятному рівні.

ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК

Робота присвячена аналізу, моделюванню та оптимізації технологічних процесів управління машиною безперервного розливу сталі (МБРЗ) із застосуванням класичних методів автоматичного керування (П-регуляторів і ПІД-регуляторів) та сучасних технологій, таких як машинне навчання.

Використання ПІД-регуляторів у системах управління продемонструвало їхню здатність значно покращувати стабільність системи, знижувати час встановлення та зменшувати перерегулювання у порівнянні з П-регуляторами. Результати моделювання в MATLAB Simulink підтверджують ефективність цього підходу. ПІД-регулятор доцільно впроваджувати як перший етап модернізації завдяки низьким витратам і швидкій окупності, що складає лише три місяці.

З іншого боку, машинне навчання відкриває нові можливості для подальшого розвитку системи управління. Його інтеграція дозволяє прогнозувати відхилення, оптимізувати процеси в реальному часі та забезпечувати адаптацію до змінних умов, таких як різні марки сталі. Це особливо важливо для мінімізації дефектів у продукції та підвищення її якості.

Економічний аналіз показує, що впровадження ПІД-регуляторів забезпечує річний економічний ефект у розмірі 430,800 грн за рахунок зменшення енергоспоживання та витрат на дефектну продукцію. Подальша інтеграція технологій машинного навчання може забезпечити ще більшу рентабельність і стабільність процесів.

Висновки в розділах роботи вказують на те, що комбінований підхід, який включає початкове впровадження ПІД-регуляторів із поступовим переходом до інтеграції машинного навчання, є найбільш доцільним для забезпечення економічної та технологічної ефективності. Це дозволяє підприємству не лише вирішувати поточні завдання стабільності та якості, але й бути готовим до впровадження інновацій у майбутньому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Халізов В.П. Розрахунок пускових та гальмувальних резисторів
2. Башарін О.В. Приклади розрахунку автоматизованого електроприводу
3. SMS Group Посібник по металургії
4. Теоретичні та практичні основи проектування машин безперервного лиття. Монографія/А. Г. Журило, Д. Ю. Журило, Ю. В. Мойсеев. Х.: НТУ «ХП», 2013. - 174 с.
5. Нісковських В. М. Післямова до книги "Так це було". - Єкатеринбург: Уральське літературне агентство, 2014. - 50 с.
6. Так це було. - Єкатеринбург: Уральське літературне агентство, 2011. - 348 с.
7. Кудрін В. А. Металургія сталі: Підручник для вузів - 2-ге вид., Перероб. та дод. - М.: Металургія, 1989. - 560 с.
8. Бойченко М. С. Безперервне розливання сталі. — Державне науково-технічне видавництво літератури з чорної та кольорової металургії. - Москва: Металургія, 1957. - 560 с.
9. Целіков А. І., Полухін А. І., Гребеник В. М. та ін. Машина та агрегати металургійних заводів: Підручник для вузів: у 3 т. - 2-ге вид., Перераб. та дод. - М.: Металургія, 1988. - Т. 2. Машина та агрегати сталеплавильних цехів. - 432 с.
10. Дюдкін Д. А., Кисиленко В. В. Сучасна технологія виробництва сталі. - Москва: Теплотехнік, 2007. - 528 с.

Література на 2 розділ

1. Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME, 64(11), 759-768.
2. Åström, K. J., & Hägglund, T. (1984). Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. Automatica, 20(5), 645-651.

3. Åström, K. J., & Murray, R. M. (2008). *Feedback systems: An introduction for scientists and engineers*. Princeton University Press.
4. Bequette, B. W. (2003). *Process control: Modeling, design, and simulation*. Prentice Hall.
5. Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2004). *Process dynamics and control* (2nd ed.). Wiley.
6. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
7. Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction* (2nd ed.). MIT Press.
8. Bishop, C. M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Springer.
- Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733-764.
9. Camacho, E. F., & Bordons, C. (2004). *Model predictive control* (2nd ed.). Springer.
10. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction* (2nd ed.). Springer.
11. Kumar, P. R., & Varaiya, P. P. (1986). *Stochastic systems: Estimation, identification, and adaptive control*. Prentice Hall.
12. Ljung, L. (1999). *System identification: Theory for the user* (2nd ed.). Prentice Hall.
13. Boyd, S., & Vandenberghe, L. (2004). *Convex optimization*. Cambridge University Press.
14. Skogestad, S., & Postlethwaite, I. (2005). *Multivariable feedback control: Analysis and design* (2nd ed.). Wiley.