

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття ступеню вищої освіти – магістр  
за освітньо-професійною програмою  
*«Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті»*

зі спеціальності

*174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка*

тема роботи:

*«Автоматизація процесу керування рівнем металу у  
проміжному ковшій машини безперервного розливання  
заготовок»*

Виконав ст. гр. АКІТР-23-2м \_\_\_\_\_ Штилик Б. О.

Керівник \_\_\_\_\_ Курганов І. Д.

Нормоконтроль \_\_\_\_\_ Маринич І. А.

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_ Рубан С. А.

# КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації, комп'ютерних наук і технологій

Ступінь вищої освіти: Магістр

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та  
робототехніка

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Зав. кафедри: к.т.н. Рубан С.А.

« 5 » липня 2024 р.

## ЗАВДАННЯ

### на кваліфікаційну роботу магістра

студентові групи АКІТР-23-2м Штилику Богдану Олександровичу

**1. Тема кваліфікаційної роботи:** «Автоматизація процесу керування  
рівнем металу у проміжному ковшій машини безперервного розливання  
заготовок»

затверджено наказом по університету № 595с від 04.07.2024 р.

**2. Термін здачі кваліфікаційної роботи:** 01.12.2024 р.

**3. Склад кваліфікаційної роботи:** Пояснювальна записка обсягом 95с.,  
додатки, презентація у Microsoft PowerPoint (18 слайдів) в електронному та  
друкованому вигляді

**4. Консультанти кваліфікаційної роботи:**

Розділ 1-3

ст.викл. Курганов І. Д.

Нормоконтроль

доц. Маринич І. А.

## 5. Календарний план:

№	Етапи роботи	Термін виконання
1	<i>Вступ</i>	<i>10.07.24</i>
2	<i>Розділ 1</i>	<i>15.07.24</i>
3	<i>Розділ 2</i>	<i>18.08.24</i>
4	<i>Розділ 3</i>	<i>19.09.24</i>
5	<i>Висновки</i>	<i>15.10.24</i>
6	<i>Оформлення кваліфікаційної роботи</i>	<i>20.11.24</i>
7	<i>Підготовка презентації та графічного матеріалу</i>	<i>28.11.24</i>
8	<i>Підготовка доповіді до захисту</i>	<i>01.12.23</i>

6. Дата видачі завдання: 28.06.2024р.

Керівник \_\_\_\_\_ /Курганов І. Д./

7. Запевнення: Я, Штилик Богдан Олександрович, запевняю, що ця кваліфікаційна робота виконана самостійно, не містить академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про академічну доброчесність Криворізького національного університету ознайомлений.

Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі умисних порушень робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Здобувач \_\_\_\_\_ /Штилик Б. О./

## АНОТАЦІЯ

Штилик Б. О. «Автоматизація процесу керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного розливання заготовок».

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеню вищої освіти магістр за освітньо-професійною програмою «Кіберфізичні системи в промисловості, бізнесі та транспорті» зі спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно – інтегровані технології та робототехніка. – Криворізький національний університет, Кривий Ріг, 2024.

Метою роботи є розробка та впровадження автоматизованої системи керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного розливання заготовок, що забезпечить підвищення точності регулювання, стабільності технологічного процесу та якості кінцевого продукту.

У першому розділі проаналізовано технологічний процес безперервного розливання заготовок, розглянуто особливості функціонування проміжного ковша та збурення, які впливають на стабільність рівня металу. Проведено огляд сучасних рішень автоматизації цього процесу, їх переваг і недоліків, а також проаналізовано засоби вимірювання та регулювання рівня металу.

У другому розділі виконано математичний опис процесу керування рівнем металу у проміжному ковші. Розроблено структурну схему автоматизованої системи керування, враховуючи ключові фактори та збурення, що впливають на ефективність її роботи.

У третьому розділі виконано програмно-технічну реалізацію розробленої системи автоматизації. Створено візуалізацію технологічного процесу для моніторингу та керування рівнем металу у проміжному ковші, а також проведено тестування запропонованого рішення.

*Ключові слова:*

АВТОМАТИЗАЦІЯ, ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ, ІНДУСТРІЯ 4.0, МАШИНА БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ, ПРОМІЖНИЙ КІВШ, РІВЕНЬ МЕТАЛУ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС

## ANNOTATION

Shtylyk B. O. "Automation of the process of controlling the metal level in the tundish of a continuous casting machine."

Graduation master`s work for obtaining an educational degree «Master» for the educational and professional program «Cyber-physical systems in industry, business and transport» in specialty 174 – «Automation, computer-integrated technologies, and robotics». – Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, 2024

The aim of the work is to develop and implement an automated control system for the metal level in the tundish of a continuous casting machine, ensuring improved regulation accuracy, stability of the technological process, and the quality of the final product.

In the first chapter, the technological process of continuous casting of billets is analyzed, including the features of the tundish operation and disturbances affecting the stability of the metal level. A review of modern automation solutions for this process, their advantages and disadvantages, as well as an analysis of measurement and regulation tools for metal level control, is conducted.

In the second chapter, a mathematical description of the process for controlling the metal level in the tundish is performed. A structural diagram of the automated control system is developed, considering key factors and disturbances affecting its efficiency.

In the third chapter, the software and hardware implementation of the developed automation system is carried out. Visualization of the technological process is created for monitoring and controlling the metal level in the tundish, and the proposed solution is tested.

*Keywords:*

AUTOMATION, PROCESS VISUALIZATION, INDUSTRY 4.0, CONTINUOUS CASTING MACHINE, TUNDISH, METAL LEVEL, TECHNOLOGICAL PROCESS

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ.....	10
1.1 Технологічний процес безперервної розливки сталі.....	10
1.2 Призначення та види проміжних ковшів.....	18
1.3 Проміжний ковш, як об'єкт автоматизації .....	24
1.4 Склад АСУ ТП неперервної розливки сталі.....	30
1.5 Способи дозування сталі при її перетіканні з проміжного ківша у кристалізатор.....	32
Висновки за розділом: .....	34
РОЗДІЛ 2 МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОЗЛИВКИ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ.....	35
2.1 Математичний опис теплообміну процесу розливання сталі при сталій швидкості МБЛЗ .....	35
2.2 Проміжний ківш, як об'єкт автоматизації.....	40
2.3 Динамічні процеси у проміжному ківші.....	46
2.4 Спостерігач стану для підвищення точності оцінки рівня металу у проміжному ківші.....	51
2.5 Розробка модельно-прогнозуючого регулятора рівня сталі у проміжному ківші.....	60
2.5.1 Розрахунок регулятора GPC.....	62
2.5.2 Повторюваний предиктивний регулятор R-GPC.....	63
2.5.3 Генетичний алгоритм GA.....	67
2.5.4 Отримання лінійної моделі CARIMA.....	68
2.5.5 Результати моделювання.....	70
Висновки за розділом: .....	79
РОЗДІЛ 3. ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ МЕТАЛУ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ ЗАГОТОВОК ...	81

3.1 Обґрунтування вибору апаратно-програмної платформи для реалізації системи керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ	81
3.2 Програмна реалізація системи візуалізації процесу керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ.....	85
Висновки за розділом.....	95
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	98

## ВСТУП

Металургійна галузь традиційно є одним із ключових секторів економіки України, яка має значний вплив на її розвиток, зайнятість населення та валютні надходження. Завдяки багатим природним ресурсам, зокрема запасам залізної руди, а також розвинутій промисловій інфраструктурі, Україна займає провідні позиції у виробництві сталі, чавуну та прокату на світовому ринку. Металургійна продукція становить значну частку експорту країни, забезпечуючи стабільний приплив валюти та сприяючи розвитку інших галузей економіки, таких як будівництво, машинобудування та енергетика.

Окрім економічної складової, металургія відіграє важливу роль у соціальній сфері, забезпечуючи робочі місця для сотень тисяч працівників та сприяючи розвитку регіонів, у яких розташовані металургійні підприємства. Зважаючи на глобальні виклики, такі як зміна кон'юнктури на світовому ринку металів, підвищення екологічних стандартів і потреба в енергоефективності, металургійна галузь України вимагає модернізації та впровадження інноваційних технологій.

Стабільний розвиток металургії є запорукою економічної безпеки країни, оскільки він сприяє збалансованості зовнішньоекономічних відносин, розвитку внутрішнього ринку та підвищенню конкурентоспроможності національної економіки. Інвестиції в автоматизацію технологічних процесів, вдосконалення виробничих потужностей та підвищення екологічності виробництва здатні забезпечити сталий розвиток галузі та її інтеграцію в глобальні виробничі ланцюги.

У сучасній металургійній промисловості значну увагу приділяють вдосконаленню технологічних процесів, спрямованих на підвищення якості продукції, зменшення витрат ресурсів і забезпечення стабільності виробничих операцій. Одним із ключових етапів у технології безперервного розливання заготовок є керування рівнем металу у проміжному ковші, що безпосередньо впливає на якість кінцевої продукції, рівномірність розливання та запобігання



виникненню дефектів, а також визначає стабільність подачі металу в кристалізатор та запобігає виникненню дефектів у заготовках.

Процес підтримання рівня металу в проміжному ковші є багатофакторним і характеризується наявністю збурень, нелінійністю та складністю технологічного середовища. Ефективне автоматизоване керування цим процесом дозволяє не лише забезпечити точність технологічних параметрів, але й підвищити продуктивність виробництва, знизити втрати металу та поліпшити екологічні показники виробництва.

Незважаючи на значний прогрес у впровадженні автоматизованих систем у металургії, багато підприємств все ще використовують застарілі методи керування, які не враховують сучасних досягнень у сфері автоматизації та математичного моделювання. Це призводить до втрат металу, нестабільності процесів та зниження конкурентоспроможності продукції.

*Актуальність теми.* Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до якості металопродукції та необхідністю впровадження сучасних засобів автоматизації в умовах індустрії 4.0. Розробка та впровадження автоматизованих систем керування рівнем металу є важливим кроком у напрямку цифровізації металургійного виробництва, що сприяє підвищенню його конкурентоспроможності.

У роботі розглядаються питання розробки математичної моделі процесу керування, вибору засобів автоматизації, створення алгоритмів керування та їхньої експериментальної перевірки. Реалізація запропонованих рішень дозволить забезпечити стабільність і точність регулювання рівня металу у проміжному ковші, що є важливим для досягнення стабільної якості заготовок.

*Метою роботи є* розробка та впровадження автоматизованої системи керування рівнем металу у проміжному ковші машини безперервного розливання заготовок, що забезпечить підвищення точності регулювання, стабільності технологічного процесу та якості кінцевого продукту.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

- дослідити особливості роботи проміжного ковша та визначити ключові фактори, що впливають на стабільність рівня металу.
- створити модель, яка описує динаміку процесу регулювання рівня металу у проміжному ковші.
- обґрунтувати вибір датчиків, виконавчих механізмів та контролерів для реалізації системи автоматизації.
- створити ефективний алгоритм керування рівнем металу, який враховує технологічні вимоги та обмеження.
- провести імітаційне моделювання для перевірки роботи розробленої системи, оптимізувати її параметри.
- провести аналіз результатів роботи системи та визначити її вплив на продуктивність і якість виробництва.

*Методи дослідження.* У роботі використані методи сучасної теорії автоматичного керування та автоматизації технологічних процесів, зокрема:

- *Математичне моделювання* для опису динаміки процесів керування рівнем металу у проміжному ковші.
- *Імітаційне моделювання* для перевірки ефективності запропонованих алгоритмів керування.
- *Методи аналізу і синтезу систем автоматичного керування* для розробки та оптимізації структури системи.
- *Методи оптимізації* для підбору параметрів системи з метою підвищення її точності та стабільності.
- *Аналіз даних* для оцінки продуктивності та ефективності роботи системи.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ

#### 1.1 Технологічний процес безперервної розливки сталі

У найближчі десятиліття сталь залишиться основним конструкційним матеріалом у всіх галузях національної економіки. Головною перевагою цього матеріалу є вдале поєднання невисокої ціни, хороших механічних властивостей, технологічності, екологічності і можливості практично повної утилізації.

Безперервне розливання сталі міцно увійшло в практику металургійного виробництва. Трохи більше ніж півстолітній досвід використання нового методу лиття сталі призвів до радикальної перебудови сталеплавильного виробництва і значних змін в прокатному виробництві. В даний час близько 1800 машин безперервного лиття заготовок в більш ніж 90 країнах світу заливають 85% всієї виробленої сталі. Найбільша частка безперервного лиття в загальному обсязі сталевих заготовок становить: Японія - 96%; США - 94%, країни ЄС - 96%.

Безперервне лиття сталі - це процес отримання злитків з рідкої сталі - заготовок (для прокатки, кування або пресування), що утворюються безперервно в міру надходження рідкого металу в форми з одного боку, розрізання і видалення затверділої заготовки з протилежного боку. Процес може бути реалізований як у вигляді лиття одиночних нагрівань, так і тривати безперервно серією плавок протягом декількох днів. Різновидом цього процесу є напівбезперервне лиття, яке відрізняється тим, що різання на мірні злитки проводиться в холодному стані після повного застигання і виведення заготовки з верстата.

Безперервне лиття сталі має наступні переваги перед звичайним литтям. Витрата металу на 1 т придатного до використання прокату знижується на 10-15% за рахунок зменшення обрізки головної і нижньої частин заготовки. Капітальні витрати знижуються за рахунок виключення парку чавунних форм, відділення на їх приготування і видалення злитків з форм, дорогих блюмінгів або

слябів, на яких великі злитки стискаються в заготовку для подальшої прокатки. Енергетичні витрати значно знижуються за рахунок скорочення числа технологічних циклів нагріву в технологічному ланцюжку від розливання до прокатки. За рахунок прискорення застигання підвищується ступінь однорідності металу, радикально поліпшується його якість і стабільність властивостей. При цьому створюються умови для повної механізації та автоматизації процесу розливання.

Спосіб отримання виробів безпосередньо з рідкого металу (так звана беззлиткова прокатка) був запропонований в 1855 р Г. Бессемером. Експериментальні роботи, проведені в цій області в ряді країн, не дали позитивних результатів. Більш перспективним способом виявився метод отримання не готового виробу з рідкого металу, а проміжної заготовки з розмірами, які зазвичай менше, ніж при зливанні в форму для злитків. Цей метод був розроблений у другій половині минулого століття.

Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) - це машина безперервного лиття заготовок, в якій відбувається процес кристалізації рідкого металу і формування безперервної литої заготовки (злитка) нескінченної довжини. Рідка сталь зі сталевого ківша безперервно заливається в проміжний ківш, а з проміжного ківша надходить у форму. Проміжний ківш необхідний для того, щоб не переривати процес розливання під час заміни сталевого ківша. Перед заливкою в форму вводять насіння - спеціальне пристосування з фіксуючою рукояткою, яке є дном для першої порції металу. Після застигання металу насіння витягують з форми, тягнучи за собою формує злиток. Подача рідкого металу триває, а формування злитка стає безперервним процесом. У кристалізаторі, однак, тверднуть тільки поверхневі шари металу, утворюючи тверду оболонку злитка, яка утримує рідку фазу в своїй центральній частині. Тому за виливницею розташована зона вторинного охолодження злитка. У цій зоні в результаті примусового поверхневого охолодження заготівля твердне по всьому поперечному перерізу. Довжина машини безперервного лиття заготовок повинна забезпечувати повне затвердіння злитка при максимальній робочій

швидкості в роликівих сегментах. Роликові сегменти являють собою дві з'єднані між собою рами з роликами (валками), які підтримують і транспортують безперервно відлиту заготовку. Після виходу з роликівих сегментів посівний матеріал відділяється спеціальним пристроєм для вставки і видалення насіння. Подальше формування безперервно литої заготовки здійснюється за рахунок безперервного припливу рідкої сталі в проміжний ківш і форму з подальшою кристалізацією злитка, який безперервно переміщається уздовж технологічної осі установки. Після різання на гільйотинних ножицях або, частіше, на полум'янорізальній машині, яка здійснюється безпосередньо в процесі безперервного лиття сталі, вимірювальні деталі надходять на рольганг і потім транспортуються на склад.

Основними технологічними вузлами МБЛЗ є:

- підставка для установки сталеналивного ківша з можливістю переведення його в робоче положення;
- проміжний ківш, що забезпечує безперервну подачу рідкої сталі в одну або кілька форм;
- прес-форма, в якій утворюється тверда скоринка безперервно відлитої заготовки необхідної товщини і міцності, з механізмом, що забезпечує її переміщення;
- зона вторинного охолодження безперервно литих заготовок водою або водо-повітряною сумішшю з підтримуючою і транспортуючою роликівою проводкою;
- пристрій для поділу безперервнолитої заготовки на вимірювальні частини.

Всі існуючі МБЛЗ можна розділити наступним чином.

*За кількістю потоків:* одно- і багатопотокові. Число потоків на слябових безперервних ливарних машинах досягає чотирьох, а на поздовжніх - восьми.

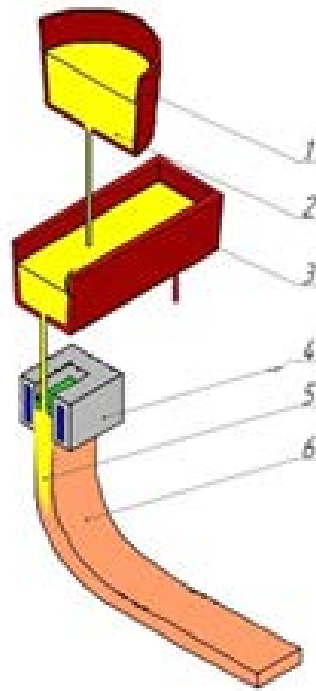
*За формою і поперечним перерізом литої заготовки:* блям, сорт, сляб, для лиття фасонних балкових заготовок, для лиття круглих заготовок і трубних заготовок, а також комбіновані МБЛЗ.

Процес безперервного розливання металу дозволяє здійснювати неперервну розливку сталі з послідовною подачею кількох ківшів зі сталеплавильних агрегатів. При цьому отримана заготовка розрізається на мірні довжини відповідно до вимог споживачів і надалі спрямовується до прокатних цехів для подальшої обробки. Ефективність процесу забезпечує вихід придатної заготовки на рівні 98,5–99,5% від маси розливої рідкої сталі. Безперервний розлив сталі здійснюється на спеціалізованих установках, які називаються машинами безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Конструкція цих машин (рисунок 1.1) включає такі елементи, як поворотний стенд для заміни ківшів, проміжний ківш, кристалізатор, зону вторинного охолодження заготовки, тягнуче-прямильний механізм тощо.

Процес безперервного розливання сталі передбачає подачу рідкої сталі зі сталерозливного ківша до проміжного ківша, а потім у наскрізну форму — кристалізатор. Кристалізатор, що має прямокутний, квадратний, круглий або спеціальний фасонний переріз, інтенсивно охолоджується. У ньому відбувається часткове затвердіння сталі, в результаті чого формується тверда оболонка, заповнена рідкою сталлю. Ця оболонка відповідає формі та перерізу майбутньої заготовки.

Частково затверділа заготовка за допомогою транспортної системи (тягнучої кліті) переміщується в зону вторинного охолодження, де відбувається її повне затвердіння. Після цього злиток розрізають на мірні довжини, охолоджують і транспортують рольгангом або іншими засобами до відповідного прокатного цеху чи на склад.

Перед початком розливання на МНЛЗ у кожному кристалізаторі за допомогою спеціального пристрою - затравки - створюється рухоме «дно».



1-сталерозливний ківш; 2-рідка сталь; 3-проміжний ківш, 4-кристалізатор; 5-заготовка;  
6-зона вторинного охолодження

Рисунок 1.1 - Загальна схема безперервного розливання сталі:

Верхній кінець затравки з пазами вводиться в кристалізатор, а протилежний кінець з'єднується з тягнучим механізмом.

Під час наповнення кристалізатора рідкий метал заповнює пази затравки, швидко твердіє та формує надійне зчеплення з нею. Після цього активується тягнучий пристрій, який витягує тверду оболонку з рідкою серцевиною до зони вторинного охолодження.

Для забезпечення формування міцної твердої оболонки (металевої скоринки) стінки кристалізатора виготовляють із матеріалів із високою теплопровідністю та активно охолоджують водою. Щоб зменшити тертя між скоринкою металу та стінками кристалізатора, а також уникнути змочування його стінок рідкою сталлю, у кристалізатор додають мастильні матеріали. Це можуть бути рідкі або тверді мастила, наприклад, різні олії, вуглеводи чи екзотермічні теплоізоляційні шлакові суміші.

Крім того, щоб запобігти розриву оболонки та її прилипання до стінок кристалізатора, останній виконує зворотно-поступальні (гойдаючі) рухи, які забезпечуються спеціальними механізмами.

З кристалізатора частково затверділий злиток потрапляє до зони вторинного охолодження, яка складається з опорних елементів (роликів) та пристроїв для охолодження. Основна функція опорних елементів — запобігти деформації оболонки злитка та спотворенню його форми під дією феростатичного тиску. Охолодження зазвичай здійснюється шляхом зрошення поверхні злитка водою, причому витрата води залежить від марки сталі, що розливається, та швидкості витягування злитка.

Коли повністю затверділий злиток разом із затравкою виходить із тягнуче-правильного пристрою, затравка від'єднується за допомогою спеціального механізму, після чого злиток спрямовується до пристрою для різання.

Після завершення розливання залишки злитка виводяться з машини, проміжний ківш прибирається, а всі механізми та система охолодження проходять контроль і налаштування. Після цього знову встановлюється затравка для наступного циклу розливання.

Переваги машин безперервного лиття сталі (МБЛЗ) порівняно з розливанням сталі у виливниці:

– *Підвищення виходу придатного металу* завдяки зменшенню обсягів головного і донного обрізу на 15–25%, вихід придатної заготовки зростає.

– *Скорочення капіталовкладень*

– Зменшення площ обладнання на 30–35%, а іноді до 50%.

– Відсутність необхідності у великій кількості виливниць, сталерозливних візків, стріперних кранів, машин для вилучення злитків, установок для охолодження та складів із виливницями.



– *Скорочення додаткових операцій.* Відпадає потреба у створенні обтискного цеху, а також виконанні ряду трудомістких процесів із підготовки та обробки металу.

– *Економія сировинних і енергетичних ресурсів*

– *Впровадження МБЛЗ знижує енергоємність виробництва:*

– 600–620 МДж/т при частці гарячого посада 90%.

– 1550–1600 МДж/т при частці холодного посада 100%.

– *Збільшення продуктивності.* Підвищення виходу придатного металу та забезпечення ритмічності виробничого процесу.

– *Оптимальна сумісність із прокатними станами.* Можливість отримання заготовок із оптимальними геометричними параметрами для прокатного виробництва.

– *Висока якість продукції*

– Поліпшення фізичної однорідності злитків.

– Зменшення рівня ліквіації та інших дефектів.

– *Скорочення чисельності персоналу.* Зменшення кількості обслуговуючого персоналу на 20–30%.

– *Автоматизація технологічного процесу.* Високий рівень автоматизації дозволяє контролювати якість заготовок безпосередньо під час лиття.

– *Поліпшення екологічної ситуації*

– Зниження запиленості у виробничих приміщеннях.

– Зменшення забруднення води через замкнуті системи оборотного водопостачання.

– *Покращення умов праці.* Усунення важких робіт, таких як:

– Прибирання скрапу та уламків вогнетривів.

– Укладання сифонних провідок.

– Установка виливниць та інші трудомісткі операції.

МБЛЗ не лише забезпечують економічну та екологічну вигоду, а й значно покращують технологічний процес, знижуючи витрати і підвищуючи якість продукції.

Основними видами безперервнолитої заготовки, які класифікуються переважно за геометричною формою, є:

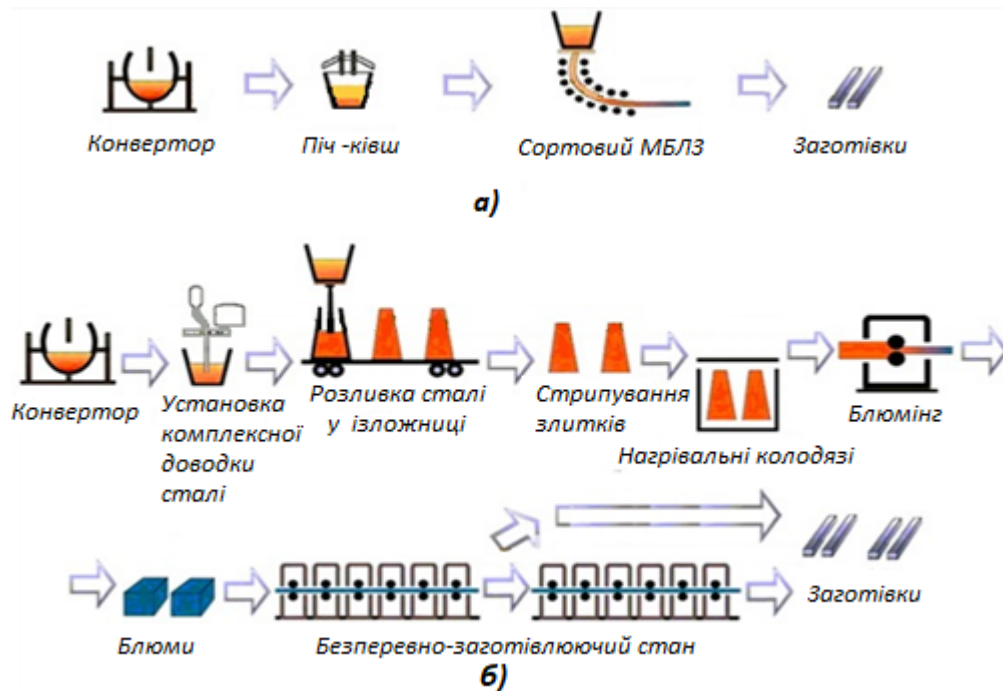
- *Сляб* - прямокутні заготовки з великим співвідношенням ширини до товщини.
- *Блюм* - квадратні або прямокутні заготовки з меншим співвідношенням ширини до товщини, товщиною понад 200 мм.
- *Сортова заготовка* - квадратний переріз із товщиною до 200 мм.
- *Кругла заготовка* - заготовки круглої форми.
- *Спеціальні фасонні профілі* - наприклад, профілі типу «собача кістка».

У світовій металургійній практиці виробляються безперервнолиті заготовки таких максимальних розмірів:

- *Блюм* - 600×670 мм.
- *Кругла заготовка* - діаметром до 600 мм.
- *Сляб* - товщиною до 400 мм і шириною до 3300 мм.

Основні напрями розвитку техніки та технології безперервного розливання сталі орієнтовані на вдосконалення процесів лиття традиційних заготовок (слябів і блюмів), а також на розробку нових МБЛЗ для виготовлення сортових заготовок квадратного та круглого перерізу, тонких слябів, листів і фасонних профілів. Такі профілі максимально наближені до готової продукції з урахуванням необхідного обтиску під час прокатки.

Переваги цього підходу можна побачити, порівнюючи сучасну технологію виробництва квадратних заготовок із використанням сортових МБЛЗ і традиційну систему, яка включає розливання сталі у виливниці та прокатку на блюмінгах і великосортних станах (рисунок 1.2).



а) сортова заготовка з безперервним розливанням, б) розливання у злитки з подальшою прокаткою

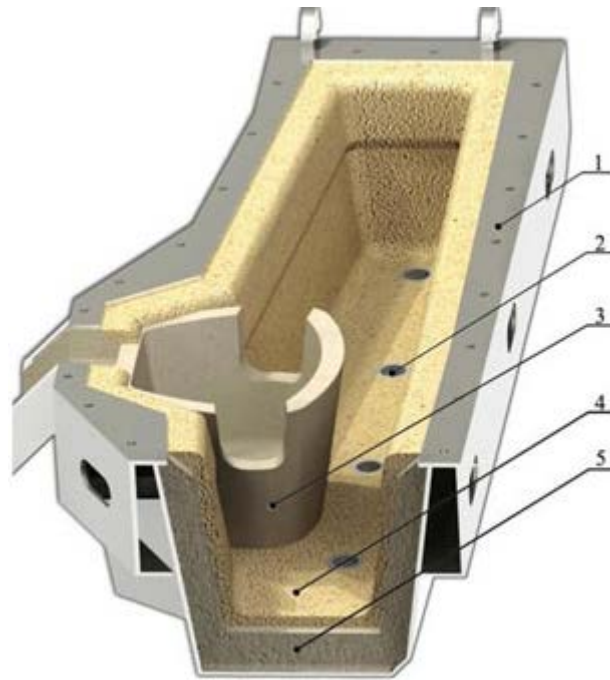
Рисунок 1.2 - Порівняння технологічних схем виробництва

## 1.2 Призначення та види проміжних ковшів

У сучасній системі технологій проміжний ківш МБЛЗ розглядається як один з найважливіших елементів, який безпосередньо впливає на якість безперервнолитої заготівлі.

Спочатку проміжний ківш виконував, головним чином, функції прийому та розподілу металу по струмках. Однак, завдяки суттєвому підвищенню вимог до якості сталі останні десятиліття його роль стала більш значущою.

Сучасний проміжний ківш (рис. 1.3) виконує різні функції. Він є буферною ємністю, так як з його допомогою узгоджується дискретне надходження металу зі сталерозливного ковша в проміжний і безперервне надходження сталі з промківша в кристалізатор. При цьому забезпечуються усереднення порції металу, що надходить, і запобігання попаданню шлаку в кристалізатор. Передбачається, що конструкція проміжного ковша має забезпечувати мінімальні втрати тепла металом протягом усього циклу лиття.



1 – кожух промківша; 2 – склянка-дозатор; 3 – металопріймач;  
4 – торкрет-шар; 5 – робочий шар

Рисунок 1.3 – Загальний вигляд 6-ти струмкового проміжного ковша МНЛЗ

Проміжний ківш забезпечує надходження металу в кристалізатор з певною витратою і, забезпечуючи добре організований струмінь. Він дозволяє розливати сталь у кілька кристалізаторів одночасно і здійснювати серійне розливання методом плавка на плавку при зміні сталерозливних ковшів без припинення та зниження швидкості розливання. Конструкція та місткість проміжного ковша значною мірою визначають стабільність процесу розливання сталі та якість заготівлі [1-3].

Виходячи з вищевикладеного конструкція промківша повинна враховувати такі основні фактори:

- кількість і розташування струмків МБЛЗ, а також переріз заготовок, що розливаються;
- спосіб регулювання процесу витікання металу з промківшу;
- спосіб початку процесу розливання, метод видалення шлаку та залишків металу після його закінчення;

- оснащеність спеціальними пристроями та пристроями (наприклад, для безперервного виміру температури або підігріву металу під час лиття);
- характер руху конвективних потоків металу, що сприяють спливу неметалевих включень у шлак або ініціюють підвищене зношування елементів футерування промківша;
- можливість додаткової рафінуючої обробки металу в промківші за допомогою його продування інертним газом;
- кількість плавок, що послідовно розливаються, в серії.

Геометрична форма промківша вибирається по можливості найпростішою і наближеною до паралелепіпеда. Це спрощує процес виготовлення футерування промківша та його обслуговування (наприклад, вилучення залишку металу після розливання). Для зручності експлуатації також виконуються технологічні ухили стінок (звуження) промківша зверху донизу. Для скачування надмірної кількості шлаку, що скупчився в промківші, його конструкція передбачає наявність шлакового носика [1].

На практиці всі проміжні ковші можна розділити на слябові, сортові і блюмові. Однак, в силу схожості геометричного малюнка та технологічного оснащення сортових та блюмових ковшів їх об'єднують в одну загальну групу. У світовій практиці найбільшого поширення набули багатострумові МБЛЗ з кількістю струмків від 4 до 6 [4,5]. Як правило, такі проміжні ковші використовуються для розливання сталей рядового сортаменту зі стратегією мінімізації витрат.

Класифікація проміжних ковшів сортових МБЛЗ ґрунтується на кількості струмків – парному чи непарному. При цьому проміжні ковші з парною кількістю струмків діляться на В-подібні та Т-образні, в той час як промківші з непарною кількістю струмків класифікують на В-, Т- і W-подібні.

Оптимальна ємність промківша визначається перетином (шириною) заготовок, що відливаються, числом струмків, відстанню між струмками, швидкістю розливання, вимогами до можливості спливання неметалевих

включень та асиміляції їх шлакоутворюючим покриттям. На величину ємності промківша впливає також і режим розливання: у разі серійного розливання ємність промківша збільшується з метою забезпечення запасу металу, необхідного для заміни сталерозливного ковша.



Рисунок 1.4 - Загальний вигляд промислової дворучної Т-подібної слябової МБЛЗ

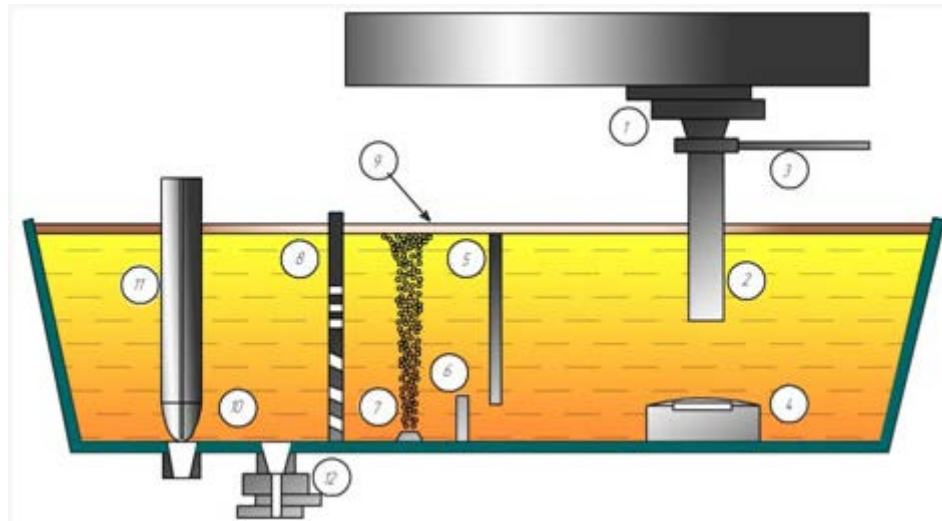
Узагальнюючи відомі технічні рішення, що стосуються розливання сталі на МБЛЗ, можна класифікувати промківші за сукупністю виконуваних технологічних операцій на дві групи:

- промківші, в яких широко використовуються операції рафінування рідкої сталі, в сукупності з функціями усереднення та дозування металу;
- промківші, в яких створюються максимально сприятливі умови для розливу наддовгими серіями (щонайменше кілька десятків плавок) з метою мінімізації витрат на розливання.

У проміжних ковшах, призначених для рафінування металу, встановлюються деякі додаткові функціональні елементи (рис. 1.5), які служать для запобігання потраплянню неметалевих включень у безперервнолиту заготовлю.

На практиці, для організації раціонального руху потоків металу в проміжному ковші встановлюють різного роду пороги та перегородки, що

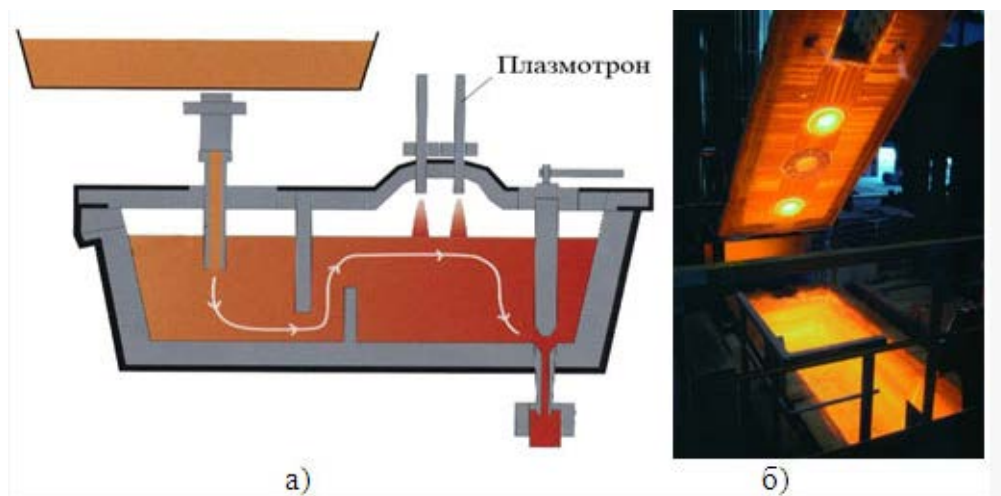
враховують особливості геометричної форми промківшу та вимоги до якості металу [1,7,9].



1 - шиберний затвор сталерозливного ковша; 2 – захисна труба; 3 – аргонний захист; 4 -металоприймач; 5 – верхня (шлакова) перегородка; 6 – поріг; 7 – продувний блок; 8 – фільтраційна перегородка; 9 – теплоізолююча суміш; 10 – склянка-дозатор; 11 – стопор-моноблок; 12 – триплитний шиберний затвор

Рисунок 1.5 – Загальна схема застосування різних рішень для управління потоками в промківші

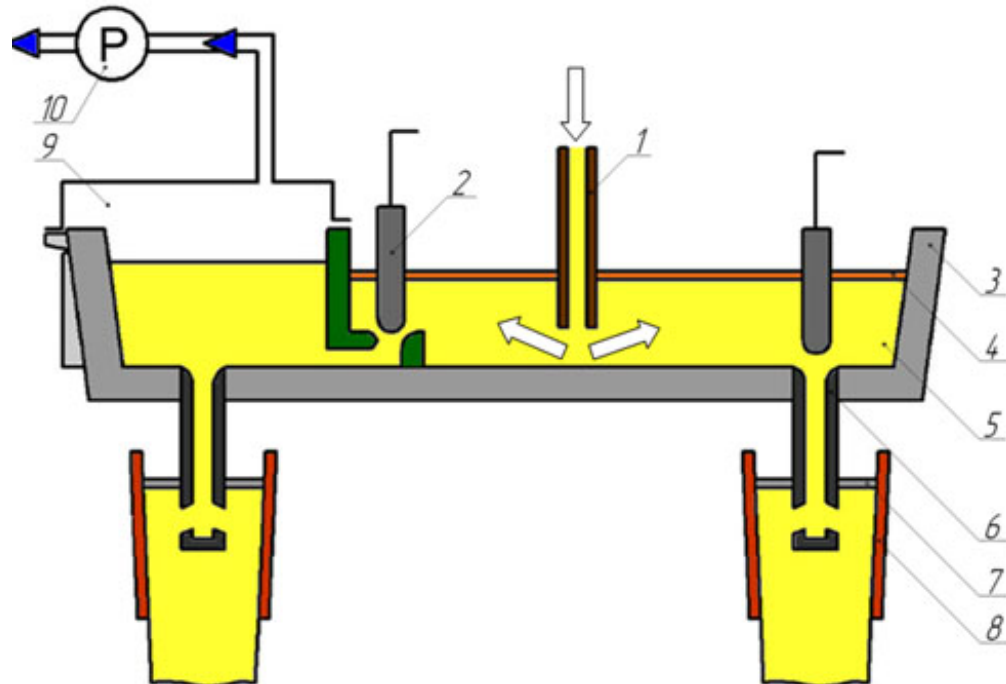
Однією з новітніх тенденцій розвитку проміжних ковшів для розливу особливо високоякісних марок сталей є встановлення пристроїв для додаткового підігріву металу в промківші [13]. Найчастіше на металургійних заводах для підігріву металу в промківші використовують плазмовий пальник (рис. 1.6).



а) одноручної промківш, б) вид промислової реалізації підігріву  
Рисунок 1.6 - Загальна схема плазмового підігріву сталі

Підігрів сталі в промківші є високоефективною технологічною операцією, яка сприяє стабілізації роботи МНЛЗ загалом та сприяє скороченню поточних витрат.

Подальше підвищення чистоти металу безпосередньо в процесі безперервного розливання, мабуть, може бути досягнуто при застосуванні методів вакуумної обробки сталі в промківші (рис. 1.7) [16,17].



1 – захисна труба; 2 – стопор-моноблок; 3 – проміжний ківш;  
4 – теплоізолююча суміш; 5 – сталь; 6 – занурювальна склянка; 7 – шлакоутворююча суміш; 8 – кристалізатор; 9 – камера для вакуумування; 10 - вакуумний насос

Рисунок 1.7 – Схема вакуумування сталі в промківші, запропонована «Бритіш стил»

У цьому випадку досягається зменшення швидкості заростання занурювальних склянок оксидами, а необхідність продувки, що рафінує, сталі аргоном через стопор-моноблок або шибєрний затвор відпадає.

Узагальнюючи відомі дослідження [4,5,7], слід підкреслити, що раціональний вибір конструкції та розташування керуючих елементів: продувних блоків, перегородок, металоприймача та ін. включень у сталі; підвищення стійкості футерування промківша та зниження питомих витрат на розлив; підвищення серійності розливу з одного промківша при забезпеченні



стабільності лиття протягом усього циклу; запобігання заростанню сталепровідного каналу склянки-дозатора, шибєрного затвора або занурювальної склянки.

### 1.3 Проміжний ковш, як об'єкт автоматизації

Проміжний ківш – важливий функціональний елемент безперервного розливання сталі, який забезпечує прийом рідкого металу, що витікає зі сталерозливного ковша, його усереднення та розподіл по струмках. Він має певну конфігурацію, що сприяє повнішій флотації неметалевих включень. Дозволяє здійснювати серійне розливання методом плавлення на плавку при зміні сталерозливних ковшів без припинення та зниження швидкості розливання.

Машина безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) є складними багатомашинними агрегатами з великою кількістю автоматизованих електроприводів, вузлів та систем автоматичного контролю та регулювання. Схема вертикальної МБЛЗ та система автоматики показана на рис. 1.8.

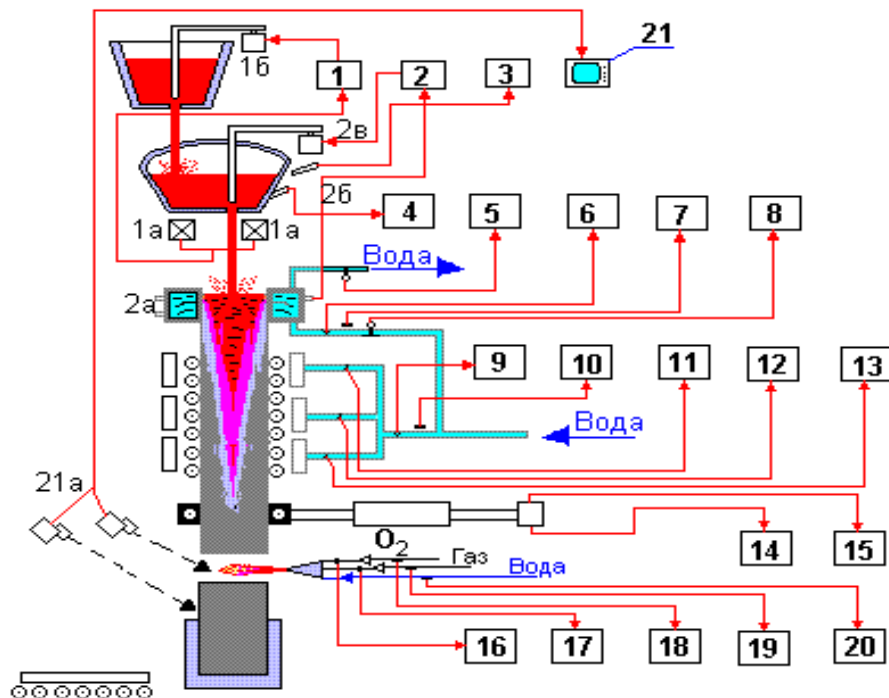


Рисунок 1.8 - Схема автоматизації МБЛЗ вертикального типу

Сталь подається зі сталеплавильного відділення в ковші, з якого виливається в проміжний ківш і далі кристалізатор. Злиток із затверділими стінками витягується вниз кліть, що тягне, проходячи зону вторинного охолодження водою. Розрізання зливка на мірні довжини здійснюється автоматичним газорізанням.

Автоматизовані електроприводи приводять в дію кліть, що тягне, механізм гойдання кристалізатора, механізми газорізання, видачі злитків, правильної машини і т.д. Для зручності спостереження та управління механізмами МНЛЗ на щиті автоматики передбачається мнемосхема із сигналізацією про стан механізмів та панель аварійної сигналізації. Аварійна і попереджувальна сигналізації сповіщають про відключення механізму гойдання кристалізатора, зупинку клітки, що тягне, різання зливка, що затягнулося, відсутність приймального візка підйомника під злитком і т.п.

Установки безперервного розливання стали працюють у стаціонарному режимі та вимагають для підтримки такого режиму досконалої системи автоматичного контролю та регулювання. Відхилення від найкращого режиму розливання, викликані різними збуреннями, можуть призводити до зменшення продуктивності, погіршення якості металу та виникнення аварійних ситуацій. Системи автоматичного контролю та регулювання МНЛЗ сприяють усуненню обурень та забезпечують найбільш раціональний режим розливання та безпечну роботу агрегату.

Основними функціями системи контролю та регулювання власне процесу розливання є:

а) контроль та автоматична стабілізація рівнів рідкого металу в проміжному ковші та кристалізаторі, що забезпечує рівномірний злив металу та стаціонарний режим його кристалізації, необхідний для отримання хорошої якості зливка;

б) контроль та регулювання витрати води в секціях зони вторинного охолодження для рівномірного відведення тепла зі зливка, що також необхідно для отримання хорошої якості металу;

в) контроль температурного стану конструктивних елементів агрегату з метою усунення аварійних режимів;

г) автоматичне різання зливка на мірні довжини, тобто. на заготовлі заданої довжини.

Рівень металу в проміжному ковші (рис.1.8) стабілізується комплектом апаратури, що складається з тензометричних датчиків маси 1а і регулюючого пристрою 1, що управляє приводом стопора ковша 1б. Таким чином, рівень металу в проміжному ковші регулюється побічно шляхом стабілізації. Регулюючий пристрій працює за двопозиційним законом регулювання.

Стабілізація рівня металу в кристалізаторі забезпечує стаціонарні умови затвердіння зливка та його гарну якість, а також безпечну роботу установки. Перевищення рівня металу в кристалізаторі може призвести до переливу сталі на робочий майданчик, а неприпустиме зниження - до прориву рідкого металу з внутрішніх об'ємів зливка через скоринку, що недостатньо оформилася, після виходу з кристалізатора. Обидва випадки є аварійними.

Апаратура контуру регулювання рівня складається з радіоактивного рівня, має джерело гамма-випромінювання 2а і приймач 2б, регулюючого комплекту 2 і приводу стопора проміжного ковша 2в. При відхиленні рівня металу від заданого значення регулятор опускає або піднімає стопор, тим самим зменшуючи або збільшуючи прохідний переріз зливного отвору днище ковша.

Температура сталі в проміжному ковші періодично контролюється термопарою занурення з реєстрацією на потенціометрі 3. Для спостереження за ступенем прогріву кладки ковша перед наповненням металом в ній встановлюють термопару з потенціометром, що реєструє 4.

При розливанні злитків невеликого перерізу перекриття струменя металу стопором може призвести до його деформації, розбризкування металу по стінках кристалізатора та погіршення умови утворення якісного зливка. Тому застосовується спосіб регулювання рівня металу в кристалізаторі шляхом зміни

швидкості витяжки зливка при постійній подачі рідкого металу з проміжного ковша. В цьому випадку регулятор 2 впливає на привід кліті, що тягне.

Регулювання витрати води по секціях системи вторинного охолодження необхідне організації правильного режиму кристалізації і охолодження металу за висотою зливка та його периметру. Рівномірне охолодження граней зливка усуває можливу його деформацію через температурну напругу. Витрати води по секціях вторинного охолодження контролюються стандартними комплектами 11, 12, 13 з вимірювальними діафрагмами або ротаметрами як первинні прилади. Зміна витрати води здійснюється дистанційним ручним керуванням регулювальними клапанами на водопроводах.

Тиск і витрати води на кристалізатор і вторинне охолодження контролюються приладами 6, 7 і 9, 10, причому манометри 7 і 10 мають сигнальні контакти для сигналізації про неприпустиме падіння тиску води.

Контроль теплової роботи та температурного стану кристалізатора здійснюється вимірюванням температури води на його виході термометром опору з електронним автоматичним мостом 5. Аналогічним комплектом 8 контролюється температура води на вході кристалізатор. Відлік загальної довжини зливка і мірних довжин здійснюється за допомогою датчиків імпульсів, встановлених на валу редуктора клітки, що тягне, і приладу 14, що включає в себе лічильники імпульсів і показують індикатори. Тахогенератором та приладом 15 визначається швидкість руху металу.

Робота автоматичного газорізання потребує відповідних кількостей газу, кисню та охолоджувальної води. Тиск в лініях, що підводять, контролюється манометричними комплектами з сигнальними контактами 18, 19, 20, а витрати газу і кисню - вимірювальними діафрагмами з приладами 16 і 17.

Для спостереження за роботою окремих вузлів агрегату, наприклад, за роботою газорізання та механізму прийому та видачі відрізаних злитків, застосовується промислова телевізійна установка, що складається з камер та приймача зображення 27. При дослідженні та налагодженні контролюється

температура зливка на різних ділянках за допомогою пірометрів випромінювання.

Управління роботою всієї МНЛЗ ведеться з центрального операторського пульта центрального операторського пульта, розташованого на розливному майданчику, пульта газорізки і пульта управління видачею злитків. , подача мастила. відсутності автоматичного регулювання рівнів металу в проміжному ковші і кристалізаторі з центрального пульта оператор дистанційно керує стопорами ковшів.

Схема системи автоматизації МНЛЗ радіального типу наведено на рис.1.9.

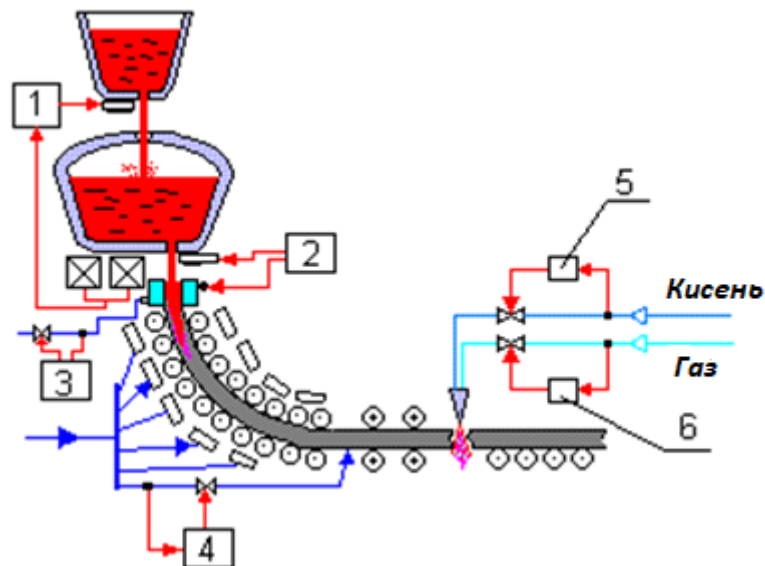


Рисунок 1.9 – Схема автоматизації МНЛЗ радіального типу

Достоїнством установок такого типу є те, що вони вимагають для своєї споруди цеху меншої висоти через вигин зливка і загальні капітальні витрати на спорудження цехів при цьому зменшуються. Основні функції управління, засоби контролю та вузли регулювання для радіальних МНЛЗ такі самі, як і для вертикальних установок.

Рівень металу в проміжному ковші та кристалізаторі регулюється блоками 1 та 2, блоки 3 та 4 призначені для регулювання охолодження кристалізатора та металу, блоки 5 та 6 регулюють витрату газу та кисню на газорізку.

Відмінність радіальних МНЛЗ полягає також у тому, що в них для управління зливом металу з розливного ковша в проміжній і з останнього кристалізаторів застосовуються не стопорні пристрої, а шибєрні.

До локальних систем відносяться:

- САР міксерного відділення сталеплавильного цеху;
- система регулювання рівня металу у проміжному ковші;
- система регулювання рівня металу у кристалізаторі;
- САР теплового режиму кристалізатора;
- САР теплового режиму вторинного охолодження та ін.

#### 1.4 Склад АСУ ТП безперервного розливання сталі

АСУ ТП безперервного розливання сталі входить зазвичай як складова частина в інтегровану АСУ сталеплавильним, наприклад, конвертерним цехом.

Загалом

АСУ ТП має забезпечувати за рахунок стабілізації та оптимізації технологічних режимів розливання, підвищення продуктивності; підвищення виходу придатного металу; зменшення кількості аварійних режимів роботи та підвищення працездатності МНЛЗ, покращення умов праці обслуговуючого персоналу.

Основні функції АСУ ТП безперервного розливання сталі:

*Інформаційні та інформаційно-обчислювальні*

- Контроль величин:

- а) температури рідкої сталі в сталерозливному ковші;
- б) температури рідкої сталі у проміжному ковші;
- в) маси сталі в сталерозливному ковші;
- г) маси (рівня) металу у проміжному ковші;
- д) рівня металу у кристалізаторі;
- е) зусилля витягування зливка із кристалізатора;

- ж) швидкості витягування зливка (швидкості розливання);
- з) витрати та тиску охолоджувальної води на кристалізатор;
- і) перепаду температур води, що охолоджує, на кристалізаторі;
- к) витрати технологічного мастила в кристалізатор;
- л) витрати та тиску води на секції зони вторинного охолодження;
- м) температури поверхні злитка; н) зусилля на опорні валки ділянки правки злитка;
- о) загальної та мірної довжин зливка.

- Розрахунок:

- а) теплового стану та товщини оболонки зливка в зоні вторинного охолодження;
- б) основних параметрів розливу (швидкість розливу, витрата мастила, витрата охолоджувальної води на кристалізатор і на вторинне охолодження;
- в) техніко-економічних показників роботи МНЛЗ.

*Керуючі функції*

- управління величинами

- а) масою (рівнем) металу у проміжному ковші;
- б) рівнем металу у кристалізаторі;
- в) витратою води на кристалізатор;
- г) витратою води на секції зони вторинного охолодження;
- д) витратою технологічного змащення;
- е) витратою газу та кисню на газорізання.

- Управління процесами

- а) пусковим режимом МНЛЗ;
- б) режимом вторинного охолодження зливка;
- в) витяжки зливка (приводом клітей, що тягнуть;
- г) порізом зливка на мірні довжини;
- д) оптимальним режимом закінчення розливу з метою зменшення відходів;

е) режимом розливання методом «плавка на плавку» шляхом розрахунку та видачі рекомендацій щодо підтримки потрібного контактного графіка.

Для реалізації оптимальних функцій передбачені відповідні системи контролю та управління.

Окрім наведеного вище переліку функцій АСУ ТП здійснює:

- сигналізацію відхилення від норм основних технологічних параметрів процесу;
- накопичення інформації про режим вилівки та умови формування кожної заготівлі для подальшого аналізу;
- реєстрацію передаварійних ситуацій;
- підготовку та друк технологічного паспорта розливання та інших документів про роботу МНЛЗ.

1.4 Способи дозування сталі при її перетіканні з проміжного ківша у кристалізатор

У практиці безперервного лиття сталі особлива увага приділяється дозуванню металу, що витікає з проміжного ківша. При витіканні металу з тунди прагнуть сформувати певний питомий витрата сталі (відповідно до швидкості волочіння заготовки), найбільш ущільнену поверхню потоку, а також її захист від вторинного окислення.

Слід мати на увазі, що в процесі протікання сталі через дозуючий пристрій трансформується геометрична форма тих чи інших зон дозуючих вогнетривів. Це може відбуватися або через ерозійне зношування внаслідок сколів і розтріскування вогнетривких виробів, або через відкладення оксидів алюмінію (або інших шлакових включень) на їх робочій поверхні.

Існує три основні схеми дозування металу:



- вільна подача металу з проміжного ківша з жорстким регулюванням діаметра отвору дозуючого стаканчика (швидкість розливу регулюється висотою заливки металу в проміжний ківш);

-- використання моноблочної пробки, яка може переміщатися щодо дозуючого стаканчика і тим самим змінювати витрату витікає металу в широкому діапазоні;

- Використання трьохпластинчастого шибера, встановленого на дні проміжного ківша.

Для забезпечення першої схеми лиття використовуються спеціальні дозуючі стаканчики, оснащені цирконовими вставками з високою тугоплавкою і ерозійної стійкістю.

Необхідний внутрішній діаметр дозуючого стаканчика визначається питомою витратою сталі (кг/хв). Зазвичай діаметр внутрішньої порожнини дозуючого стаканчика знаходиться в межах 12-18 мм (рисунок 1.10).

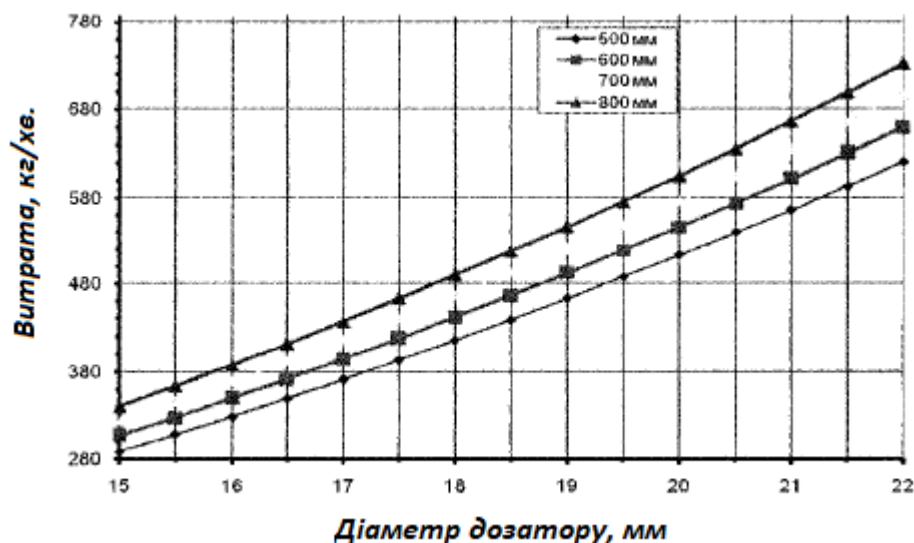


Рисунок 1.12 - Залежність питомої витрати сталі при відкритому потоковому литті від висоти наливки металу в проміжному ківші

Залежно від поперечного перерізу оброблюваної деталі, швидкості витягування зливка, висоти заливки металу в проміжному ківші, марки сталі і

т.п. Внутрішній діаметр дозуючого стаканчика може бути визначений за допомогою наступної емпіричної формули:

$$d_0 = (0,06 \dots 0,07) \cdot [(A \cdot B \cdot V)/h^{0,5}]^{0,5}$$

де  $d_0$  - діаметр стакану-дозатора, мм;

$A$  й  $B$  - товщина та ширина заготовки, м;

$V$  – швидкість витягування заготівлі, м/хв.;

$h$  - висота наливу сталі у промківші, м.

В цілому всі розглянуті схеми дозування сталі при її заливці з проміжного ківша в форму широко використовуються в даний час на металургійних заводах і відповідають вимогам надійності, безпеки і сумісності з сучасними системами автоматизації, зокрема, з системою підтримки рівня металу в прес-формі.

*Висновки за розділом:*

У результаті аналізу технологічного процесу безперервної розливки сталі було встановлено, що:

– *Технологічний процес безперервної розливки сталі є одним із ключових етапів у металургії, що впливає на якість кінцевого продукту. Стабільність та ефективність цього процесу значною мірою залежать від рівня автоматизації.*

– *Проміжні ковші відіграють важливу роль у забезпеченні рівномірного потоку металу, компенсації температурних втрат і контролю хімічного складу сталі. Визначено основні види та функції ковшів, а також їх значення у технологічному процесі.*

– *Проміжний ковш як об'єкт автоматизації характеризується складністю через необхідність управління багатьма параметрами, такими як температура металу, рівень сталі, контроль шлакової фази та часу перебування. Це визначає високі вимоги до систем автоматизації та точності вимірювальних пристроїв.*

– У процесі аналізу існуючих рішень автоматизації було встановлено, що сучасні АСУ ТП для безперервної розливки сталі базуються на використанні інтегрованих систем, що включають сенсори, програмовані логічні контролери (PLC), SCADA-системи для моніторингу та управління. Це дозволяє підвищити ефективність процесу, знизити втрати та забезпечити високу якість продукції.

Отже, результати аналізу створюють базу для подальшого розроблення вдосконаленої системи автоматизації, яка забезпечить підвищення ефективності управління процесом безперервної розливки сталі.

## РОЗДІЛ 2

### МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РОЗЛИВКИ СТАЛІ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ

#### 2.1 Математичний опис теплообміну процесу розливання сталі при сталій швидкості МБЛЗ

Забезпечення належного температурного режиму під час виробництва заготовок на МБЛЗ є однією з ключових технологічних задач. Температура впливає на швидкість затвердіння сталі, глибину рідкої зони та її фізико-механічні властивості. Нерівномірний розподіл температури вздовж перерізу та довжини заготовки може спричинити температурні деформації, які перевищують межі пружності або текучості матеріалу. Швидкість охолодження визначає характер структурних змін у сталі, що безпосередньо впливає на формування властивостей готової продукції [19-21].

Наявний контроль хімічного складу, температури сталі та окремих технологічних режимів, а також їх оперативне (часто інтуїтивно професійне) коригування не завжди достатні для забезпечення необхідної якості неперервнолитих заготовок [12]. У виробничій практиці трапляються ситуації, коли за стабільності контрольованих параметрів на одній із двох плавок МБЛЗ виникають недопустимі дефекти, такі як тріщини. Іноді основна причина появи дефектів не є очевидною, і для її визначення проводяться спеціалізовані дослідження. Спрощення вирішення цієї проблеми можливе за рахунок використання більш широкого спектра відсутніх та неоцінених параметрів, але обчислених на основі поточних даних під час моделювання.

Для створення самоналаштованої системи оптимального керування процесом охолодження заготовок відповідно до визначених завдань першочерговим кроком є ідентифікація об'єкта керування, тобто розробка моделі процесу охолодження заготовок. Для якісного опису тепло- і масообмінних

процесів, кристалізації та виникнення напружень необхідно створити точні та надійні математичні моделі, які забезпечать адекватне відображення цих явищ.

Кристалізація сталі є процесом агрегатного перетворення, що відбувається при досить високій температурі — в межах 1530...1650 °С, супроводжуючись значними перепадами температур як у самому застигаючому злитку, так і в елементах машини, що контактують з ним. Практичний досвід свідчить, що неправильний вибір режиму охолодження або невідповідність між швидкістю розливання та швидкістю кристалізації можуть спричинити аварійні ситуації, такі як прорив рідкої сталі через тверду оболонку, або призвести до утворення в злитку критичної кількості дефектів.

Відомо, що всі сплави твердіють у певному інтервалі температур, а не при фіксованій постійній температурі. Одним із підходів до опису цього процесу є аналітичне автотельне рішення, яке базується на ряді спрощень: припущенні про злиток як нескінченної пластини, відсутності теплового опору на поверхні розділу, сталості теплофізичних характеристик і рівномірного розподілу теплоти кристалізації в усьому інтервалі затвердіння. Для розв'язання цього завдання застосовуються також інші підходи, які включають менш жорсткі обмеження: наближені аналітичні методи, а також числові методи розв'язання диференціальних рівнянь із заданими граничними умовами.

Під час моделювання двофазної зони припускається, що затвердіння багатоконпонентних сплавів відбувається в інтервалі температур між ліквідусом і солідусом, з утворенням зони твердо-рідкого стану, яка розділяє рідку та тверду частини металу. У зоні перед застигаючою поверхнею виникає концентраційне переохолодження, що робить плоску межу розділу фаз нестійкою та сприяє утворенню дендритних розгалужень кристалів замість плоских структур.

З металургійної точки зору особливий інтерес становлять властивості кривих ліквідус і солідус (рис. 2.1). Вертикальна відстань між цими кривими відображає область злитка, де одночасно існують тверда і рідка фази в процесі затвердіння. Ця відстань визначає ширину двофазної зони, яка суттєво впливає

на ливарні характеристики сплаву. Крім того, вона визначає час локального затвердіння, тобто проміжок часу, необхідний для зниження температури певної ділянки металу від температури ліквідус до температури солідус.

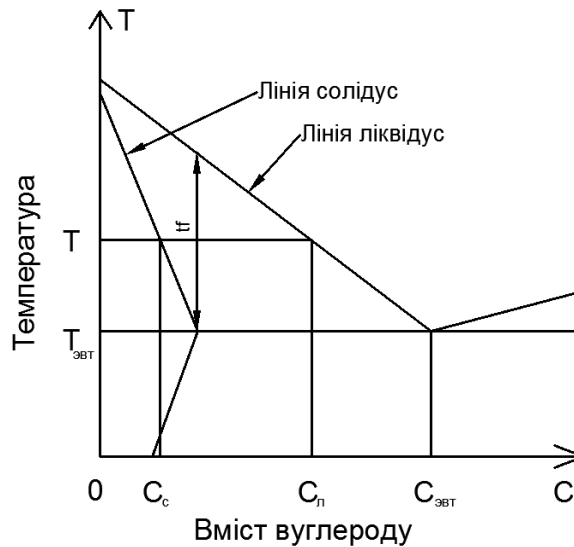


Рисунок 2.1. Ділянка діаграми (спрощена) стану бінарного розплаву

Повна модель двофазної зони бінарного сплаву описується системою диференціальних рівнянь, що включає рівняння енергетичного балансу, масопереносу, нерозривності середовища та рівноваги фаз. Ця модель враховує всі основні фізичні процеси, що відбуваються під час затвердіння, забезпечуючи комплексний опис взаємодії між фазами.

У випадку нестационарних умов розливання виникають перехідні режими в температурному полі заготовок, які супроводжуються змінними тепловими та масообмінними процесами. Статичні моделі температурного розрахунку не здатні адекватно відобразити ці динамічні зміни, що обмежує їхню ефективність у реальних виробничих умовах. Для вирішення цієї проблеми необхідні адаптивні моделі, які враховують часові зміни та динаміку процесу затвердіння.

Аналіз наявних математичних моделей процесу показав, що для врахування динаміки теплообміну з урахуванням нестационарності

теплофізичних властивостей сталі доцільно застосовувати наступний підхід. Вплив конвекції в рідкому металі враховується введенням ефективного коефіцієнта теплопровідності, що дозволяє спростити обчислення без втрати точності. Теплота кристалізації інтегрується в ефективну питому теплоємність металу в межах температурного інтервалу між ліквідусом і солідусом.

Прийнята розрахункова схема дозволяє описувати процес теплообміну у вигляді двовимірного нелінійного диференціального рівняння нестационарної теплопровідності для заданої області. Такий підхід забезпечує більш точне моделювання динамічних змін у температурному полі та фізичних властивостях металу.

Прийняту схему теплообміну можна представити таким рівнянням:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \right], \quad (2.1)$$

де  $c = c(x_1, x_2, z, T)$ - питома теплоємність;  $x_1, x_2, z$ - поточні координати;

$\rho = \rho(x_1, x_2, z, T)$ - щільність;  $\lambda(x_1, x_2)$ - коеф-єнт теплопровідності;  $\tau$ - час.

У квазістационарному режимі граничні межі залишаються сталими у часі, тому рівняння (2.1) приведемо до наступного вигляду:

$$V \rho c \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \right], \quad (2.2)$$

Граничні межі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial x_1}(0, x_2, z) &= \frac{\partial T}{\partial x_2}(x_1, 0, z) = 0 \\ T(x_1, x_2, 0) &= T_H = const; \\ T(a, x_2, z) &= f_1(z); \\ T(x_1, b, z) &= f_2(z), \end{aligned} \quad (2.3)$$

де  $T_H$ - температура рідкого металу зі зливу проміжного ківша;  $f_1(z)$  и  $f_2(z)$  - закони розподілу температури.

Якщо швидкість розливу величина стала, то координату  $z$  краще виразити через час таким чином:

$$z = V \cdot \tau \quad (2.4)$$

Відповідне рівняння (2.1) з урахуванням (2.4) прийме наступний вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_1} \right] + \frac{\partial}{\partial x_2} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x_2} \right] \quad (2.5)$$

На МБЛЗ розливають найчастіше вуглецеву конструкційну сталь. Тому її теплофізичні параметри краще представити за допомогою кусочно-лінійних функцій:

а) теплопровідності коефіцієнт -  $\lambda$ , Вт/(м•К):

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= 51.9 - 0.021T, & T &= 0 \dots 300^\circ C \\ \lambda &= 58.1 - 0.0416T, & T &= 300 \dots 800^\circ C \\ \lambda &= 0.0117T + 15.4, & T &= 800 \dots 1420^\circ C \\ \lambda &= 2.4T - 3376, & T &= 1420 \dots 1500^\circ C \\ \lambda &= 22.4, & T &\geq 1500^\circ C \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

б) теплоємність питома (масова) -  $C$ , Дж/(кг•К):

$$\left. \begin{aligned} C &= 0.474T + 450.5, & T &= 0 \dots 680^\circ C \\ C &= 16.25T - 10198.2, & T &= 680 \dots 730^\circ C \\ C &= 9405.8 - 10.79T, & T &= 730 \dots 830^\circ C \\ C &= 1.2T - 486, & T &= 830 \dots 930^\circ C \\ C &= 0.18T + 457.5, & T &= 930 \dots 1420^\circ C \\ C &= 85T - 1.2 \cdot 10^5, & T &= 1420 \dots 1500^\circ C \\ C &= 795.5, & T &\geq 1500^\circ C \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

в) щільність -  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= 7858 - 0.35T, & T &= 0 \dots 700^\circ C \\ \rho &= 7459 + 0.22T, & T &= 700 \dots 800^\circ C \\ \rho &= 7973 - 0.423T, & T &= 800 \dots 1420^\circ C \\ \rho &= 12200 - 3.4T, & T &= 1420 \dots 1500^\circ C \\ \rho &= 7100, & T &\geq 1500^\circ C \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$



Питома масова теплоємність у двофазній зоні враховує теплоту кристалізації, яка виділяється згідно з лінійною залежністю від температури. Це дозволяє врахувати поступове вивільнення енергії в процесі переходу рідкої фази в тверду.

Коефіцієнт теплопровідності рідкого металу враховує ефект конвекції, що сприяє більш рівномірному розподілу тепла в рідкій фазі. Такий підхід підвищує точність моделювання теплообмінних процесів, особливо у випадках значного впливу конвективних потоків у зоні рідкого металу.

## 2.2 Проміжний ківш, як об'єкт автоматизації

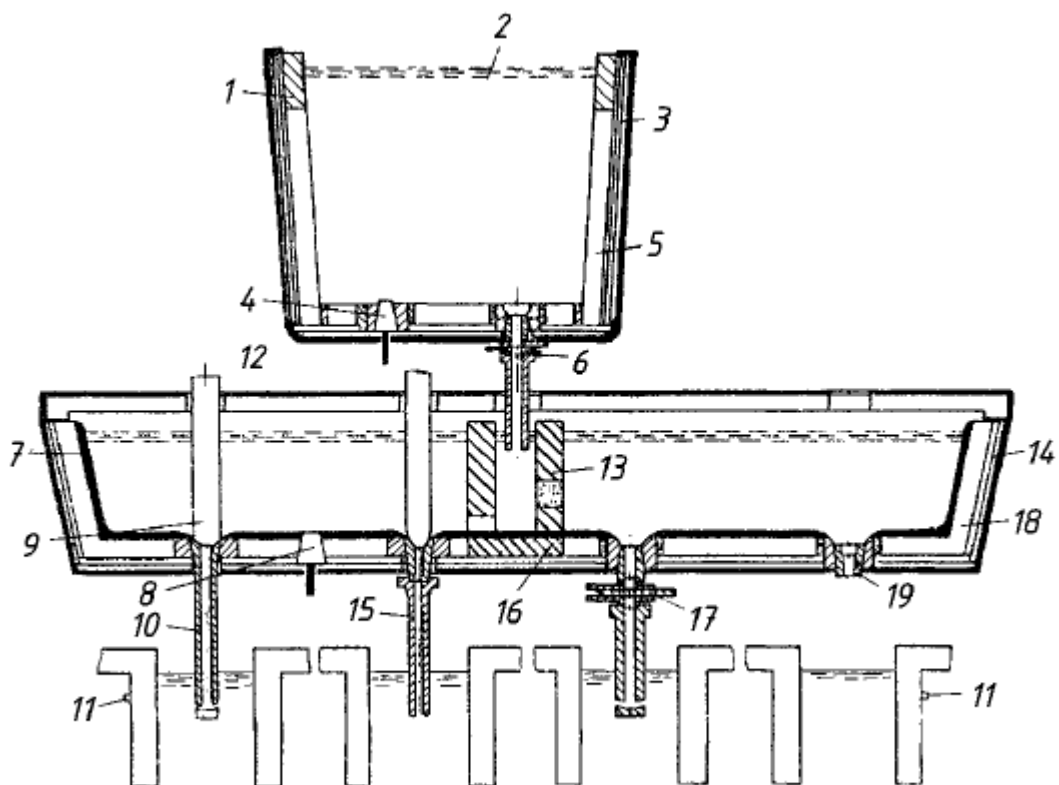
Проміжний ківш (промковш), який є невід'ємною складовою виробничої лінії безперервного розливання сталі (рис. 2.2), спочатку виконував функцію розподільного буферного пристрою для забезпечення стабільного напору розплаву, що надходить до кристалізаторів МБЛЗ [26]. Однак з часом він перетворився на металургійний агрегат безперервної дії, який використовується для додаткового позапічного рафінування сталі та підвищення її якості.

Найбільш несприятливі умови для видалення неметалевих включень виникають у спокійній ванні. У таких випадках швидкість спливання частинок окремих включень  $u_{\text{ч}}$  можна розрахувати за допомогою формули Стокса або Рибчинського-Адамара [9, 14].

Для підйому включень із радіусом  $r_{\text{в}}$  швидкість за формулою Стокса визначається наступним виразом:

$$u_{\text{ч}} = \frac{2}{9}(d_{\text{ст}} - d_{\text{ч}}) \frac{r_{\text{ч}}^2}{\eta} \quad (2.9)$$

Ця формула використовується для оцінки швидкості підйому включень у рідкому металі за умов спокійного стану розплаву.



1 – зона шлаку; 2 – сталерозливний ківш; 3 – ізоляція; 4 – пристрій для продувки газом; 5 – робочий шар футерування, що зношується; 6 – ковзний затвор із захисною трубою; 7 – захисний шар; 8 – система для продувки газом; 9 – стопор-моноблок; 10 – занурюваний стакан (монолітний); 11 – кристалізатор; 12 – проміжний ківш; 13 – перегородка з керамічним фільтром; 14 – ізоляційний шар; 15 – занурюваний стакан (що складається з двох частин); 16 – опорна плита; 17 – ковзний затвор; 18 – робоче футерування, що зношується; 19 – стакан вільного розливання.

Рисунок 2.2 – Загальна схема проміжного ковша МБЛЗ

Аналіз теплових процесів у проміжному ковші розглянуто в роботах [7, 13, 14]. Основними джерелами втрат тепла рідким металом під час роботи цього металургійного агрегату є тепловіддача конвекцією до футерівки ковша, а також тепловіддача випромінюванням і конвекцією від поверхні металу, вкритої шаром шлаку [13]. Нерівномірність температурного поля по довжині проміжного ковша обумовлена різницею в часі переміщення потоків металу від місця їхнього подання до центральних і периферійних зон [14].

Час переміщення порцій металу від місця заливки до струменів розливання збільшується зі зростанням рівня розплаву [4] і зниженням швидкості

розливання [13]. Однак вибір місця подачі струменя металу відносно поздовжньої осі промковша має незначний вплив на цей процес.

Велика довжина багатоструменевих проміжних ковшів, обумовлена технологічними вимогами, створює значний перепад температур у процесі розливання, який може досягати 30 °С між центральною частиною і периферією пристрою [13]. Це пов'язано зі значним охолодженням металу під час його транспортування до крайніх струменів. Для компенсації такого перепаду необхідно перегрівати сталь на виході з конвертера і регулювати швидкість витягування заготовок у різних кристалізаторах, щоб вирівняти температурні умови.

Одним із ефективних способів забезпечення рівномірного розливання є встановлення вогнетривких перегородок у проміжному ківші, які спрямовують потоки металу і сприяють зменшенню температурних коливань [13].

Для сучасних проміжних металургійних агрегатів, аналогічних до розглянутої в роботі конфігурації, тепловий стан, хоча і впливає на гідродинамічні та масообмінні процеси, у більшості випадків не є критично важливим фактором для основного робочого циклу. Це пов'язано з тим, що в умовах близьких до сталого теплового розподілу у футеровці та периферійних зонах агрегату, а також за відносно незначних теплових втрат (у порівнянні з теплом, яке переносить розплав через пристрій), теплові градієнти в агрегаті зазвичай не перевищують 2–3 °С.

За таких умов тепловий фактор не є суттєвим для оцінки процесів видалення неметалічних включень, оскільки основну роль у цих процесах відіграють гідродинамічні та масообмінні явища, які залежать від характеру потоків і взаємодії фаз у рідкому металі.

Одним із ключових параметрів, що характеризують ефективність роботи проміжного ковша, є величина теплових втрат під час розливання металу. Очевидно, що енергетична ефективність промковша значною мірою залежить від

його геометричних характеристик, зокрема пропорцій площ поверхонь, через які відбувається відведення тепла.

Наприклад:

- *Площа поверхні дзеркала металу* впливає на теплові втрати через випромінювання та конвекцію.
- *Площа футеровки* визначає теплові втрати через теплопровідність та передачу тепла до оточуючих елементів.
- *Форма і розміри ковша* визначають гідродинамічні умови руху металу, що впливає на рівномірність температурного поля та, відповідно, теплові втрати.

Оптимізація геометричних параметрів ковша дозволяє зменшити теплові втрати, підвищити енергетичну ефективність агрегату та забезпечити більш стабільні умови для розливання сталі. Це, в свою чергу, сприяє покращенню якості готової продукції.

Припускаючи плаский плин у проміжному ківші (рис. 2.3), швидкість металу, що надходить у промківш, визначається таким чином, щоб забезпечити витрати, необхідні для подачі металу до кристалізаторів. Для компенсації падіння швидкісного напору приймається ефективний переріз трубопроводу та розливних стаканів, що враховує усереднений поперечний розмір промківша  $b \approx 1$  м.

За початковий стан приймається стаціонарний рівень металу в промківші, що забезпечує постійність гідростатичного тиску та стабільність потоку металу..

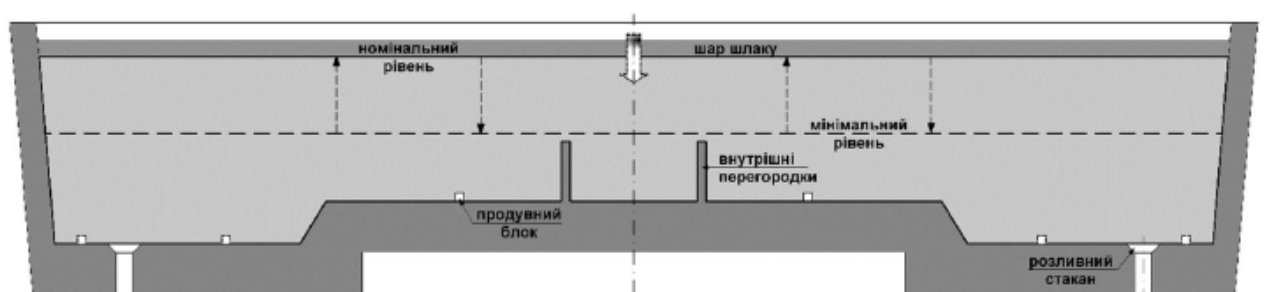


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення просторової області проміжного ківша.

Для математичного моделювання руху розплаву в порожнині проміжного ковша (див. рис. 2.3, область  $\Omega_1$ ) скористаємося системою рівнянь у наближенні Буссінеска [10] використовуючи систему рівнянь Нав'є-Стокса, яка враховує вплив гравітації та теплової залежність густини. У векторному вигляді в фізичних змінних система рівнянь має вигляд:

*Рівняння збереження маси (нерозривності):*

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.10)$$

де  $\mathbf{V}$  - вектор швидкості.

*Рівняння Нав'є-Стокса (з урахуванням сил Буссінеска):*

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla P + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{g} \beta (T - T_0) \quad (2.11)$$

де:  $\rho_0$  - середнє значення густини металу;  $P$  - тиск;  $\mathbf{g}$  - вектор гравітації;  $\beta$  - коефіцієнт теплового розширення;  $T$  - температура;  $T_0$  - референтна температура.  $\nu = \mu / \rho_0$  - кінематична в'язкість, де  $\mu$  - динамічна в'язкість.

*Рівняння енергії:*

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) T = \alpha \nabla^2 T \quad (2.12)$$

де  $k$  - коефіцієнт теплопровідності,  $c_p$  - питома теплоємність;  $\alpha = k / \rho_0 c_p$  - теплопровідність.

*Граничні умови:*

На стінках промковша: умови прилипання ( $v=0$ ) для швидкості.

Теплові втрати через футеровку враховуються як тепловий потік:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q \quad (2.13)$$

де  $q$  - густина теплового потоку,  $n$  - нормаль до поверхні.

Ця система рівнянь дозволяє моделювати рух розплаву та пов'язані з ним теплові процеси в промковші. Наближення Буссінеска знижує складність, враховуючи лише температурні зміни густини в термічній складовій сили тяжіння, що є прийнятним для металургійних задач.

На основі цього представимо модель об'єкту у пакеті Matlab таким чином:

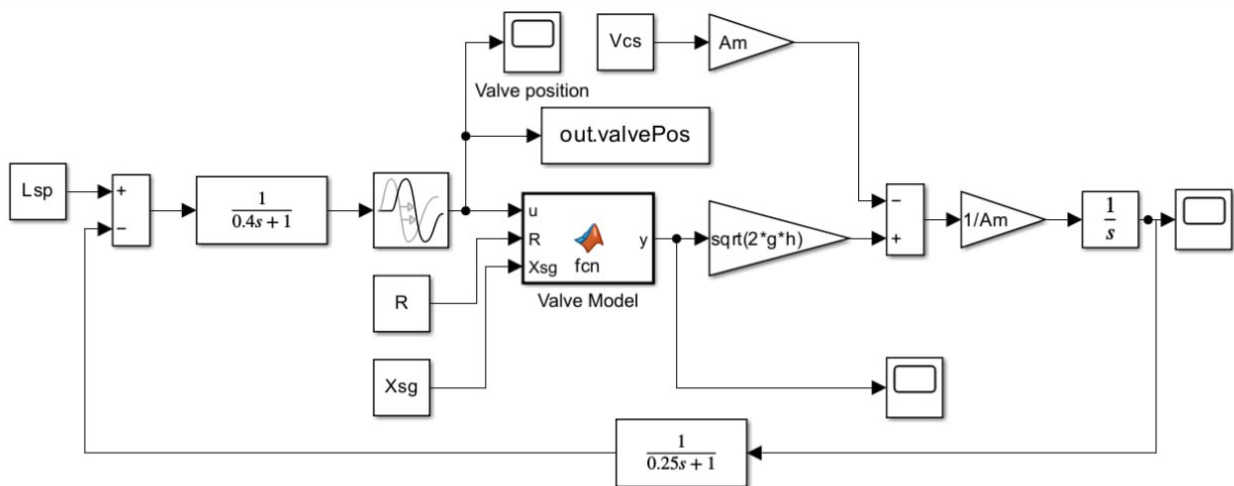


Рисунок 2.4 – Модель об'єкта керування

Блок *Valve Model*, що є в моделі об'єкту керування (рис.2.4) представлено таким чином:

```

function y = fcn(u, R, Xsg)
1  x = u / 2;
2  res = (R^2)*(cos((R - x)/R))^-1-(R-x)*sqrt(R.*Xsg-x^2);
3  y = 2*res;
4
5

```

Рисунок 2.5 - Блок *Valve Model*

На рисунку 2.6 представлені результати моделювання, аналізуючи які можна зробити висновок про постійній швидкості зливу сталі з проміжного ківша до кристалізатору при регулюванні заслінки (проміжного стакану-дозатора).

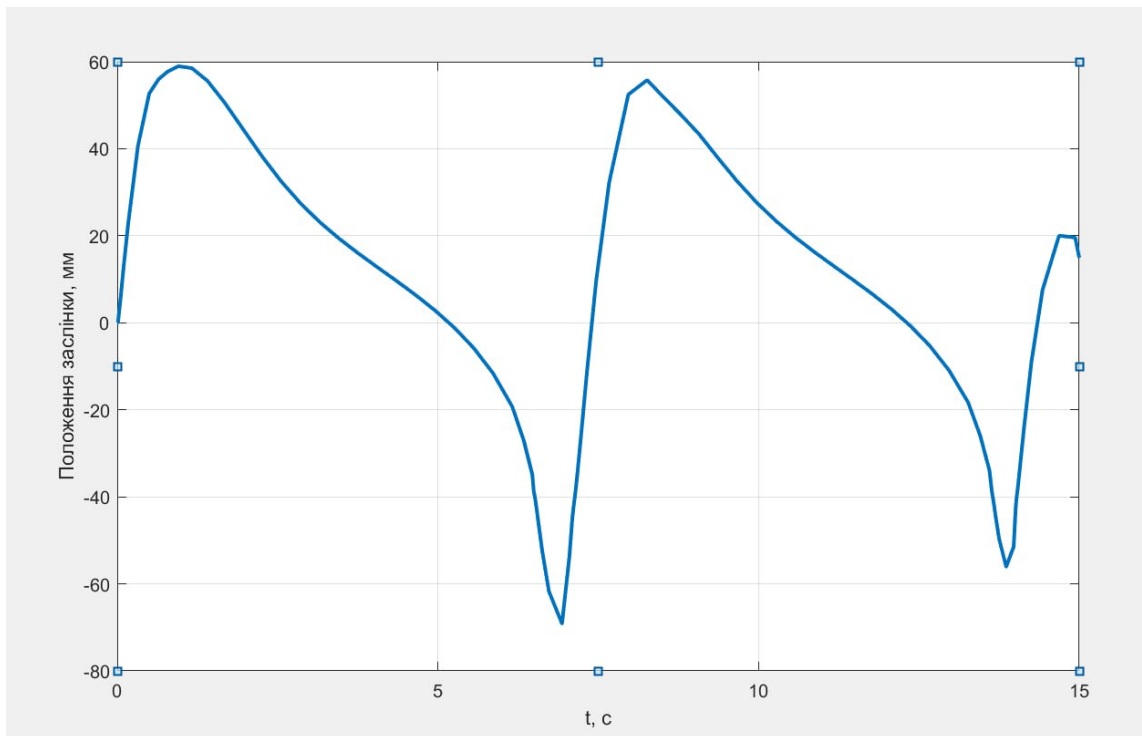


Рисунок 2.6 – Результати моделювання

Виходячи з відношення теплових втрат до кількості тепла, що надходить у промковщ, різниця температур між розплавом, який надходить до промковща, і металом, що направляється в кристалізатори, становить не більше  $2-3^{\circ}\text{C}$  ( $\sim 0.15\%$ ). Це свідчить, що в умовах сталого режиму роботи двострумкового проміжного ківша з заданими конфігураціями, розмірами та тоннажами, тепловий стан агрегату не робить істотного впливу на гідродинамічні та масообмінні процеси.

Таким чином, теплові втрати є мінімальними і не впливають на продуктивність та ефективність роботи агрегату. У таких умовах пріоритет слід віддавати оптимізації гідродинамічних процесів та рівномірності розподілу потоків металу, оскільки саме вони визначають якість сталі та ефективність видалення неметалевих включень.

### 2.3 Динамічні процеси у проміжному ківші

До перехідних режимів безперервного розливання відносяться [18]:

- *Пуск МБРЛЗ* – початок розливання першої плавки в серії.
- *Закінчення розливання серії плавки* – остання плавка в серії.
- *Заміна сталерозливного ковша* – перехід розливання з однієї плавки на іншу.
- *Заміна заглибних стаканів* – зазвичай виконується на певних мірних довжинах слябів.
- *Заміна проміжного ковша* – виконується під час роботи агрегату.

З усіх перехідних режимів найбільш показовим для вивчення динамічних змін рівня розплаву та гідродинамічної ситуації в ньому є процес заміни сталерозливного ковша (перековшовки). У цьому процесі можна виділити три основні етапи з різною перехідною динамікою:

#### *1. Зниження рівня розплаву в проміжному ковші*

- Виникає, коли метал із попереднього сталерозливного ковша закінчується.
- Рівень розплаву в проміжному ковші поступово зменшується, що впливає на стабільність потоків і тепловий стан металу.

#### *2. Заміна ковша та початок наповнення*

- Після встановлення нового сталерозливного ковша починається подача металу в проміжний ківш.
- На цьому етапі спостерігаються значні коливання рівня розплаву, що впливають на стабільність розливання та якість металу.

#### *3. Стабілізація рівня розплаву*

- Після початкової фази наповнення рівень розплаву вирівнюється, досягається стабільний стан.
- Гідродинамічні потоки металу приходять у рівновагу, забезпечуючи сталість умов у промковші та кристалізаторах.

Ці етапи важливі для розуміння та моделювання перехідних режимів, оскільки вони визначають умови для стабільного безперервного розливання та якість готової продукції.



Етап 2, після досягнення стаціонарного режиму, є основним робочим станом, що охоплює більшу частину часу роботи проміжного пристрою. У цей період рух розплаву найбільш інтенсивний у центральній частині проміжного ковша, зокрема у приймальній секції, якщо ківш поділений на кілька секцій. Циркуляційні потоки металу в цій зоні відіграють ключову роль у процесах теплопереносу, перемішування та очищення металу.

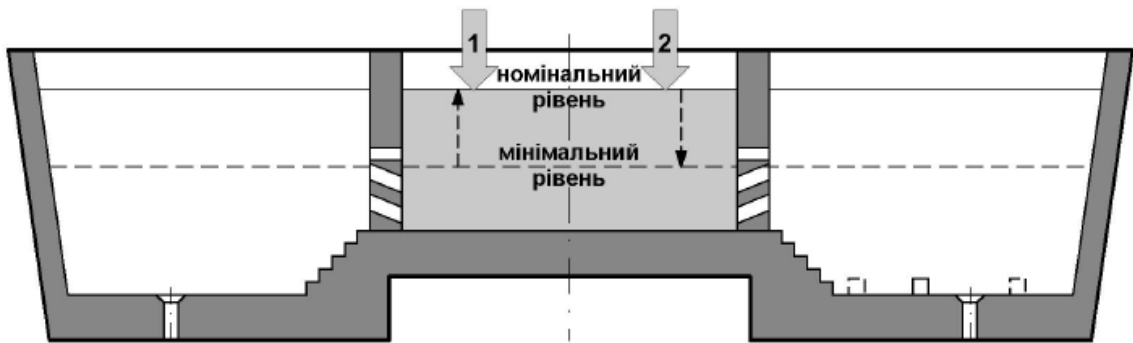
Дослідження циркуляційних потоків металу в періоди перехідних режимів, зокрема під час заміни сталерозливного ковша (перековшовки), є вкрай важливим. Це зумовлено тим, що саме ці процеси значною мірою впливають на якість слябових заготовок і листового прокату, відлитих у період нестабільності.

Додатковим фактором, що погіршує якість, є циклічні асиметрії, які виникають у машинах безперервного розливання сталі з несиметричним розташуванням струменя від сталерозливного ковша. У процесі перековшовки ця асиметрія змінюється циклічно, що посилює неоднорідність температурного та концентраційного поля в розплаві. Це призводить до зростання дефектності металу та ускладнює забезпечення стабільних умов розливання.

Тому для підвищення якості продукції першочергове значення мають:

- Аналіз і моделювання циркуляційних потоків у приймальній секції промковша.
- Вдосконалення конструкції та технологічних параметрів, що мінімізують асиметрію потоків під час перековшовки.
- Оптимізація умов подачі розплаву для зниження впливу перехідних режимів на кінцеву якість продукції.

Робоча зона секціонованого проміжного ковша, яка включає розливні та приймальну секції, розділені перегородками з фільтраційними каналами, зображена на рис. 2.7. Така конструкція забезпечує оптимізацію руху металу в промковші, сприяючи рівномірному розподілу потоків і підвищенню ефективності очищення розплаву від неметалічних включень.



1, 2 – положення струменів металу, що надходить з сталерозливного ковша до і після його заміни відповідно.

Рисунок 2.7 – Схематична область зміни рівня металу (процес перековшовки)

Докладний опис цієї конфігурації наведено в роботі [14], де проаналізовано роль секціонування та фільтраційних каналів у забезпеченні стабільності гідродинамічних і теплових процесів у промковші. Конструктивні особливості, такі як форма, розташування перегородок і параметри фільтраційних каналів, сприяють:

- Зниженню турбулентності потоків у розливних секціях.
- Поліпшенню умов осадження неметалічних включень.
- Підтримці рівномірного розподілу температури та складу металу по довжині ковша.

Ця структура спрямована на підвищення якості сталі, що випускається, та зниження ризику виникнення дефектів у заготовках.

Для формулювання математичної моделі досліджуваних процесів із урахуванням еволюційного характеру задачі додаються наступні припущення:

1. *Початкові умови:* Початкові параметри роботи системи «сталерозливний ківш – проміжний ківш» відповідають сталому режиму безперервного розливання. Це стан системи перед початком перехідного процесу.

2. *Швидкість подачі металу:* Швидкість подачі металу з розливного ковша та відповідна витрата розплаву через захисну трубу є змінними функціями часу, що залежать від етапів перехідного режиму.

3. *Рівень дзеркала металу:* Рівень поверхні металу змінюється у часі в межах від мінімального до номінального, також залежачи від конкретного етапу перехідного режиму.

*Модифікація моделі:*

Для системи «промковш – розплав» базові рівняння (наприклад, рівняння Нав'є-Стокса, енергії та масопереносу) доповнюються початковими та граничними умовами, які враховують специфіку перехідних режимів:

*Початкові умови:*

У початковий момент часу  $t_0$ , що відповідає сталому стану системи, всі параметри — швидкість, температура та концентрація розплаву - відповідають вирішенню стаціонарної задачі.

$$\mathbf{v}(t_0, \mathbf{r}) = \mathbf{v}_0(\mathbf{r}), \quad T(t_0, \mathbf{r}) = T_0(\mathbf{r}), \quad C(t_0, \mathbf{r}) = C_0(\mathbf{r}), \quad (2.14)$$

де  $v_0$ ,  $T_0$ ,  $C_0$  - розподіли швидкості, температури та концентрації на момент часу  $t_0$ .

*Граничні умови для стінок:*

Для стінок промковша зберігаються умови прилипання для швидкості:

$$\mathbf{v}|_{\text{стінки}} = 0,$$

а також тепловий потік через футеровку визначається залежно від теплопровідності матеріалу:

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_{\text{фут.}}$$

*Граничні умови для вільної поверхні:*

На вільній поверхні розплаву, що контактує зі шлаком, залежно від в'язкості шлаку, можуть бути прийняті різні варіанти граничних умов для швидкості:

- Повне прилипання шлаку до металу:

$$\mathbf{v}|_{\text{пов.}} = 0.$$

- Часткове прилипання (залежність від в'язкості):

$$\tau_{\text{пов.}} = \eta_{\text{шлаку}} \frac{\partial v}{\partial z},$$

де  $\tau_{\text{пов.}}$  - дотичне напруження на поверхні.

*Зміни в часі:*

Швидкість подачі металу та рівень дзеркала розплаву додаються до моделі як часові залежності:

$$v_{\text{подачі}} = f_1(t), \quad h_{\text{дзеркала}} = f_2(t),$$

де  $f_1(t)$  і  $f_2(t)$  — задані функції, що описують зміну параметрів під час перехідного процесу.

Для моделювання перехідного режиму особлива увага приділяється:

- Аналізу циркуляційних потоків у приймальній секції.
- Впливу змін рівня розплаву на гідродинамічні та теплові процеси.
- Впливу варіантів граничних умов на вільній поверхні на стабільність розподілу температури та складу розплаву.

Ця модель дозволяє врахувати динамічну поведінку системи під час перехідних процесів, зокрема під час перековшовки або змін інших параметрів розливання.

#### 2.4 Спостерігач стану для підвищення точності оцінки рівня металу у проміжному ківші

Спрощена схема початкового перерізу МБЛЗ показана на рисунку 2.8. Для розливання в сталевий ківш подається близько 150 т металу, з якого сталь через шиберний затвор надходить в проміжний ківш (проміжний ківш). Від проміжного ковша через чотири нитки (одна показана на схемі), регульовані шиберними затворами, метал подається в водоохолоджувані форми, де здійснюється початкове формування твердої поверхні заготовок. Подальша кристалізація і охолодження злитка відбувається в зонах водяного і водно-повітряного охолодження МБЛЗ.

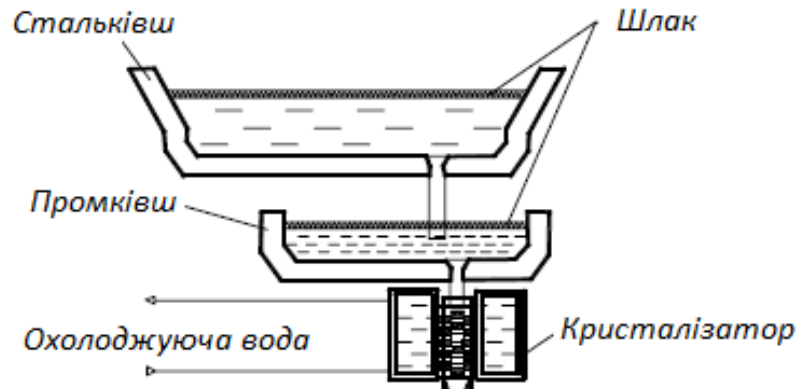


Рисунок 2.8 - Схема послідовної розливки сталі

Для того щоб отримати злиток з однорідною кристалічною структурою, не допускати утворення дефектів в заготовках, необхідно забезпечити високу точність підтримки оптимального рівня металу в прес-формах (допустиме відхилення не перевищує  $\pm 5$  мм). У свою чергу, для забезпечення постійних гідродинамічних режимів дозування металу в форми необхідно стабілізувати рівень металу в проміжному ковші. Підтримання постійного рівня в проміжному ковші при безперервному зниженні рівня в ковші в процесі розливання досягається за рахунок управління клапаном ковша. Варто відзначити, що розсувні ворота функціонують в умовах дуже значних температурних і механічних навантажень. Тому з метою підвищення довговічності воріт слід вживати заходів щодо обмеження частоти та інтенсивності зміни керуючих впливів на привід воріт. Так як саме під час руху шлюзовки зростає небезпека її пошкодження.

На поверхні розплавленого металу в ковші є шар шлаку товщиною 0,22 – 0,25 м, який захищає метал від окислення. Випуск шлаку зі сталевого ковша вкрай небажаний, так як шлак, що потрапив в проміжний ківш, згодом може потрапити в форми, що призводить до дефекту заготовок. У той же час занадто рання зупинка лиття призводить до того, що досить велика кількість якісного металу разом зі шлаком йде на відвал.

Таким чином, при контролі виходу металу зі сталевого ковша необхідно

вирішувати такі завдання:

- підтримувати заданий рівень в проміжному ковші, не допускаючи не виправдано частих і інтенсивних ударів по приводу шибєрних воріт;
- запобігати потраплянню шлаку зі сталєвого ковша в тунець шляхом своєчасного припинення розливання;
- не допускати занадто раннього припинення металєвого лиття.

Останні дві задачі об'єднані назвою «проблеми раннього розпізнавання шлаків».

Для ефективного вирішення всіх перерахованих вище завдань необхідна достовірна і своєчасна інформація про поточні значення рівнів металу в ковші і проміжному ковші. Особливо зростає вимога до точності визначення рівня в ковші на етапі завершення розливання, так як саме в цей час стають актуальними завдання раннього виявлення шлаку.

В даний час оцінка рівнів проводиться, як правило, за вагою. Для цього сталєвий ківш і проміжний ківш розташовуються на вагах, за показаннями яких гиря переводиться в рівень. У той же час на точність оцінки рівнів істотно впливають похибки ваг. На початковому етапі розливання, коли ковші заповнюються металом, похибка зважування становить близько 0,5% від ваги бруто. Однак у міру зниження рівня, а, отже, і ваги металу, похибка зважування зростає. Згідно з [15], залежність відносної похибки  $\delta$  від величини зваженої величини  $X$  описується наступним виразом:

$$\delta = \pm \left[ 0,5 + 10 \cdot \left( \frac{X_{max}}{X} - 1 \right) \right] \quad (2.15)$$

де  $X_{max}$  – межа виміру вагів.

Аналіз експресії (2.15) показав, що величина абсолютної похибки зважування металу в сталєвому ковші зростає з  $\pm 1$  т на початку розливання (коли вага ковша з металом становить близько 200 т) до  $\pm 7$  т в кінці розливання (коли вага ковша зі шлаком і залишками металу становить близько 60 т). Беручи до уваги таку значну похибку і намагаючись уникнути викиду шлаку в проміжний ківш, розливний оператор веде процес «з запасом». Це призводить до того, що

після завершення розливання в ківші залишається близько 7 т металу (0,1 - 0,15 м за рівнем).

Для підвищення точності визначення рівнів металу в ковші і проміжному ковші пропонується використовувати спостерігач нелінійного динамічного стану [16], який буде оцінювати поточні значення рівнів не тільки за результатами зважування, але і з урахуванням математичних моделей гідродинаміки [17] відтоку рідини через отвори для затворів. Це дозволить значно знизити вплив похибок ваг ковша, що підвищить ефективність управління процесом лиття.

Витрата металу  $G_{CK}(t)$  з ковша залежить від площі  $S_I(t)$  вихідного отвору золотника, а також від рівнів  $h_I(t)$  металу і  $h_{ш}$ -шлаку в ковші [16]:

$$G_{CK}(t) = m \cdot S_1(t) \sqrt{2gh_{1E}(t)} \quad (2.16)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрат, що залежить від в'язкості рідкої сталі;  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння;  $h_{1E}(t)$  – рівень металу, еквівалентний за гідростатичним тиском на дно ківша загальному тиску металу й шлаку.

Значення  $h_{1E}(t)$  можна виразити через  $h_I(t)$  й  $h_{ш}$ :

$$h_{1E}(t) = h_I(t) + \frac{\rho_{ш}}{\rho_c} \cdot h_{ш} \quad (2.17)$$

де  $\rho_c$  й  $\rho_{ш}$  - щільність сталі та шлаку відповідно.

Розмір вихідної площі  $S_I(t)$  визначається з положення золотникового клапана, що підлягає вимірюванню.

Зміна рівня металу в ковші описується диференціальним рівнянням 1-го порядку:

$$h'_{1E}(t) = - \frac{G_{CK}(t)}{S_{CK}(h_{1E})} \quad (2.18)$$

де  $S_{CK}(h_{1E})$  – площа горизонтального перетину внутрішньої частини ківша на рівні  $h_{1E}$  (площа дзеркала металу).

Підставивши (2.16) у (2.18) отримаємо:

$$h'_{1E}(t) = - \frac{m \cdot S_1(t)}{S_{CK}(h_{1E})} \cdot \sqrt{2gh_{1E}(t)} \quad (2.19)$$

Рівняння, що описує зміну рівня  $h_2(t)$  в проміжному ковші, виглядає наступним чином:

$$h_2'(t) = \frac{G_{СК}(t) - G_{ПК}(t)}{S_{ПК}(h_2)} = \frac{m \cdot S_1(t) \cdot \sqrt{2gh_{1E}(t)} - G_{ПК}(t)}{S_{ПК}(h_2)} \quad (2.20)$$

де  $G_{ПК}(t)$  – загальна витрата сталі з промківша у 4 кристалізаторі;  $S_{ПК}(h_2)$  – площа дзеркала металу у промківші на рівні  $h_2(t)$ .

Зауважимо, що величина  $G_{ПК}(t)$  може бути виражена через загальну площу чотирьох виходів проміжного ковша. Однак більш точно визначати  $G_{ПК}(t)$  за вимірними значеннями швидкостей витягування злитка з форм з урахуванням того, що рівні металу в прес-формах залишаються постійними.

Перепишімо рівняння для  $h_{1E}(t)$  й  $h_2(t)$  у просторі станів:

$$\begin{aligned} x_1'(t) &= -\frac{m \cdot u_1(t) \cdot \sqrt{2g \cdot h_1(t)}}{S_{СК}(x_1)} \\ h_2'(t) &= \frac{m \cdot u_1(t) \cdot \sqrt{2g \cdot x_1(t)} - u_2(t)}{S_{ПК}(x_2)} \\ x_1(t) &= h_{1E}(t) \\ x_2(t) &= h_2(t) \end{aligned} \quad (2.21)$$

де  $u_1(t)$  – оцінка площі  $S_1(t)$  випускаючого отвору стальківша по вимірному положенню шибери;  $u_2(t)$  – оцінка сумарної витрати сталі з промківша до кристалізатору по вимірним швидкостям витягування зливків.

Перші два рівняння системи (2.21) описують зміну координат стану в часі, а останні 2 описують відношення вихідних сигналів  $h_{1E}$  і  $h_2$  до координат стану.

Спостерігач станів даної системи описується рівняннями, отриманими з рівнянь (2.21) об'єкта:

$$\hat{x}_2'(t) = \frac{m \cdot u_1(t) \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1(t)}}{S_{СК}(x_1)} + k_{11} \cdot Dx_1(t) + k_{12} \cdot Dx_2(t) \quad (2.22)$$

$$\hat{x}_2'(t) = \frac{m \cdot u_1(t) \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1(t)} - u_2(t)}{S_{ПК}(x_2)} + k_{21} \cdot Dx_1(t) + k_{22} \cdot Dx_2(t)$$

де  $x_i(t)$ - оцінки спостерігачем відповідних координат станів;



$Dx_1(t) = h_{1E}(t) - \hat{x}_1(t)$ ,  $Dx_2(t) = h_2(t) - \hat{x}_2(t)$  - овідхилення оцінок спостерігача від вимірних значень рівнів в ковші і проміжному ковші;  $k_{ij}$  - коефіцієнти корекції руху спостерігача за результатами вимірювань.

Від вибору коефіцієнтів корекції  $k_{ij}$  істотно залежить характер зміни у часі помилок спостерігання  $\tilde{x}_i(t) = x_i - \hat{x}(t)$ , а також чутливість оцінок спостерігача к похибкам вимірів рівнів. Невірний вибір  $k_{ij}$  може призвести до нестійкості спостерігача.

Виконаємо лінеаризацію рівнянь системи (2.22) за змінною стану  $\hat{x}_i$  і керуючий вплив  $u_1$ . Для цього визначимо необхідні частинні похідні нелінійних членів лівих частин першого  $F_1$  та другого  $F_2$  рівняння (2.22).

$$\frac{\partial F_1}{\partial \hat{x}_1} = -\frac{m \cdot u_1 \cdot g}{S_{СК} \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1}} = -\frac{G_{СК}}{2S_{СК} \cdot \hat{x}_1} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial u_1} = \frac{m \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1}}{S_{СК}}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial \hat{x}_1} = -\frac{m \cdot u_1 \cdot g}{S_{ПК} \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1}} = -\frac{G_{СК}}{2S_{ПК} \cdot \hat{x}_1} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial u_1} = \frac{m \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1}}{S_{ПК}}$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial u_2} = -\frac{1}{S_{ПК}}$$

Після лінеаризації система рівнянь (2.22) може бути записана у загальноприйнятому для задач спостереження виді:

$$\begin{aligned} \hat{X}'(t) &= A \cdot \hat{X}(t) + B \cdot U(t) + K \cdot DX(t) \\ Y(t) &= C \cdot X(t) + Z(t) \end{aligned} \quad (2.25)$$

де  $X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ,  $\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix}$  вектори станів й оцінок станів відповідно;

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{G_{СК}}{2 \cdot S_{СК} \cdot \hat{x}_1(t)} | \hat{x}_1 = \hat{x}_1^* & 0 \\ \frac{G_{СК}}{2 \cdot S_{ПК} \cdot \hat{x}_1(t)} | \hat{x}_1 = \hat{x}_1^* & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ a_{21} & 0 \end{bmatrix} - \text{матриця руху оцінок станів};$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{m \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1(t)}}{S_{СК}} | \hat{x}_1 = \hat{x}_1^* & 0 \\ \frac{m \cdot \sqrt{2g \cdot \hat{x}_1(t)}}{S_{ПК}} | \hat{x}_1 = \hat{x}_1^* & -\frac{1}{S_{ПК}} \end{bmatrix} - \text{матриця управління;}$$

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} - \text{матриця корекції; } C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \text{матриця складу вимірів;}$$

$$Y(t) = \begin{bmatrix} h_{1E}(t) \\ h_2(t) \end{bmatrix}, Z(t) = \begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} - \text{вектори вимірів й похибок вимірів рівнів}$$

відповідно;  $\Delta X(t) = Y(t) - \hat{X}(t)$  - вектор відхилень оцінок координат стану від вимірних значень;  $\hat{x}_1^*$  - значення  $h_{1E}$  у базовій точці.

Для того щоб процедура спостереження збіглася, необхідно і достатньо вибрати матрицю  $K$  так, щоб для будь-якої  $h_{1E}$  власні значення матриці  $A - K \cdot C$  розташовувалися в лівій напівплощині комплексної площини. Запишемо характеристичне рівняння для системи (2.25):

$$\det(A - K \cdot C - L \cdot I) = 0$$

$$\begin{vmatrix} a_{11} - k_{11} - L & -k_{12} \\ a_{21} - k_{21} & -k_{22} - L \end{vmatrix} \quad (2.26)$$

$$L^2 + L(k_{22} + k_{11} - a_{11}) + k_{11}k_{22} - a_{11}k_{22} + a_{21}k_{12} - k_{12}k_{21} = 0$$

Зауважимо, що для будь-яких дійсних значень  $h_{1E}$  значення  $a_{11}$  строго негативне. Вибирати  $k_{12} = k_{21} = 0$ . Тоді для будь-яких позитивних  $k_{11}$  і  $k_{22}$  рівняння (2.26) має «ліві» корені, оскільки коефіцієнти для всіх степенів  $\lambda$  рівняння 2-го порядку позитивні:

$$L_{1,2} = \frac{-(k_{22} + k_{11} - a_{11})}{2} \pm \frac{\sqrt{(k_{22} + k_{11} - a_{11})^2 - 4k_{22}(k_{11} - a_{11})}}{2} \quad (2.27)$$

$$= \frac{-(k_{22} + k_{11} - a_{11}) \pm (k_{22} - k_{11} + a_{11})}{2}$$

$$L_1 = -(k_{11} - a_{11}); L_2 = -(k_{22} - a_{11})$$

При остаточному підборі коефіцієнтів  $k_{11}$  і  $k_{22}$  матриці корекції необхідно враховувати наступне:

- чим вище обрані значення  $k_{11}$  і  $k_{22}$ , тим швидше в спостерігачі

відбувається перехідний процес, викликаний помилковим визначенням рівнів в відрах в початковий момент часу;

- У міру виконання лиття значення  $x_1(t)$  монотонно зменшується, що, згідно з (2.23), призводить до зниження  $a_{11}$  і, відповідно, до прискорення перехідних процесів у спостерігача;

- чим вище вибрані значення  $k_{11}$  і  $k_{22}$ , тим сильніше вплив похибок при вимірюванні  $z(t)$  на результат спостереження (див. 2.25).

У зв'язку з цим в процесі спостереження, у міру зниження  $h_{1E}$ , доцільно знижувати коефіцієнти  $k_{11}$  і  $k_{22}$ .

Імітаційне моделювання процесу лиття металу виконується в середовищі Matlab за такими параметрами:

$$S_{CK} = const = 8,45 \text{ м}^2; S_{ПК} = const = 5,5 \text{ м}^2$$

$$u_2(t) = G_{ПК}(t) = const = 0,2592 \text{ м}^3/\text{хв}$$

$$h_{1E}(0) = 2,4 \text{ м}, \quad \hat{x}_1(0) = 2,43 \text{ м}$$

$$h_2(0) = 0,7 \text{ м}, \quad \hat{x}_2(0) = 0,67 \text{ м}$$

$$\mu = 0,6; k_{11}(t) = k_{22}(t) = 0,6 \cdot e^{-0,08t}$$

Площа отвору  $u_1(t)$  шиберної затвора ковша була змінена регулятором, який стабілізував металевий рівень в проміжному ковші. Похибки (в метрах) у визначенні рівнів у ковші  $\eta_1(t)$  та проміжному ковші  $\eta_2(t)$  за ваговим методом моделювали випадковими послідовностями з нормальними законами розподілу та середніми нульовими значеннями.

Автокореляційна функція похибки вимірювання рівня ковша описувалася експоненціальною функцією

$$K_{33\ 2}(t) = 0,00012 \cdot e^{-|t|}$$

де  $t$  – час у звилинах, 0,00012 – дисперсія процесу. Для процесу  $\eta_1(t)$  автокореляційна функція мала вид:

$$K_{33\ 1}(t) = 0,00018 \cdot K_3^2(t) \cdot e^{-|t|}$$

де  $K(t)$  з - коефіцієнт, який відіграє збільшення похибки ваговим методом до закінчення розливу. Графік зміни  $Kz(t)$  у часі наведено на рисунку 2.9

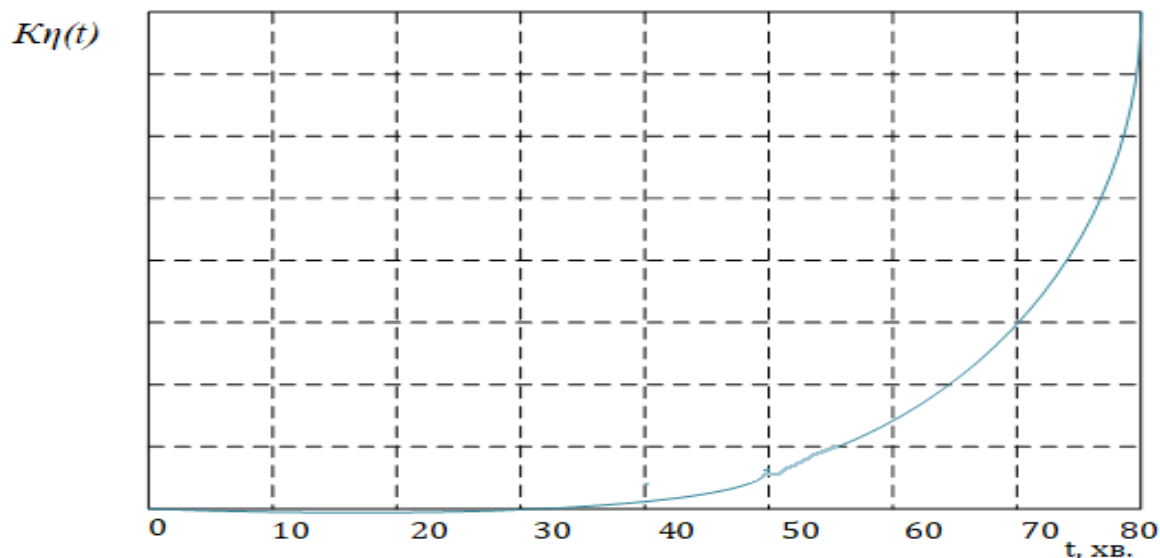


Рисунок 2.9 - Графік росту  $Kz$  у процесі розливи сталі

Моделювання проводилося з метою порівняння похибок при оцінці рівнів, виконувалося двома способами:

- тільки за ваговим методом;
- Використання спостерігача за статусом для корекції даних контролю ваги.

Графіки зміни в часі абсолютних значень похибок  $\delta(t)$  у визначенні рівнів в ковші і проміжному ковші, отриманих в результаті моделювання, наведені на рисунках 2.10 і 2.11 відповідно.

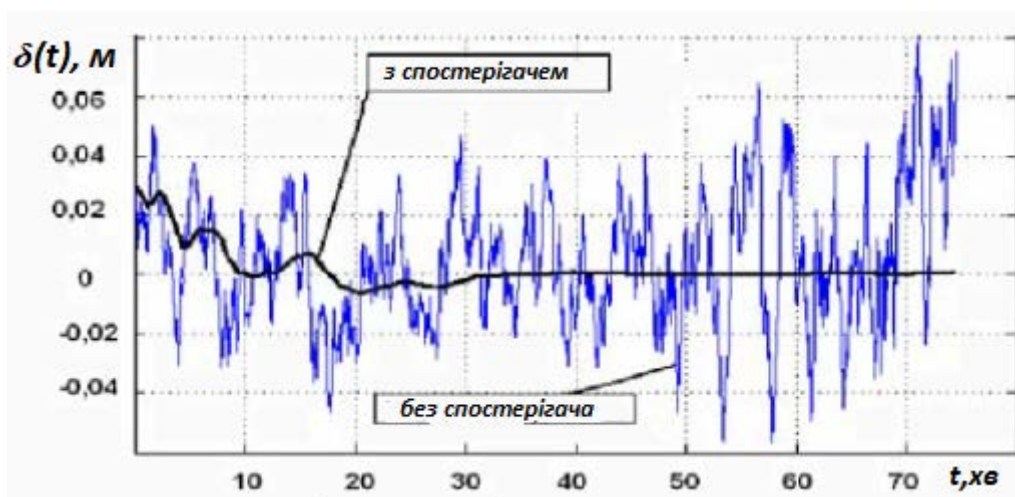


Рисунок 2.10 - Графіки помилок визначення рівня у сталюковші двома способами

Застосування нелінійного спостерігача, побудованого на основі гідродинамічної моделі відтоку рідкої сталі через заслінковий отвір затвору, дозволяє значно підвищити точність оцінки рівнів у стальківші і проміжному ківші протягом всього періоду розливання металу.

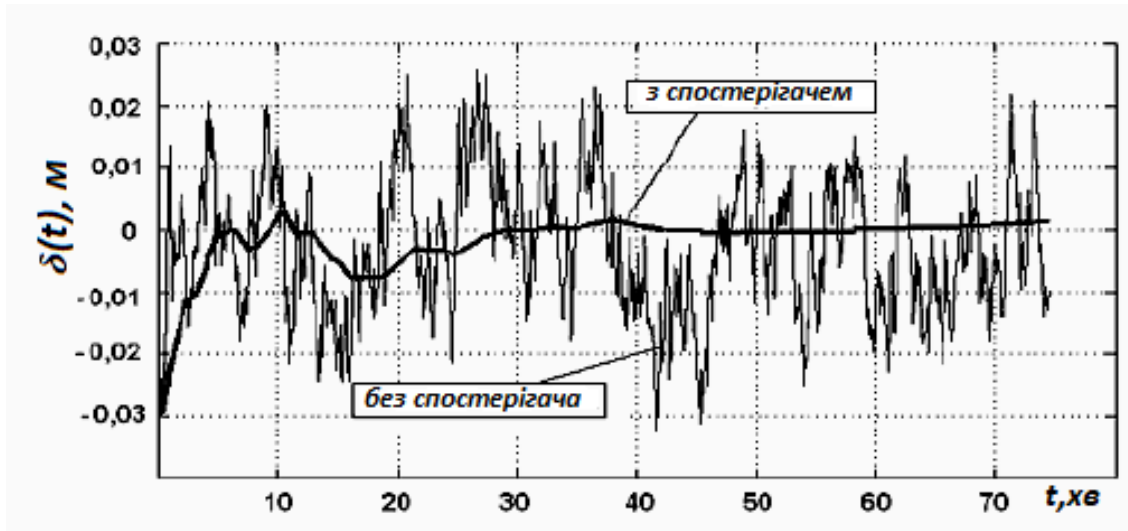


Рисунок 2.11 - Графіки помилок визначення рівня у промковші двома способами

Вплив спостерігача особливо ефективно на завершальному етапі розливання, коли це вкрай важливо для раннього розпізнавання шлаку.

А більш точне знання рівнів дозволить:

- Знизити втрати металу зі шлаком за рахунок його раннього розпізнавання;
- Збільшити термін служби ковшового шиберного шибера за рахунок зниження інтенсивності керуючих впливів;
- Підвищити точність стабілізації рівня в проміжному ківші.

## 2.5 Розробка модельно-прогнозуючого регулятора рівня сталі у проміжному ківші

Для розробки прогнозуючого регулятора рівня сталі скористуємось моделлю об'єкту, яку ми отримали раніше (рис. 2.4), яку можна представити у більш зручному вигляді для спрощення сприйняття (див. рис. 2.12)

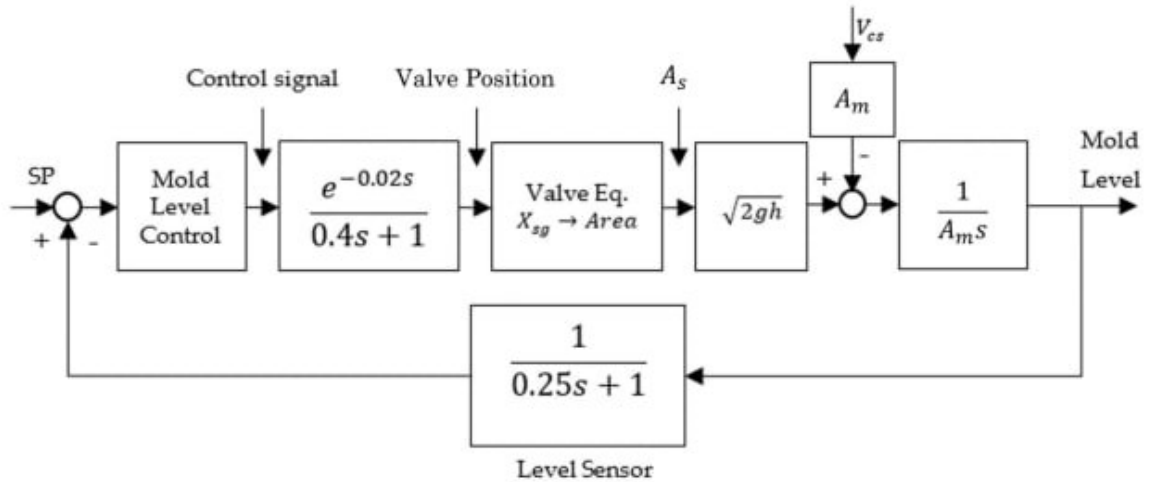


Рисунок 2.12 – Структура моделі об'єкта керування

Повторююча структура, яку ми використовуємо (рис. 2.13), також була застосована іншими дослідниками [26,27] для комбінування регулятора GPC у прямому контурі та повторюваного GPC (R-GPC) з N-періодичною внутрішньою моделлю у зворотному зв'язку. Відстеження опорного сигналу забезпечується регулятором GPC, який генерує керуючий сигнал  $u_m(k)$  для процесу та моделі. Вихідний сигнал моделі  $l_m(k)$  подається назад до регулятора GPC, щоб виявляти зміни опорного сигналу  $w(k)$ , створюючи помилку, яка вводиться в регулятор GPC.

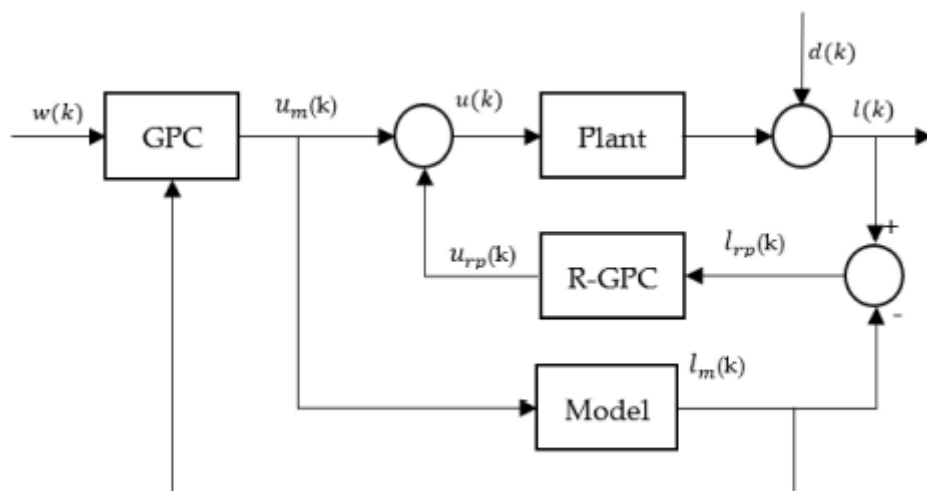


Рисунок 2.13 - Блок-схема повторюваної структури, використаної в контурі регулювання рівня

Збурення періодичного сигналу або помилка моделювання обробляються регулятором R-GPC через сигнал  $l_{rp}(k)$ , який визначається як  $l_{rp}(k)=l(k)-l_m(k)$ . Якщо немає збурюючого сигналу  $d(k)$  або помилки моделювання, тоді  $l_{rp}(k)=0$ , і замкнена система керування працює лише з регулятором GPC. Якщо  $l_{rp}(k)$  відмінний від нуля, регулятор R-GPC починає діяти в контурі керування, щоб підтримувати  $l_{rp}(k)$ , рівний або близький до нуля, зменшуючи небажані збурення та помилки моделювання. Керуючий сигнал, що подається на процес, визначається як  $u(k)=u_m(k)+u_{rp}(k)$ .

### 2.5.1 Розрахунок регулятора GPC

Регулятор GPC потребує модель CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average), яка задається рівнянням:

$$A(z^{-1})l_m(k) = z^{-d}B(z^{-1})u_m(k-1) + \frac{e(k)}{\Delta} \quad (2.28)$$

де  $\Delta = (1 - z^{-1})$  - оператор різниці, що відповідає інтегруванню у часовій області;  $A(z^{-1}), B(z^{-1})$  - поліноми відповідно порядків  $n_a$  і  $n_b$ , які описують динамічні властивості системи;  $e(k)$  - білий шум із нульовим середнім значенням

Регулятор GPC визначає закон керування, мінімізуючи наступну цільову функцію:

$$J_{GPC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta [l_m(k+j|k) - w(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda [\Delta u_m(k+j-1)]^2 \quad (2.29)$$

де:  $\delta$  та  $\lambda$  - вагові коефіцієнти для помилки та керуючих сигналів відповідно;  $N_1$  та  $N_2$  - мінімальний та максимальний горизонти прогнозування виходу;  $N_u$  - горизонт керування;  $l_m(k+j)$  - прогноз рівня  $j$ -кроків наперед, розрахований на момент часу  $k$ ;  $w(k+j)$  - опорний сигнал, заданий на  $j$ -кроків наперед;  $\Delta u_m(k)=u_m(k)-u_m(k-1)$  - зміна (варіація) керуючого сигналу, що використовується для розрахунку керуючої дії;  $u_m(k)$  - керуюча дія, яка застосовується до об'єкта регулювання.

Цільова функція  $J_{GPC}$  забезпечує компроміс між точністю відстеження опорного сигналу та обмеженням зміни керуючого сигналу, що робить систему стабільною та ефективною. Блок-схему цього процесу можна переглянути на рисунку 2.14.

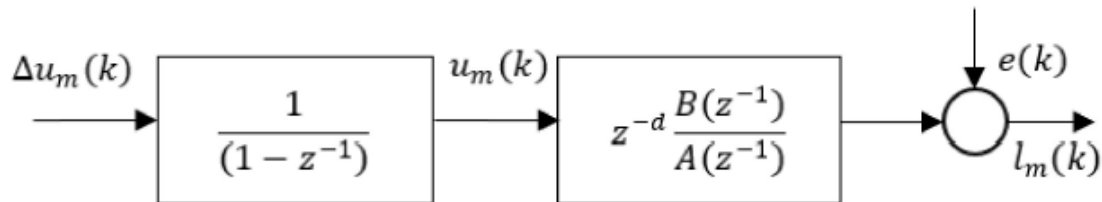


Рисунок 2.14 - Інкрементна модель у серії з процесом

Мінімізація без обмежень  $J_{GPC}$  відносно  $\Delta u_m(k)$ , як показано в [28], описується рівнянням:

$$\Delta u_m(k) = K_{GPC}(w - f) \quad (2.30)$$

де:  $K_{GPC}$  - підсилення GPC-регулятора, що залежить від параметрів CARIMA-моделі;  $w$  - опорний сигнал, який система намагається відстежувати;  $f$  - вільна відповідь системи, що є прогнозом виходу системи за відсутності нової керуючої дії.

Застосований керуючий сигнал  $u_m(k)$  розраховується як сума попереднього значення керуючого сигналу  $u_m(k-1)$  і його зміни  $\Delta u_m(k)$ :

$$u_m(k) = \Delta u_m(k) + u_m(k-1)$$

Таким чином, GPC-регулятор комбінує інкрементальне керування з прогнозуванням для досягнення точної відповіді системи на зміни опорного сигналу.

### 2.5.2 Повторюваний предиктивний регулятор R-GPC

Повторюваний регулятор (RC) використовує принцип внутрішньої моделі та слідує внутрішній моделі генератора періодичних сигналів [29]. Цей принцип стверджує, що якщо певний сигнал необхідно відстежувати або придушувати без



похибки у сталому режимі, генератор цього сигналу має бути всередині регулятора або в самому об'єкті [30].

Періодичний сигнал  $r(t)$  з періодом  $T_p$  може бути представлений у вигляді ряду Фур'є [30], як показано у рівнянні (2.31).

$$r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n e^{-j\frac{2\pi n t}{T_p}} \quad (2.31)$$

а його передаточна функція в термінах перетворення Лапласа виглядає так:

$$R(s) = \frac{1}{s} \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{2\pi n}{T_p}\right)^2}{s^2 + \left(\frac{2\pi n}{T_p}\right)^2} = \frac{T_p e^{-\frac{sT_p}{2}}}{1 - e^{-sT_p}} \quad (2.32)$$

Терм  $T_p \cdot e^{-\frac{sT_p}{2}}$  є затримкою з коефіцієнтом підсилення  $T_p$ ; отже, достатньо включити  $\frac{1}{1 - e^{-sT_p}}$  в контур керування для відтворення періодичного сигналу. Таким чином, рівняння (2.32) можна вважати позитивним зворотним зв'язком із затримкою, як показано на рисунку 2.15.

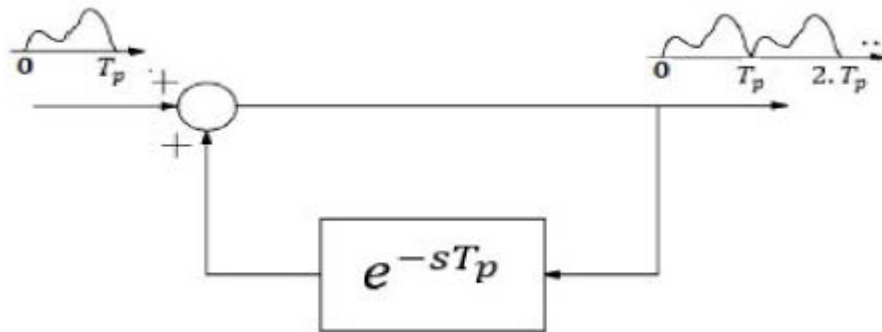


Рисунок 2.15 - Закон керування повторюваного регулятора (RC)

Z-перетворення чистої затримки  $e^{-sT}$  дорівнює  $z^{-N}$ , де  $N$  - ціле кратне періоду дискретизації  $T_s$ , таке що  $N = T_p/T_s$ ,  $N \in \mathbb{Z}_+^*$ . Таким чином, дискретна внутрішня модель представляється як:

$$I_M(z) = \frac{1}{1 - z^{-N}} \quad (2.33)$$

$I_M(z)$  доповнює систему всіма полюсами, необхідними для відтворення бажаних періодичних сигналів, і повинна бути обрана з урахуванням  $T_p=N \cdot T_s$  [31]. Як повторюваний регулятор (RC),  $N$ -періодична внутрішня модель (2.33) використовується в R-GPC, тому її необхідно вставити послідовно з моделлю CARIMA (2.28), в результаті чого отримуємо:

$$A(z^{-1})l_{rp}(k) = z^{-d}B(z^{-1})u_{rp}(k-1) + \frac{e(k)}{\Delta^N} \quad (2.34)$$

де  $\Delta^N = 1 - Z^{-N}$ . Повторювана  $N$ -періодична внутрішня модель у серії з об'єктом регулювання рівня кристалізатора показана на рисунку 2.16.

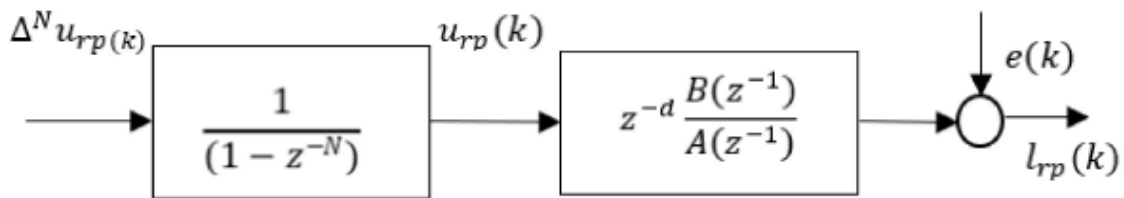


Рисунок 2.16 - Повторювана  $N$ -періодична внутрішня модель у серії з процесом

Закон керування R-GPC визначається шляхом мінімізації цільової функції, наведеної у рівнянні:

$$J_{RGPC}(k) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta [l_{rp}(k+j|k)]^2 + \sum_{j=1}^{N_{urp}} \lambda_{rp} [\Delta^N u_{rp}(k+j-1)]^2 \quad (2.35)$$

Повторювана внутрішня модель у своїй чистій формі, задана рівнянням (2.32), має нескінченне підсилення на гармонійних частотах періодичного сигналу. Це робить замкнену систему дуже чутливою до вимірювального шуму та помилок моделювання, оскільки ці елементи зазвичай впливають на високочастотні складові. Тому необхідно додати фільтр, який компенсує цю проблему. Таким чином,  $\Delta^N$  змінюється на:  $\Delta^{Nf} = 1 - H(z) Z^{-N}$ , де у цій роботі фільтр низьких частот (FIR-фільтр)  $H(z)$  задається рівнянням:

$$H(z) = q_1 z + q_0 + q_1 z^{-1} \quad (2.36)$$

де  $0 < q_0 < 1$ ,  $q_1 = \frac{1-q_0}{2}$

Фільтр, наведений у рівнянні (2.36), має нульову фазу та одиничне підсилення для послаблення гармонік на високих частотах без зміщення їхньої фази [30]. Це є ефективною властивістю для систем із повторюваним контуром, оскільки використання фільтра, що змінює фазу системи, призведе до зсуву гармонік і, відповідно, порушить здатність навчання та відтворення періодичного сигналу.

Щоб визначити внутрішню модель з фільтром у системі, модель CARIMA знову модифікується наступним чином:

$$A(z^{-1})l_{rp}(k) = z^{-d}B(z^{-1})u_{rp}(k-1) + \frac{e(k)}{\Delta^{N_f}} \quad (2.37)$$

Таким чином, закон керування R-GPC з фільтром визначається шляхом мінімізації цільової функції (2.35), де  $\Delta$  замінено на  $\Delta^{N_f}$ , як показано у рівнянні:

$$J_{RGPC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta [l_{rp}(k+j|k)]^2 + \sum_{j=1}^{N_{urp}} \lambda_{rp} [\Delta^{N_f} u_{rp}(k+j-1)]^2 \quad (2.38)$$

Таким чином, задача оптимізації в присутності обмежень визначається шляхом розв'язання наступної математичної проблеми:

$$\min_{\Delta^{N_f} u_{rp}} J_{RGPC} \text{ sa } A_{ineq} \Delta^{N_f} u_{rp} \leq b_{ineq} \quad (2.39)$$

де

$$A_{ineq} = \begin{bmatrix} I \\ -I \\ S_0 \\ -S_0 \\ G \\ -G \end{bmatrix}_{(4N_u+2N_2) \times N_u}$$

і

$$b_{ineq} = \begin{bmatrix} u_{max} - u_{rp}(k - N) \\ -u_{min} + u_{rp}(k - N) \\ I_{max} + c_0 \Delta^N u_{rp}(k - 1) - \Delta u_{rp}(k - N) \\ I_{min} - c_0 \Delta^N u_{rp}(k - 1) + \Delta u_{rp}(k - N) \\ y_{max} - f \\ -y_{min} + f \end{bmatrix}_{(4N_u + 2N_2) \times 1}$$

Застосований керуючий сигнал задається як:  $u_{rp}(k) = \Delta^N u_{rp}(k) + u_{rp}(k-1)$ .

Як показано на рисунку 2.16, керуюча дія, що подається на процес, визначається за формулою:

$$u(k) = u_m(k) + u_{rp}(k)$$

де:  $u_m(k)$  - дія, що відповідає за відстеження опорного сигналу;  $u_{rp}(k)$  - дія, що відповідає за пригнічення збурень.

Така форма реалізації уникає взаємного впливу між інкрементальною та повторюваною моделями. Це дозволяє структурі керування отримувати різні динамічні характеристики для відстеження опорних сигналів і придушення збурень.

#### 2.5.4 Генетичний алгоритм (GA)

Хороша продуктивність R-GPC регулятора досягається лише тоді, коли параметри налаштування, такі як: горизонт прогнозування ( $N_2$ ), горизонт керування ( $N_u$ ), вага помилки прогнозування ( $\delta$ ), коефіцієнт придушення ( $\lambda$ ), константа опорної траєкторії ( $\alpha$ ), коефіцієнт придушення періодичного сигналу ( $\lambda_{rp}$ ) правильно визначені розробником.

Зазвичай налаштування виконується евристично, методом спроб і помилок, що є прийнятним для стабільних процесів у відкритому контурі. Проте для процесів, які є нестабільними у відкритому контурі, цей метод є складним та може призвести до:

- нестабільної відповіді у замкненому контурі,
- або недостатньої продуктивності регулятора.

Відомі на сьогодні методики налаштування у науковій літературі не включають параметр  $\lambda_{rp}$ . Тому для налаштування повторюваної структури буде використано генетичний алгоритм (GA).

$$[N_u, N_2, \alpha, \delta, \lambda, \lambda_{rp}] \quad (2.40)$$

Потім кожен індивід застосовується в симуляції у межах алгоритму повторюваної структури для керування процесом і обчислення функції пристосованості для кожного індивіда в початковій популяції. За допомогою функції пристосованості, наведеної у рівнянні (2.41), індивіди класифікуються у спадному порядку - від найкращого до найгіршого.

$$Fit(N_u, N_2, \alpha, \delta, \lambda, \lambda_{rp}) = \frac{1}{\sum(1-w)^2} \quad (2.41)$$

де  $l$  - вихід процесу, а  $w$  - опорний сигнал.

Далі генетичний алгоритм (GA) відбирає найкращих індивідів за допомогою методу рулетки, де, використовуючи рівняння (2.41), визначається частка, яку кожен індивід матиме у рулетці. Для відбору індивідів виконується  $(M-l)$  прокручувань рулетки. Паралельно з відбором за методом рулетки застосовується техніка елітизму, при якій найкращий індивід кожного покоління копіюється безпосередньо до наступного покоління. Після процесу відбору виконуються генетичні операції (схрещування та мутація), у результаті яких будуть згенеровані нові індивіди для формування популяції наступного покоління.

#### 2.5.4 Отримання лінійної моделі CARIMA

Модель CARIMA була визначена на основі ідентифікації математичної моделі, описаної в розділі 2.2, з урахуванням наступних експлуатаційних умов:

- Максимальна варіація відкриття затвора становить 70 мм.
- Висота проміжного ковша дорівнює  $h=1200$  мм.
- Робоча позиція затвора  $X_{sg}=35$  мм, коли швидкість лиття становить 1.2 м/хв.

– Час дискретизації, використаний у симуляції, дорівнював 0.12 с.

На рисунку 2.17 показано набір вхідних та вихідних даних, що використовувалися для ідентифікації моделі рівня. Дані були розділені на два піднабори: навчальні дані й дані для валідації.

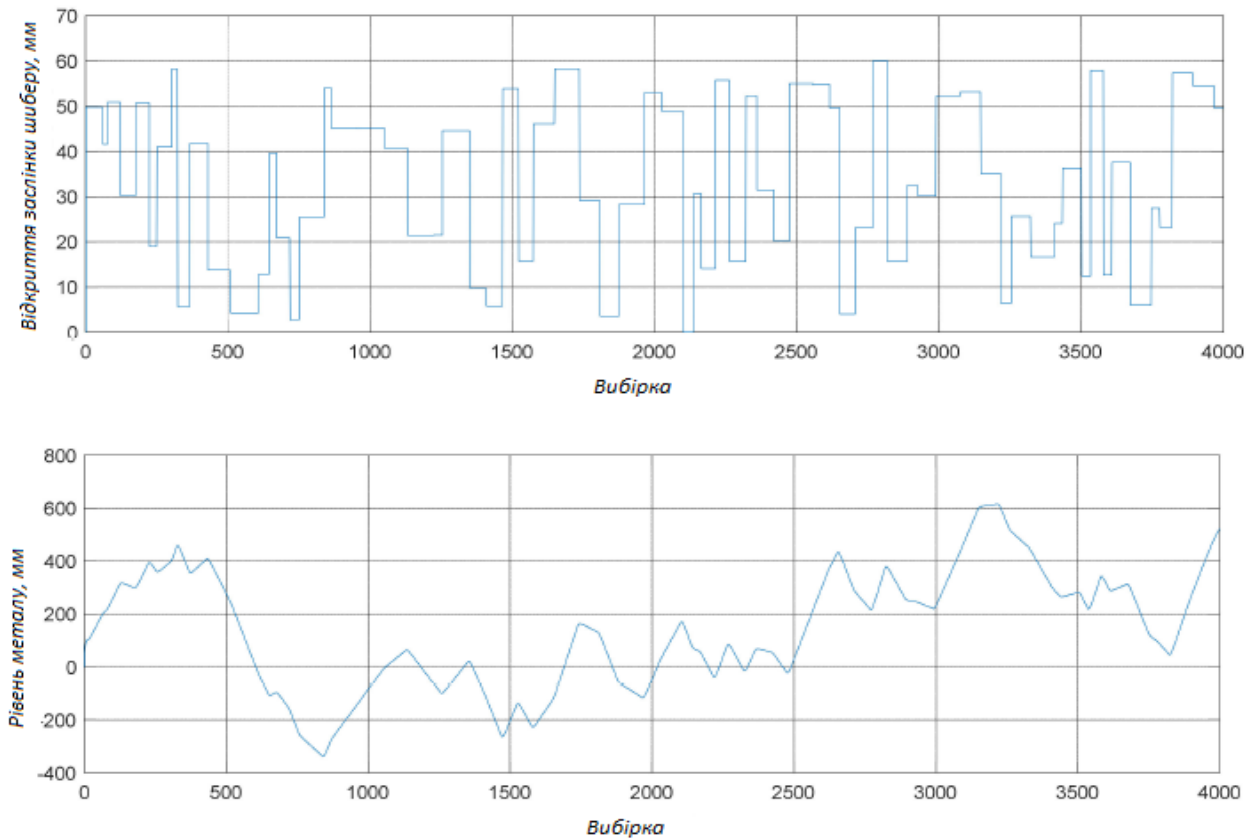


Рисунок 2.17 - Вхідні та вихідні дані, використані для ідентифікації моделі

Застосовуючи ці дані у Identification Toolbox of MATLAB і використовуючи метод найменших квадратів, було згенеровано багато моделей CARIMA з різними порядками, що представляють лінійну модель. Після цього для вибору найкращої моделі використовувалися критерій інформації Akaike's (AIC) і остаточний критерій прогнозування (FPE) [32].

Вибрана модель має порядки:  $n_a=2$ ,  $n_b=0$ ,  $d=0$ .

Модель задається наступним дискретним рівнянням:

$$l(t) = 1.822 l(t - 1) - 0.822 l(t - 2) + 0.01924 u(t - 1) \quad (2.42)$$

Порівняння прогнозу, зробленого ідентифікованою моделлю на 20 кроків наперед, із симуляцією процесу рівня, визначеного в пункті 2.3, показало точність 97.9%.

Таким чином, можна зробити висновок, що модель є достатньою для представлення процесу рівня кристалізатора та його використання в симуляціях.

## 2.5.6 Результати моделювання

### Порівняння між GPC і повторюваною структурою

Проведено порівняння ефективності використання контролера GPC та повторюваної структури у випадках, коли процес зазнає періодичних збурень.

Відгук можна побачити на рисунку 2.18. Налаштовані параметри для кожного контролера наведено нижче:

- GPC:  $N_u = 5$ ,  $N_2 = 5$ ,  $a = 0,92$ ,  $d = 270,95$ ,  $l = 420,66$
- Повторювана структура:  $N_u = 8$ ,  $N_2 = 9$ ,  $a = 0,98$ ,  $d = 712,69$ ,  
 $l = 297,35$ ,  $l_{rp} = 62,04$

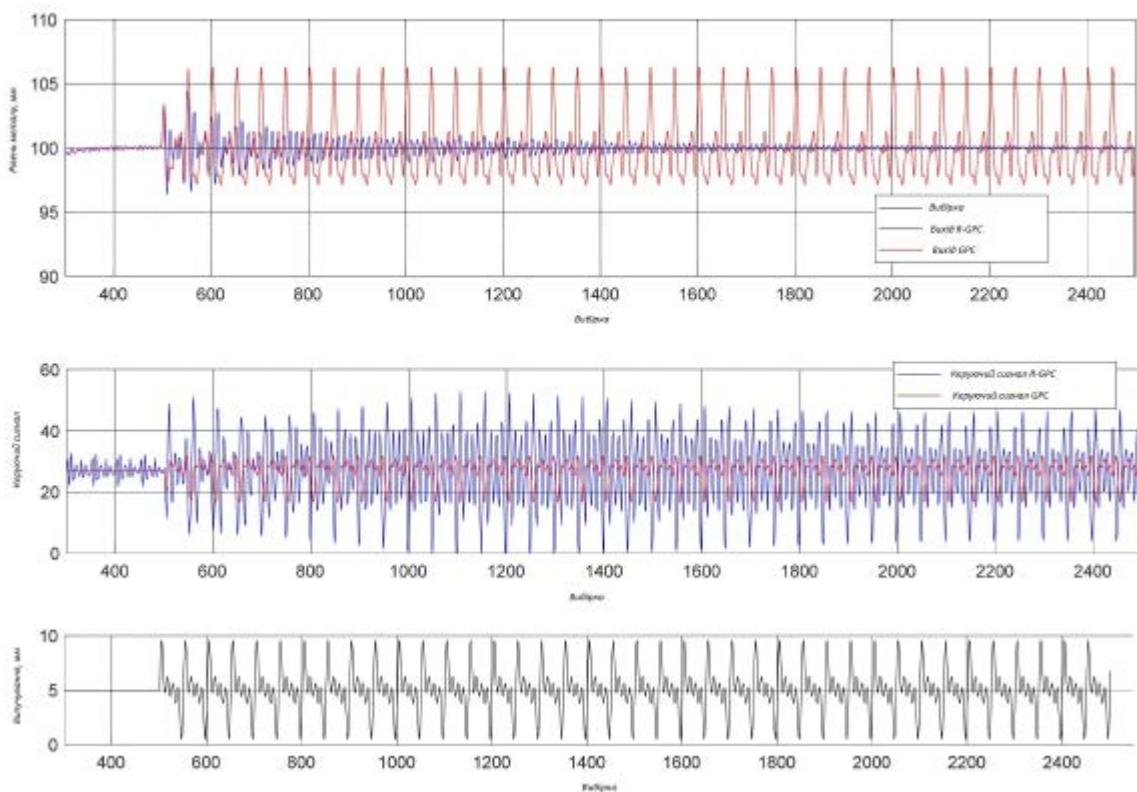


Рисунок 2.18 - Відгук GPC (червоний) та повторюваної структури (синій)

Аналізуючи отримані графіки можна зробити такі висновки: контролер GPC був недостатньо ефективним для усунення збурення від випучування; коливання рівня металу у формі навколо заданого значення (100 мм) становили від 97 мм до 107 мм з максимальною амплітудою 10 мм, що було в межах амплітуди збурення. Отже, GPC не зміг зменшити збурення, що спричинило коливання рівня металу у формі.

При використанні повторюваної структури ці коливання становили від 99,95 мм до 100,1 мм з максимальною амплітудою 0,15 мм, що значно менше в порівнянні з максимальною амплітудою збурення. Таким чином, повторювана структура змогла зменшити збурення приблизно на 98,5%. Це стало можливим завдяки тому, що контролер R-GPC здатний усувати періодичні збурення. Через ці результати всі подальші тести будуть проводитися виключно із використанням повторюваної структури.

Помітно, що керуючий сигнал, представлений повторюваною структурою, демонструє менші коливання, оскільки він включає усунення збурень, чого не відбувається з GPC. Графік випучування представляє збурення від випучування. Основна частота збурення випучування становила 0,167 Гц і мала чотири гармоніки. Збурення було застосоване, починаючи з 500-ї вибірки.

#### Порівняння повторюваної структури з фільтром та без нього

Порівняємо продуктивність повторюваної структури, представленої на рис. 2.12, із фільтром та без нього для процесів зі збуреннями від випучування, забивання/прочищення, а також із варіаціями швидкості лиття.

Параметри повторюваної структури з фільтром були такими ж, як зазначено в попередньому дослідженні. Параметри для повторюваної структури без фільтра:  $N_u = 5$ ,  $N_2 = 9$ ,  $a = 0,93$ ,  $d = 944,79$ ,  $l = 167,17$ ,  $l_{rp} = 106,22$ .

Налаштування, виконане для частоти випучування  $0,167\text{Гц}$  із часом дискретизації  $0,12\text{с}$  і, відповідно, з  $N = 50$  вибірками. Таким чином, внутрішня модель R-GPC без фільтра задається як:



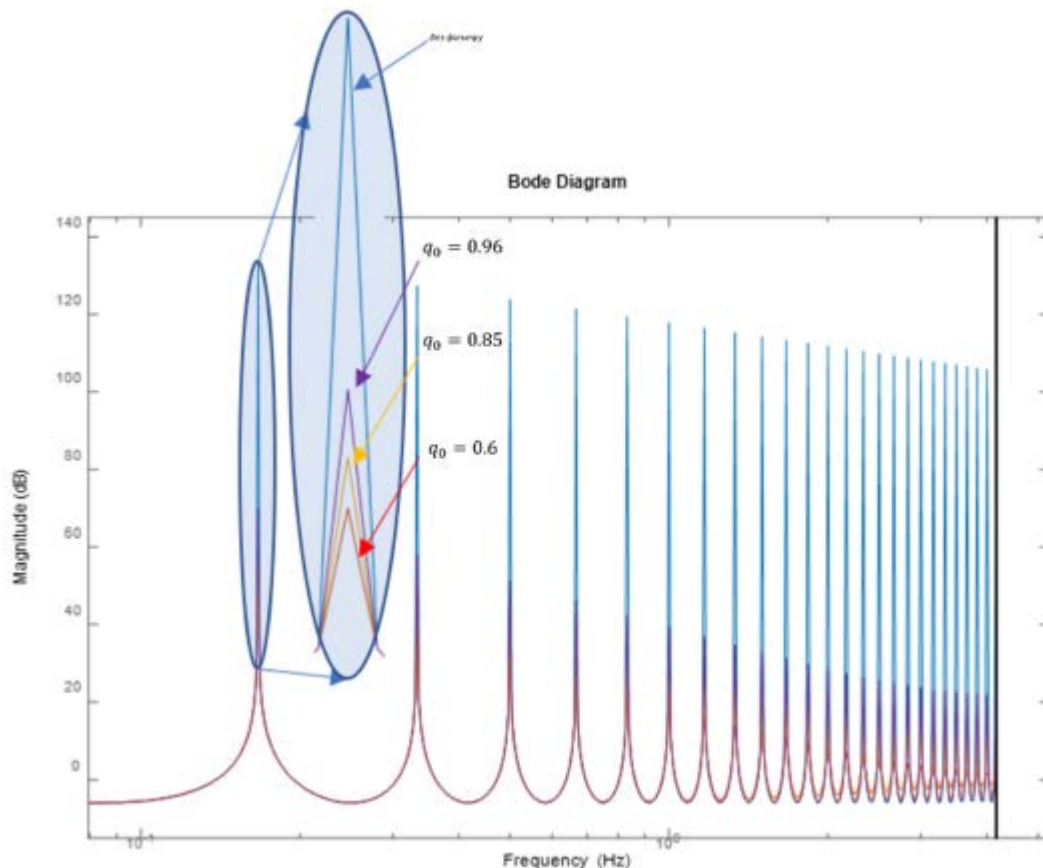
$$IM(z) = \frac{1}{1 - z^{-50}},$$

а для R-GPC із фільтром:

$$IM_f(z) = \frac{1}{1 - 0.075z^{-49} - 0.85z^{-50} - 0.075z^{-51}},$$

де  $q_0=0.85$  і  $q_1=0.075$ , відповідно до (2.36). Ці ж параметри будуть використовуватися для всіх симуляцій контролю рівня металу у формі зі збуреннями.

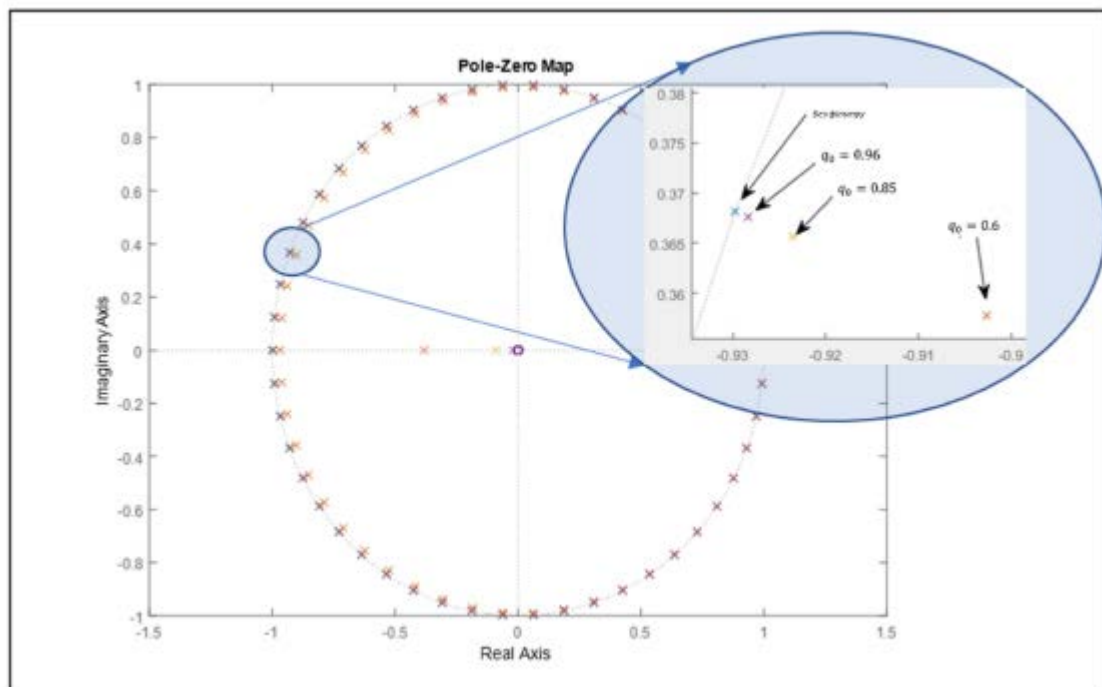
Вибір фільтра був зроблений методом проб і помилок. Спочатку було використано невелике значення  $q_0$  ( $q_0=0.6$ ), яке поступово збільшувалося. Остаточне значення  $q_0$  було визначено з урахуванням послаблення гармонік та зміщення полюсів для забезпечення стабільності, як показано на рисунках 2.19 і 2.20.



червоний, жовтий, фіолетовий: із фільтром; синій: без фільтра

Рисунок 2.19 - Діаграма Бодє внутрішніх моделей

Проте додавання фільтра змінює внутрішню модель, оскільки при зменшенні  $q_0$  посилюється послаблення гармонік, що змінює внутрішню модель. Хоча система стає більш стабільною, здатність точно відтворювати сигнал, який необхідно усунути, знижується, що залежить від значення фільтра. На рисунку 2.19 можна побачити діаграму Бode внутрішньої моделі без фільтра та з налаштованим фільтром; видно, що коефіцієнти посилення гармонік у моделі без фільтра вищі, ніж у моделі з фільтром.



із фільтром (червоний, жовтий, фіолетовий) та без фільтра (синій)

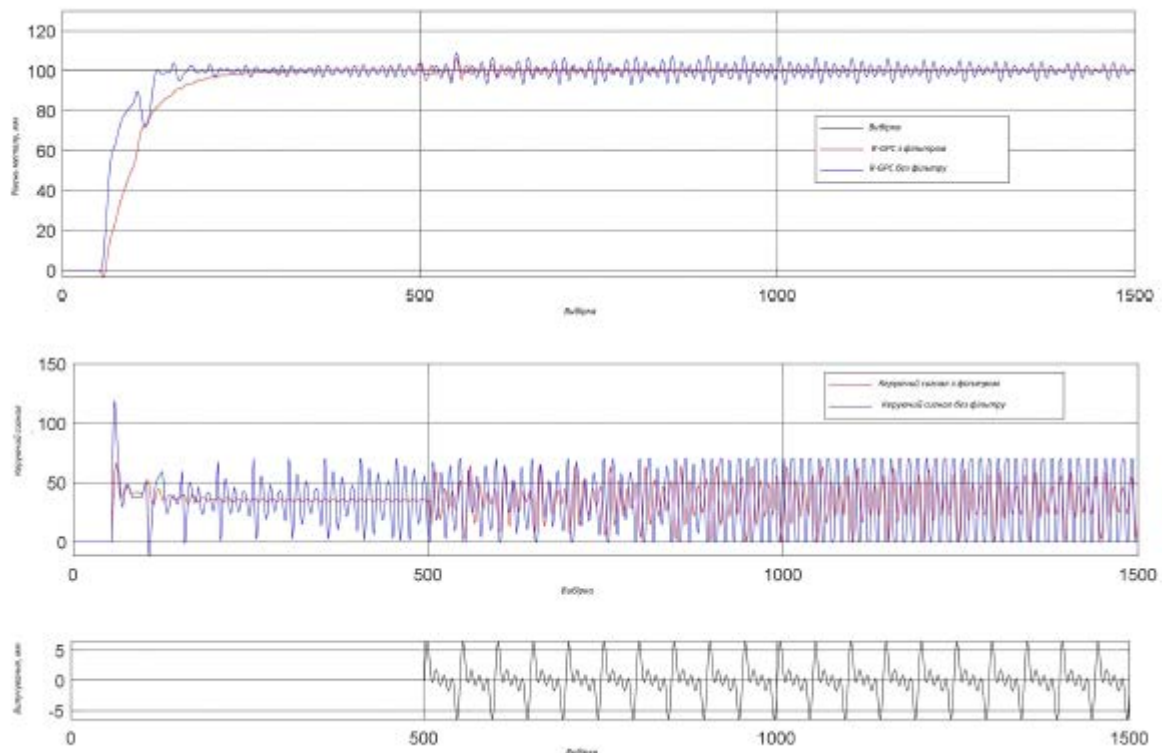
Рисунок 2.20 - Діаграма полюсів із нулями внутрішньої моделі

Звертаючись до розташування полюсів на рисунку 2.20, стає очевидно, що модель без фільтра має полюси, розташовані на одиничному колі, тоді як у моделі з фільтром полюси дещо зміщені до центру одиничного кола. Таким чином, зміщення моделі з фільтром сприяє підвищенню стабільності та стійкості.

### Симуляція процесу зі збуренням від випучування

Збурення від випучування було застосовано у нашому тесті, починаючи з 500-ї вибірки. На рисунку 2.21 показано, що зменшення амплітуди випучування за допомогою повторюваної структури з фільтром становило приблизно 98,5%,

як зазначено в п.2.5.3. Проте повторювана структура без фільтра показала коливання від 95,46 мм до 102,9 мм, що означає варіацію 7,44 мм, або зменшення на 25,6% порівняно з амплітудою збурення випучування в 10 мм. Невелике зменшення при використанні структури без фільтра відбулося через те, що її керуючий сигнал був обмежений контролером, щоб не перевищити обмеження процесу.



із фільтром (червоний) та без фільтра (синій)

Рисунок 2.21 - Порівняння повторюваних структур за наявності збурення від випучування

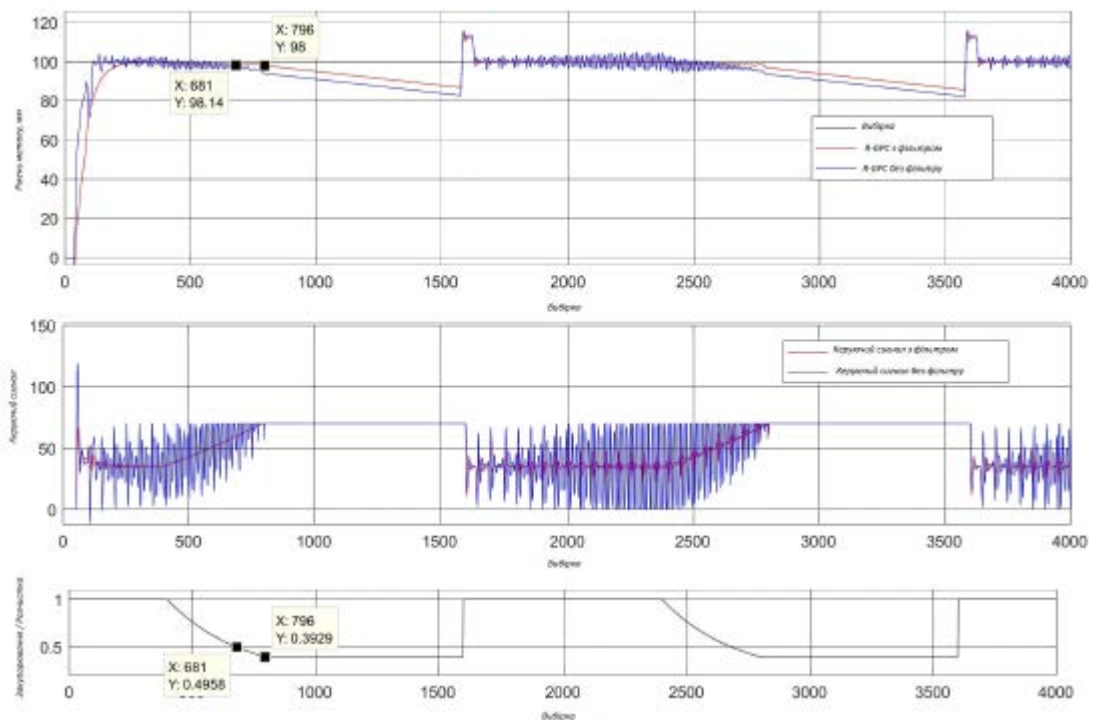
Керуючий сигнал, представлений на рис. 2.21 для повторюваної структури з фільтром, був більш плавним у порівнянні з повторюваною структурою без фільтра, що безпосередньо впливає на термін служби шибєрного клапана.

Деякі дослідження, такі як [37, 38], використовували як індекс продуктивності керуючого клапана кількість реверсій, тобто кількість змін напрямку клапана, оскільки термін служби клапана безпосередньо залежить від кількості реверсій. Таким чином, повторюваний контролер з фільтром показав

вищу ефективність у порівнянні з контролером без фільтра: кількість реверсій за той самий період для повторюваного контролера без фільтра становила 1065, тоді як із фільтром - 791, що зменшило кількість реверсій на 25%.

### Симуляція процесу із збуренням від забивання/прочищення

Для порівняння стійкості контролера R-GPC із фільтром та без нього обидва були протестовані за наявності збурень від забивання/прочищення. Рівень металу у формі було встановлено на 100 мм, а сигнал забивання/прочищення, показаний у п 2.3, був змодельований із максимальним забиванням на рівні 61%. Більше забивання спричиняє нестабільність у системі. Останній графік на рисунку 2.22 демонструє зменшення площі проходу шибєрного клапана від 100% до 39%.



із фільтром (червоний) та без фільтра (синій)

Рисунок 2.22 - Порівняння повторюваних структур за умов максимального забивання

З графіку також видно, що навіть за умов забивання контролер забезпечував підтримання постійного рівня. Для структури з фільтром забивання

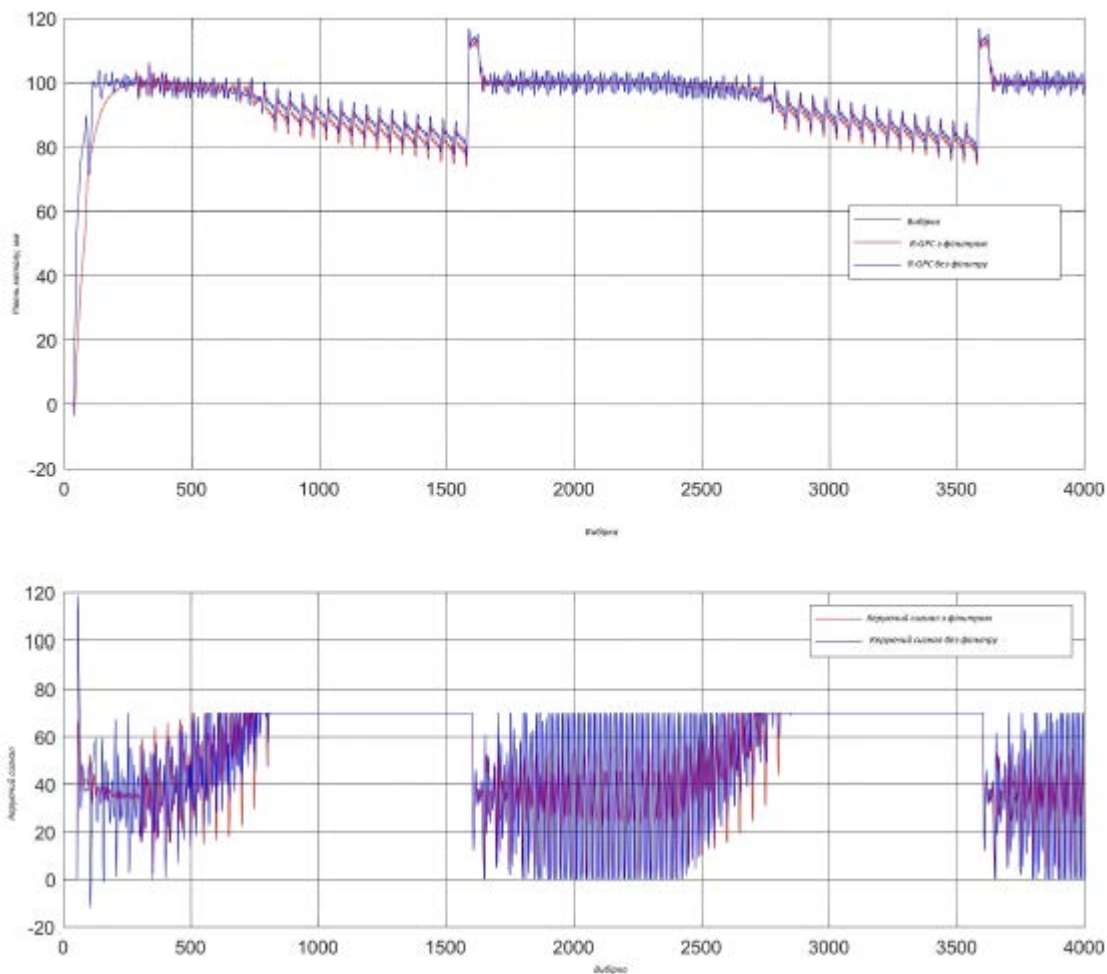
понад 60,77% спричиняє помилку усталеного стану понад 2%, тоді як для структури без фільтра помилка перевищує 2% уже при забиванні понад 50,42%. Ці результати пояснюються обмеженнями процесу, включеними в алгоритм контролера. У таких випадках керуючий сигнал насичувався через обмеження на відкриття клапана, і тому було неможливо підтримувати рівень металу у формі постійним протягом усього періоду забивання. Як тільки розпочався процес прочищення, контролер зміг повернути вихідний сигнал до бажаного встановленого значення.

Крім того, у цьому тесті продуктивності повторювана структура з фільтром показала кращі результати та більш плавний керуючий сигнал порівняно з повторюваною структурою без фільтра.

Симуляція процесу зі збуреннями від випучування та  
забивання/прочищення

У симуляцію були додані збурення від випучування та забивання/прочищення. Збурення від випучування було застосовано на 300-й вибірці й підтримувалося протягом усієї симуляції. З іншого боку, збурення від забивання/прочищення було застосовано у двох інтервалах: перший між 400-ю та 1600-ю вибірками, а другий між 2400-ю та 3600-ю вибірками. У періоди з 400-ї по 800-у вибірку та з 2400-ї по 2800-у вибірку відбувалося забивання клапана. З 800-ї по 1600-у вибірку та з 2800-ї по 3600-у вибірку клапан залишався забитим на 61%. На 1600-й та 3600-й вибірках відбулося різке прочищення клапана, яке повністю звільнило 100% площі проходу.

На графіку рівня на рис. 2.23 видно, що обидва контролери могли підтримувати стабільний рівень металу у формі, за винятком періодів з 800-ї по 1600-у вибірку та з 2800-ї по 3600-у вибірку, коли спостерігається зниження рівня металу. Однак це викликано фізичними обмеженнями процесу, які враховані у контролері та можуть бути побачені на графіку керуючого сигналу.



із фільтром (червоний) та без фільтра (синій)

Рисунок 2.23 - Порівняння повторюваних структур за наявності збурень від випучування та забивання/прочищення

### Симуляція процесу зі зміною швидкості лиття

Остаточна симуляція була виконана зі зміною швидкості лиття, з урахуванням максимальних і мінімальних швидкостей процесу безперервного лиття, використаного в цьому дослідженні. На рисунку 2.24 показано зміни швидкості лиття, які спричинили зміни частоти випучування, як це продемонстровано в (2.12), та в моделі об'єкта, згідно з (2.10), що призвело до коливань рівня металу у формі та змін у моделі об'єкта.

На рисунку 2.24 також зазначено, що між початковим моментом і 1500-ю вибіркою значення швидкості лиття становило 2,0 м/хв, що спричинило основну частоту випучування 0,167 Гц. У цей період зменшення випучування, отримане

повторюваними структурами з фільтром і без нього, становило 98,5% і 25,6% відповідно, як показано в 2.5.3

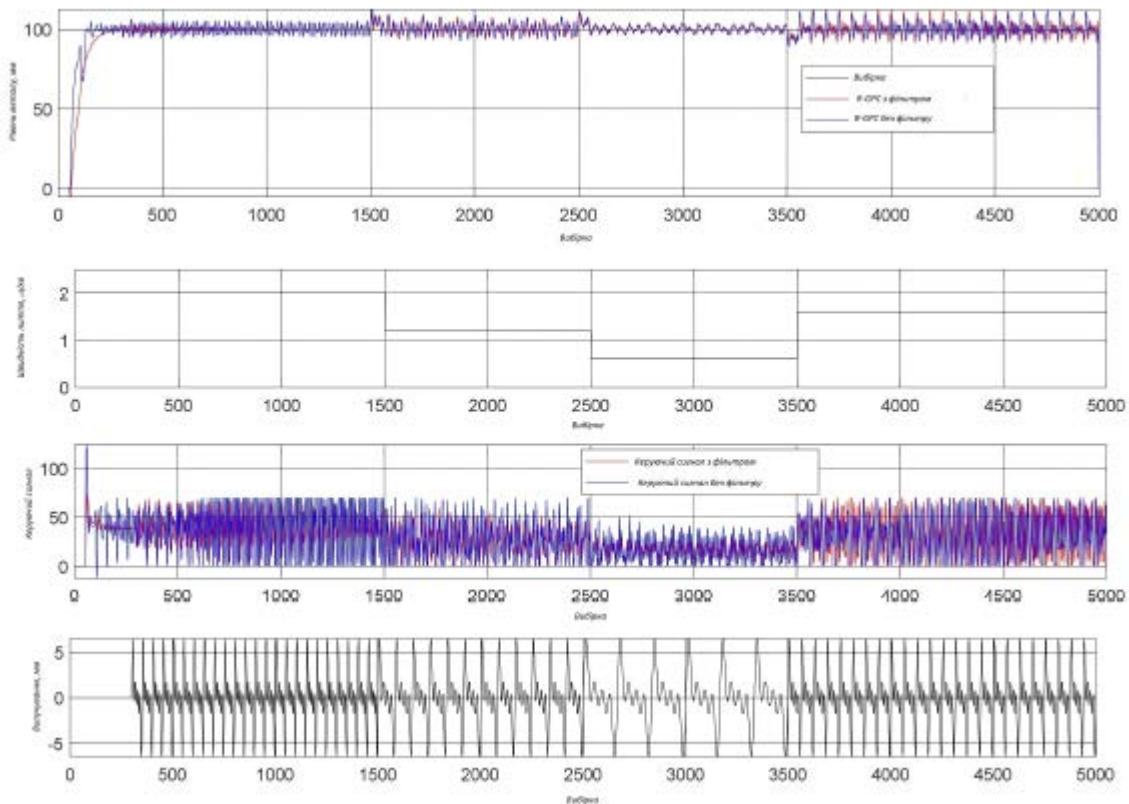


Рисунок 2.24 - Процес із варіацією швидкості лиття

Між 1500-ю та 2500-ю вибірками швидкість лиття була змінена на 1,2 м/хв, що спричинило основну частоту випучування 0,1 Гц, і зменшення для обох структур контролера становило приблизно 10%. Далі, між 2500-ю та 3500-ю вибірками швидкість була змінена на 0,6 м/хв, що згенерувало основну частоту випучування 0,05 Гц, а зменшення, отримане повторюваними структурами з фільтром і без нього, становило 68,8% і 46% відповідно.

Нарешті, між 3500-ю та 5000-ю вибірками швидкість лиття була змінена на 1,6 м/хв, що спричинило частоту випучування 0,133 Гц, і в цьому випадку спостерігалось збільшення коливань рівня металу у формі.

Навіть за умов зміни швидкості лиття та відповідної зміни моделі контролер зміг підтримувати рівень на заданому значенні. Проте лише на 1500-й вибірці контролер із фільтром зміг усунути збурення, викликане випучуванням,

оскільки він був правильно налаштований на частоту 0,167 Гц. Для інших швидкостей збурення від випучування не зменшувалося значною мірою, оскільки контролер не був налаштований на нові частоти випучування, спричинені змінами швидкості. Для кращого зменшення випучування за умов змінної швидкості лиття необхідні зміни в алгоритмі R-GPC, які дозволять йому адаптуватися до зміни частоти випучування. Як видно з графіка рівня на рис. 2.24, повторювана структура з фільтром забезпечила кращі або рівноцінні результати порівняно з повторюваною структурою без фільтра.

*Висновки за розділом:*

У розділі було проведено математичний опис технологічного процесу розливання сталі в проміжному ковші з урахуванням теплообміну, динамічних процесів та автоматизації управління рівнем металу.

Розроблено модель теплообміну для процесу розливання сталі при сталій швидкості МБЛЗ. Модель враховує теплові втрати через футеровку, випромінювання з поверхні металу та конвекцію. Аналіз показав, що тепловий стан промковша має незначний вплив на процес у сталому режимі, проте його роль зростає в перехідних умовах.

Охарактеризовано промковш як важливий елемент у виробничій лінії МБЛЗ, що виконує функції буферного пристрою, додаткового рафінування сталі та стабілізації процесу розливання. Визначено ключові параметри, що впливають на якість розплаву, зокрема рівень металу, гідродинамічні характеристики та температурні градієнти.

Проведено аналіз динамічних процесів, які виникають у промковші під час перехідних режимів, таких як перековшовка або заміна промковша. Описано вплив циркуляційних потоків та температурних змін на гідродинаміку та процес очищення розплаву. Визначено, що асиметричні потоки металу є ключовим фактором, що впливає на рівномірність температурного та хімічного розподілу.



Запропоновано спостерігач стану для підвищення точності оцінки рівня металу у промковші. Розроблена система дозволяє враховувати вплив шумів, похибок вимірювання та динамічних змін у системі. Це підвищує точність та надійність контролю процесу.

Розроблено модельно-прогнозуючий регулятор для управління рівнем сталі у промковші. Регулятор враховує динамічні зміни процесу, вплив зовнішніх збурень та забезпечує стабільний рівень металу навіть у складних умовах перехідних режимів. Це сприяє підвищенню якості розплаву та стабільності роботи всієї системи МБЛЗ.

Результати дослідження дозволили створити комплексну математичну модель, яка враховує теплофізичні, гідродинамічні та динамічні характеристики промковша як об'єкта автоматизації. Розроблені методи оцінки стану системи та регулятор управління рівнем металу забезпечують підвищення ефективності та надійності процесу безперервного розливання сталі.

## РОЗДІЛ 3

### ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ МЕТАЛУ У ПРОМІЖНОМУ КОВШІ МАШИНИ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ ЗАГОТОВОК

#### 3.1 Обґрунтування вибору апаратно-програмної платформи для реалізації системи керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ

Виходячи з виконаного у першому розділі аналізу технологічного процесу, існуючих рішень щодо побудови систем автоматизації, а також у контексті можливості практичної реалізації розроблених у другому розділі методів та способів керування, було проведено аналіз можливостей сучасних апаратно-програмних платформ від провідних виробників систем автоматизації. Варто відзначити, що на підприємствах нашого регіону вже склалися певні традиції, і так званий вендор-лист виробників апаратно-програмних засобів є незмінним протягом багатьох років. Так, для металургійного комбінату АрселорМіттал Кривий Ріг у вендор-лист постачальників устаткування систем автоматизації входять такі бренди, як Siemens, Schneider Electric та Rockwell Automation (Allen Bradley). Водночас, останнім часом деякі виробники представили достатньо потужні і революційні продукти, які дуже вразили своїми можливостями та відкритістю під час навчання.

У контексті цього, було вирішено розглянути можливість реалізації основного функціоналу системи, зокрема системи візуалізації технологічного процесу, з використанням ПЛК серії PLCnext від Phoenix Contact.

Проведений аналіз досвіду використання платформи PLCnext Technology у різних сферах виробництва показав, що дана платформа має багато переваг, які особливо проявляються в складних і динамічних галузях, таких як автоматизація металургійного виробництва.

Нижче наведено основні переваги, а також специфічні аспекти, які можуть бути корисними в металургії:

- відкритість і масштабованість: PLCnext підтримує інтеграцію стороннього програмного забезпечення та стандартних мов програмування (C++, Python, Java і т.д.), поряд із класичними стандартами ІЕС 61131-3, що дозволяє поєднувати традиційні PLC-технології з сучасними ІТ-рішеннями;

- інтеграція з хмарними сервісами та ІоТ: вбудована підтримка хмарних сервісів (наприклад, AWS, Microsoft Azure) та протоколів ІоТ (MQTT, OPC UA) дає змогу ефективно збирати, аналізувати та обробляти дані, що особливо важливо для побудови «розумного» виробництва відповідно до концепції Industry 4.0;

- висока продуктивність: використання багатоядерних процесорів та операційної системи на базі Linux забезпечує виконання кількох програм одночасно, що дозволяє керувати складними технологічними процесами без втрат продуктивності;

- гнучкість у розробці: надається можливість використовувати різні середовища розробки та інтегрувати сучасні алгоритми (наприклад, штучний інтелект чи машинне навчання) без необхідності обмежуватися лише класичними мовами для ПЛК;

- кібербезпека: платформа відповідає сучасним вимогам до інформаційної безпеки, що є критично важливим для захисту виробничих даних у металургії.

- модульність і підтримка різних протоколів зв'язку: PLCnext легко інтегрується в існуючі системи завдяки підтримці PROFINET, Modbus, OPC UA та інших стандартів, що дозволяє підключати обладнання різних виробників і створювати гнучкі архітектури системи автоматизації.

З урахуванням того, що металургійне виробництво – це складна галузь із високими вимогами до стабільності, продуктивності та безпеки, є цілий ряд аргументів, які вказують на високий потенціал рішень на базі PLCnext Technology, зокрема:

1. Керування складними процесами: у металургії багато високоточних і критичних процесів, таких як розливка металу, прокатка, контроль температури, газового складу та тиску, тож завдяки своїй потужності та швидкодії ПЛК PLCnext дозволяють обробляти дані з великої кількості датчиків і виконавчих механізмів у реальному часі.

2. Інтеграція машинного навчання та аналітики: за допомогою відкритої платформи можна реалізувати системи прогнозування поломок обладнання (Predictive Maintenance) або оптимізації витрат енергії, зокрема і оптимізувати процес кристалізації та зменшити витрати енергоносіїв.

3. Енергоефективність: PLCnext допомагає оптимізувати витрати енергії завдяки моніторингу споживання ресурсів і використанню алгоритмів управління в реальному часі.

4. Масштабованість для великих підприємств: металургійні заводи часто складаються з багатьох цехів із різними технологічними завданнями, тож PLCnext за рахунок відкритої архітектури та підтримки великої кількості сучасних протоколів може об'єднати ці підсистеми в одну інтегровану систему управління.

5. Висока надійність у важких умовах: у металургії обладнання працює в екстремальних умовах — високі температури, вібрація, пил, тож завдяки промислового дизайну та високому ступеню захисту контролери PLCnext гарантують стабільну роботу в таких умовах.

6. Розширення функціональності за допомогою модулів: PLCnext підтримує використання додаткових модулів (наприклад, для специфічних сенсорів або комунікацій), що особливо важливо в металургії, де є потреба в нестандартних рішеннях.

7. Віддалений моніторинг і управління: завдяки інтеграції з хмарними сервісами можна організувати віддалений доступ до системи, що спрощує обслуговування та контроль за виробництвом.

8. Швидке введення в експлуатацію: у металургії час простою дуже дорогий, а PLCnext забезпечує швидке налаштування та переналаштування завдяки сучасним інструментам розробки.

Водночас, платформа має і ряд недоліків, зокрема в контексті задач створення людино-машинних інтерфейсів. Зокрема, у випадках, коли потрібні дуже складні графічні інтерфейси або специфічні функції (наприклад, 3D-візуалізація), PLCnext Engineer може виявитися менш гнучким у порівнянні з рішеннями від Siemens WinCC, Wonderware або InduSoft.

Крім того, варто відзначити і те, що у випадку, якщо компанія не планує використовувати контролери PLCnext, то інтеграція НМІ через це ПЗ може бути менш ефективною і не виправдати витрати. Все ж таки проведений аналіз показує, що PLCnext Engineer найбільш ефективний для роботи в межах екосистеми Phoenix Contact. У проєктах із використанням обладнання інших виробників можуть виникати складнощі з інтеграцією.

Також потенційним недоліком можна вважати той факт, що якщо штат інженерів не знайомий з екосистемою PLCnext, навчання та освоєння нового інструменту можуть зайняти час і потребувати додаткових ресурсів.

Але, з урахуванням вище вказаного можна зробити загальний висновок, що в цілому платформа PLCnext є потужним інструментом для автоматизації металургійного виробництва, особливо в умовах переходу до концепції Industry 4.0. Її використання виправдане, якщо підприємство прагне підвищити ефективність, зменшити витрати та інтегрувати сучасні технології в існуючі процеси. Особливо це актуально для великих заводів, таких як металургійний комбінат АрселорМіттал Кривий Ріг, де потрібна гнучкість, надійність і масштабованість.

### 3.2 Програмна реалізація системи візуалізації процесу керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ

Стопор проміжного ковша може управлятися вручну або в автоматичному замкненому контурі управління. Автоматичне керування замкнутим контуром використовується для підтримки заданого рівня металу під час процесу лиття.

З метою реалізації кнопки переключення між автоматичним та ручним режимом керування технологічним процесом використано графічний елемент Button, для якого виконано деякі налаштування.

Зокрема, кнопка при активованому автоматичному режимі роботи відображає іконку переключення у ручний режим, і навпаки – при активованому ручному режимі відображає іконку переключення в автоматичний режим. Для цього на першому етапі створено список зображень WorkModeImageList, що містить прив'язку зображень режимів роботи до значень тегів. Дана дія виконується шляхом того, що на вкладці Components у вікні НМІ у пункті Local з використанням контекстного меню обрано пункт Add Image List (рис. 3.1).

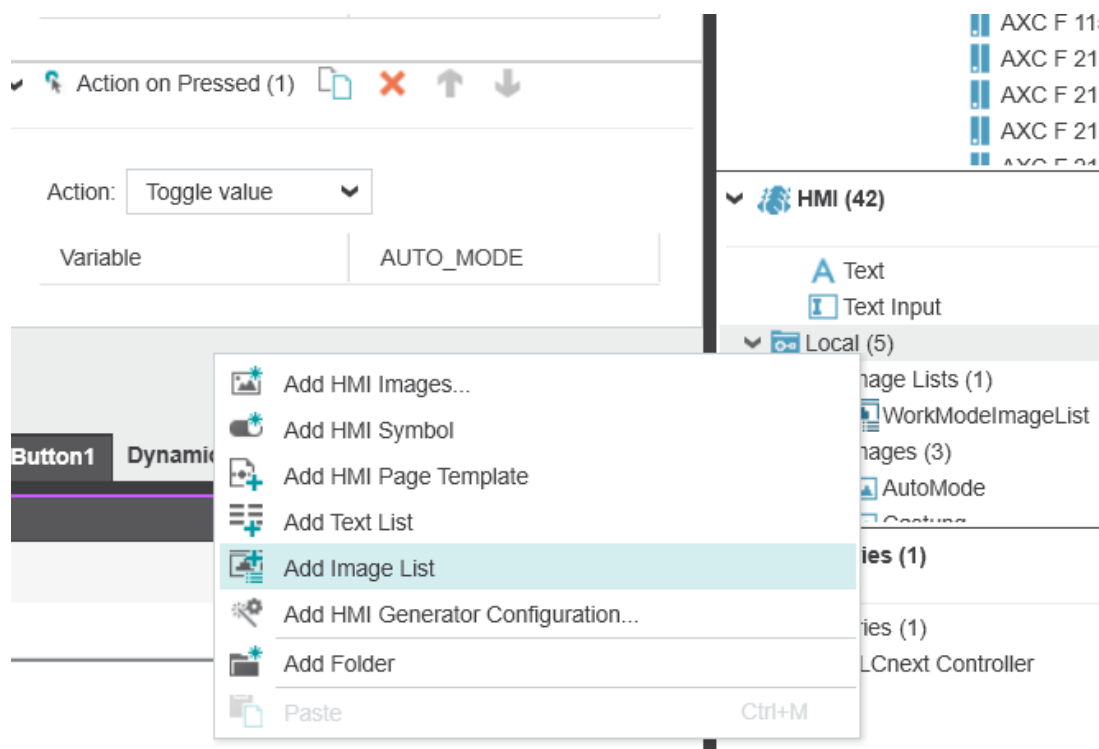


Рисунок 3.1 – Вікно додавання списку зображень

У вікні редагування списку зображень послідовно додані раніше завантажені зображення іконок у векторному форматі svg, що відповідають ручному та автоматичному режимі, та налаштовано їх відображення у залежності від значення тегу AUTO\_MODE\_INT типу INT, що відповідає за режим роботи системи (рис. 3.2).

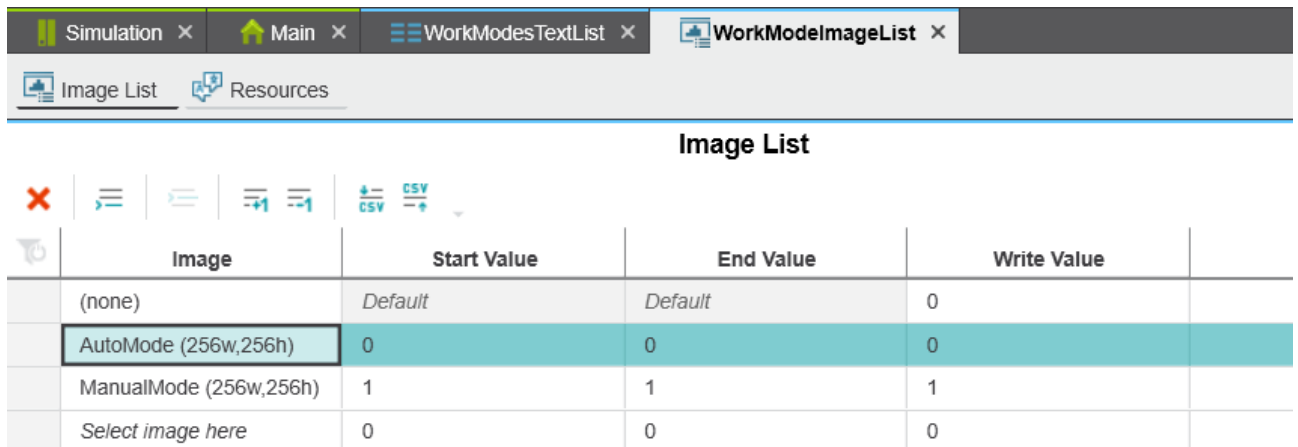


Рисунок 3.2 – Вікно редагування списку зображень та встановлення відповідності зображень зі значеннями пов'язаної змінної

На наступному кроці треба налаштувати анімацію зображення на кнопці переключення між режимами роботи при зміні значення тегу AUTO\_MODE\_INT. Для цього у властивостях обраної у редакторі кнопки треба перейти на вкладку Dynamics та додати нову анімацію типу Image->Image List, вказати назву пов'язаної змінної Variable (для даного випадку AUTO\_MODE\_INT), та обрати раніше створений список зображень (Image List) WorkModeImageList (рис. 3.3).

Також для кнопки потрібно прибрати значення властивості Text, а також налаштувати розміщення зображення по центру та заповнення доступного простору з масштабуванням при збереженні пропорцій зображення. Для цього у вікні властивостей кнопки встановлені наступні налаштування (рис. 3.4):

- розміщення зображення (Image placement) – по центру (center);
- масштабування зображення (Image scaling) – заповнення (fill).

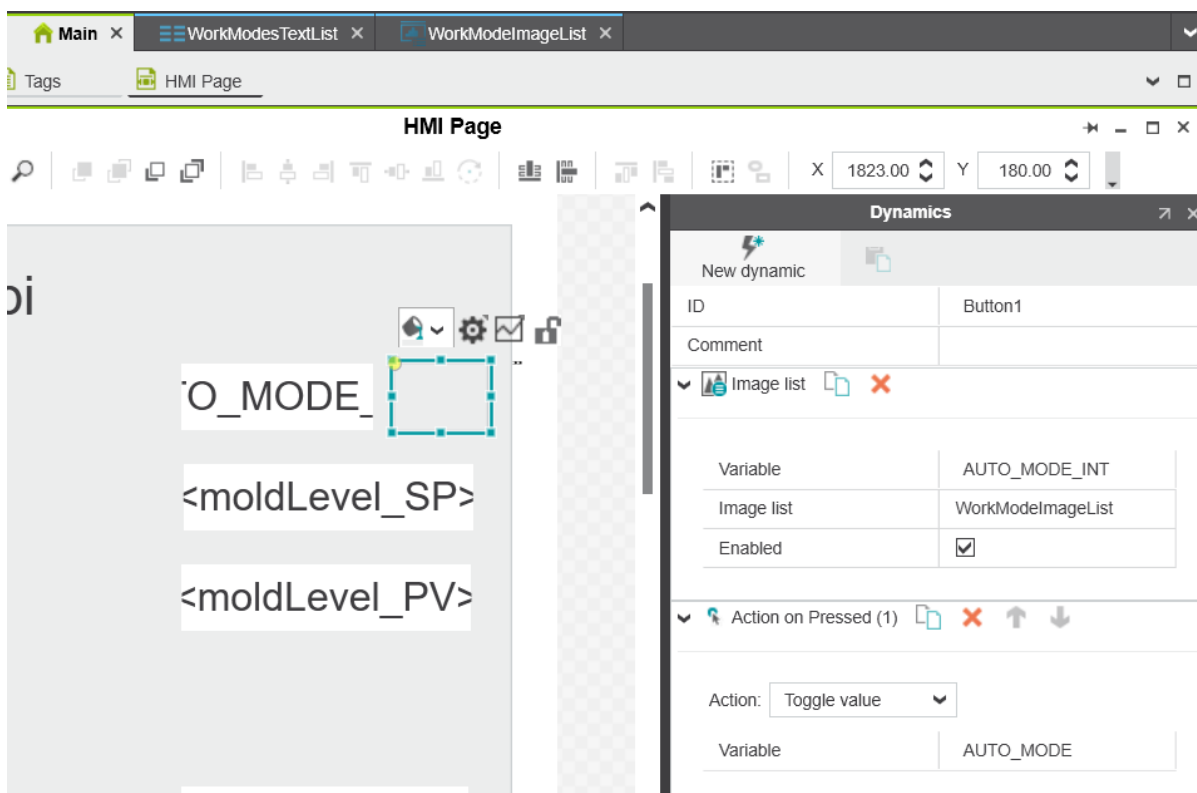


Рисунок 3.3 – Налаштування анімації зміни зображення кнопки в залежності від поточного режиму роботи

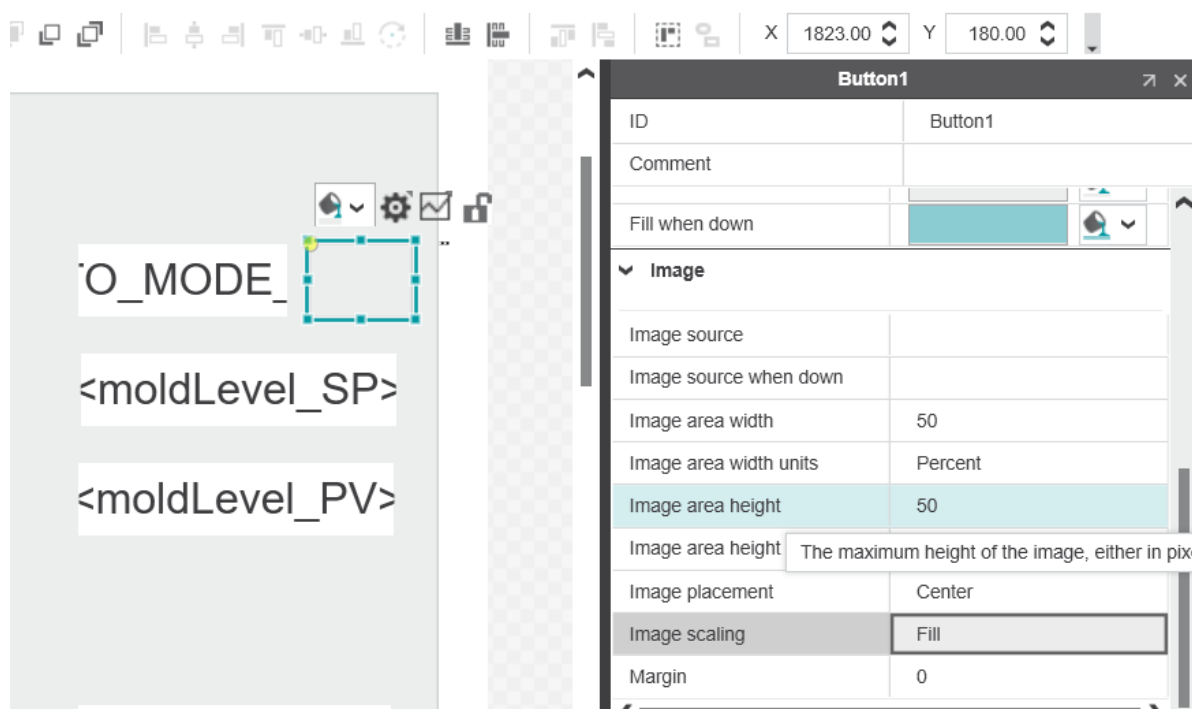
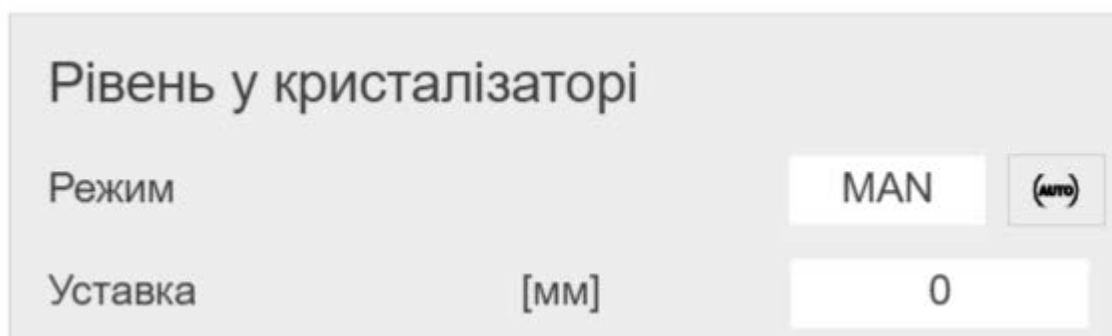


Рисунок 3.4 – Основні налаштування кнопки для відображення анімації зміни зображення

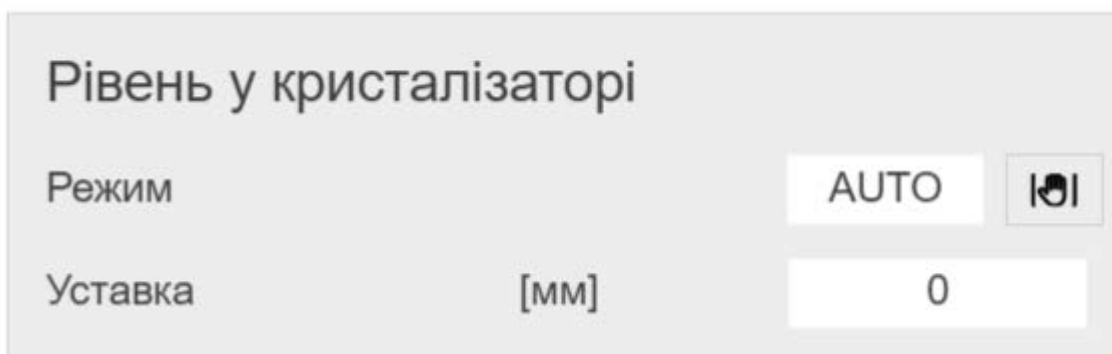


На рис. 3.5 наведено результати тестування зміни зображення на кнопці в залежності від встановленого режиму роботи. Як видно, при активованому автоматичному режимі відображається іконка руки (переключення на ручний режим, рис. 3.5,а), а при ручному – іконка з текстом AUT (рис. 3.5,б).

а)



б)



а) ручний і б) автоматичний режими роботи

Рисунок 3.5 – Результати тестування анімації кнопки при переключенні режимів роботи

Переключення режиму роботи має відбуватися по натисненню на кнопку. З цією метою у вікні властивостей кнопки на вкладці Dynamics (рис. 3.6) додано анімацію типу Action->Action on Pressed (тобто дія при натисканні на кнопку), і налаштовано виконання дії переключення значення (Toggle value) та указано, для якої саме змінної логічного типу (у нашому випадку це AUTO\_MODE).

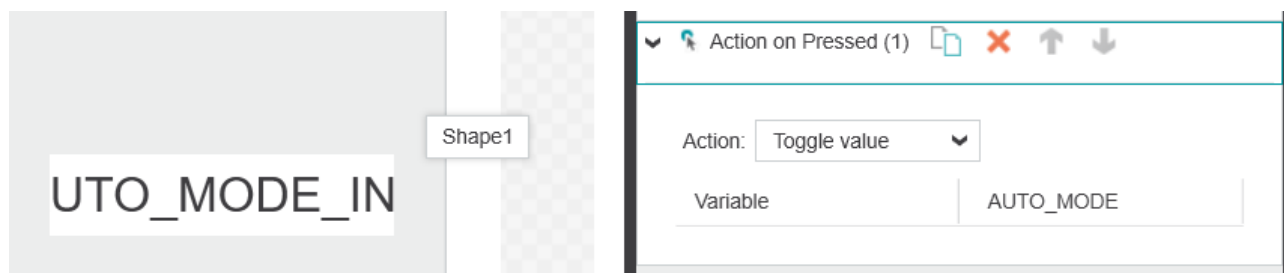


Рисунок 3.6 – Пов’язування кнопки з дією переключення значення логічної змінної AUTO\_MODE

Для відображення обраного режиму роботи за допомогою тексту також потрібно додати анімацію типу Text->Text List до відповідного графічного примітиву типу Text (рис. 3.7). Як видно, властивість Список текстів (Text list) прив’язана до об’єкту WorkModesTextList.

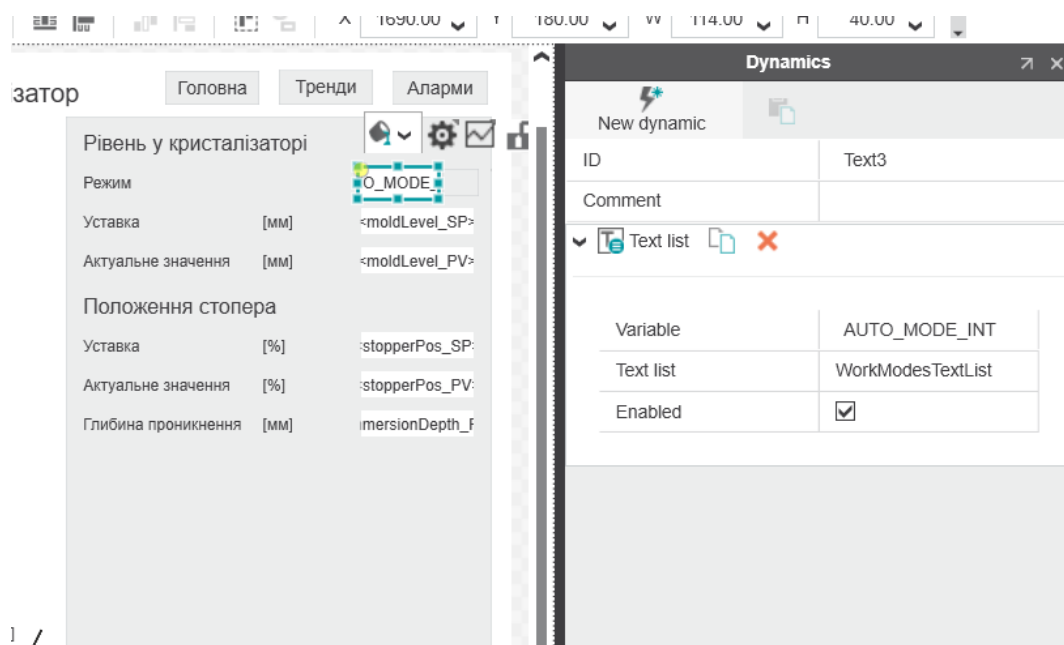


Рисунок 3.7 – Налаштування анімації зміни тексту відображення режиму роботи

Для створення списку текстів на вкладці Components у вікні НМІ у пункті Local контекстного меню потрібно обрано пункт Add Text List і у вікні, що відкриється, додати текстові значення та значення змінної, які їм відповідають (рис. 3.8).

Text	Start Value	End Value	Write Value
MAN	Default	Default	0
AUTO	1	1	1
Enter text list entry here	0	0	0

Рисунок 3.8 – Вікно редагування списку текстів та встановлення відповідності елементів зі значеннями пов’язаної змінної

Особливістю компонентів, що використовуються для реалізації анімації за списками у PLCnext є те, що вони, зазвичай, прив’язуються до аналогових змінних (наприклад, цілочисельного типу INT). З урахуванням того, що для керування режимом роботи використовується логічна змінна (тип BOOL) AUTO\_MODE, у основній програмі в блоці main, що виконується у головному циклі, потрібно виконувати перетворення з логічного типу до цілого. Для цього використовується одна з стандартних функцій конвертації з бібліотеки IEC-61131-3 Data Type Conversions з назвою TO\_INT (рис. 3.9).

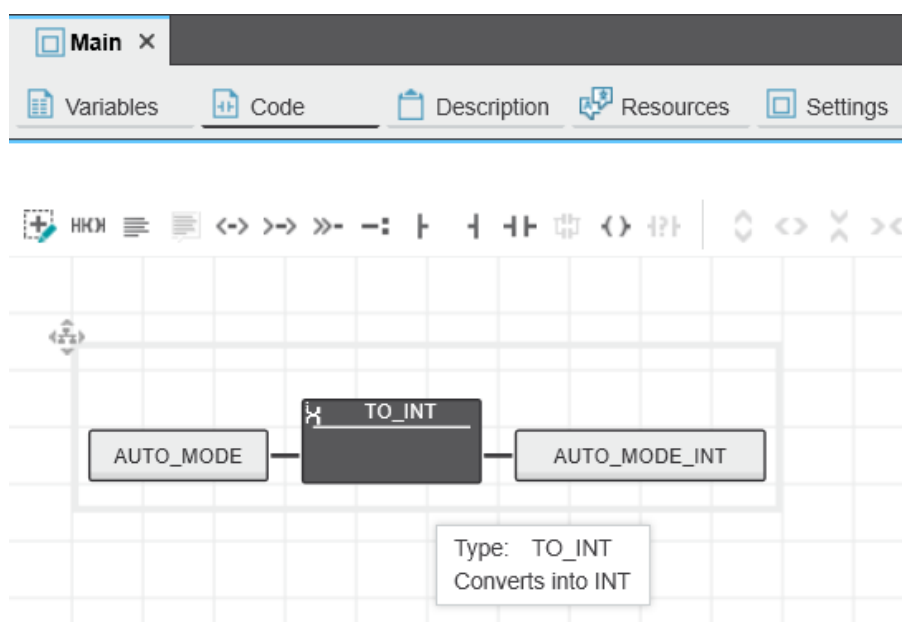


Рисунок 3.9 – Блок коду функції main для перетворення змінної AUTO\_MODE у цілий тип для використання у системі візуалізації

На головній сторінці передбачено відображення інтервалу часу від початку розливки металу до поточного моменту часу. Для цього використовується змінна CastTimeLTOD типу даних LTIME\_OF\_DAY, яка обчислюється на кожному циклі роботи блоку main як різниця між часом початку розливки та поточним часом. Для подальшого відображення на сторінці отримане значення перетворюється у змінну CastTime\_Str типу STRING з використанням функції TO\_STRING з вказанням потрібного формату відображення значення (у нашому випадку ми відображаємо години, хвилини та секунди за допомогою шаблону `{0:HH:mm:ss}` (рис. 3.10).

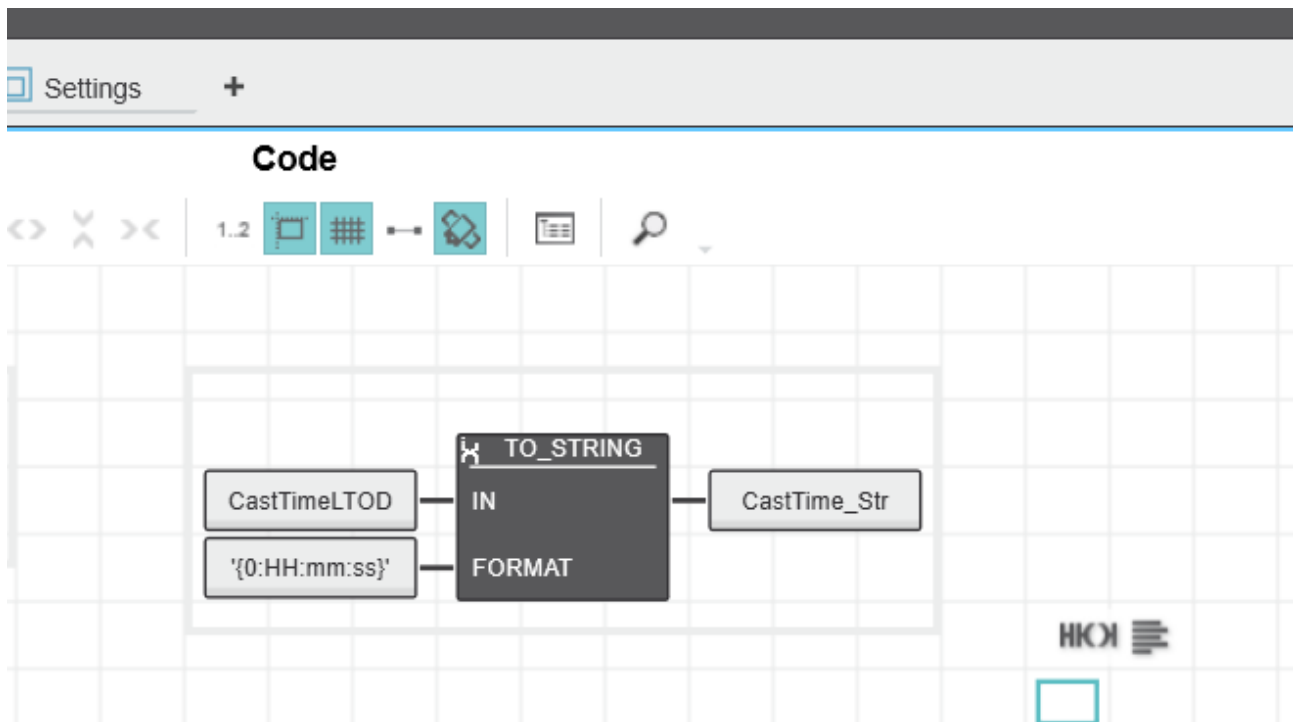


Рисунок 3.10 – Блок коду функції main для перетворення змінної, що зберігає час розливки, у рядковий тип для використання у системі візуалізації

На рис. 3.11 наведено сторінку Main системи візуалізації у редакторі HMI-сторінок додатку PLCnext Engineer. Дана сторінка використовується у якості стартової для проєкту (встановлена як Startup Page) і відображається після аутентифікації користувача.

На рис. 3.11 відображається, зокрема, і прив'язка полів до змінних, визначених у блоках коду проєкту, тож можна встановити, які саме параметри будуть відображатися під час роботи системи SCADA у режимі виконання (у runtime).

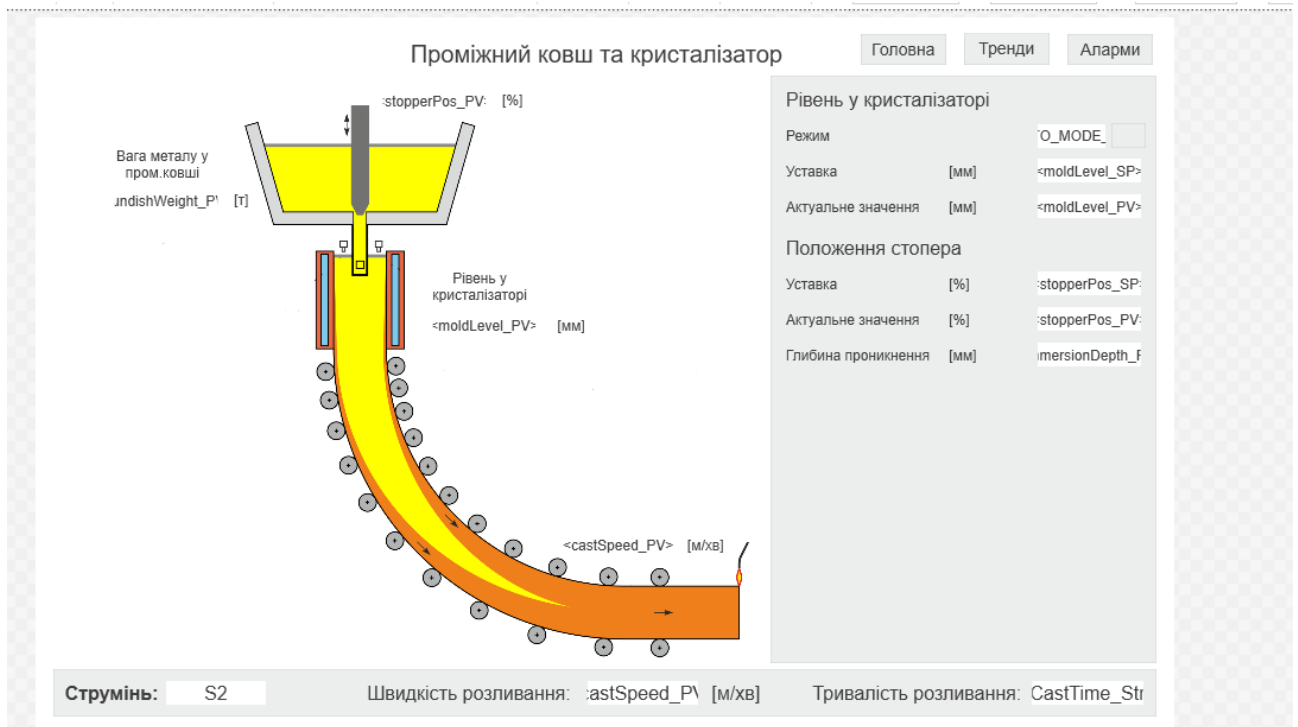


Рисунок 3.11 – Сторінка візуалізації стану проміжного ковша та кристалізатора з прив'язкою анімованих змінних

На рис. 3.12 наведено скрін з переліком основних змінних блоку main програми ПЛК. Як видно, для кожної змінної вказано тип. Також більшість змінних має значення атрибуту Usage External, що дозволяє використовувати дані атрибут не тільки у даному блоці, а і у інших блоках організації програми (POU, program organization unit). У полі Comment задано короткий опис призначення змінної та її ролі у проєкті програмного забезпечення, що спрощує подальшу підтримку коду.

Name	Type	Usage	Translate	Comment	Init
<i>Default</i>					
moldLevel_PV	REAL	External	<input type="checkbox"/>	поточне значення рівня у кристалізаторі	
moldLevel_SP	REAL	External	<input type="checkbox"/>	задане значення рівня у кристалізаторі	
stopperPos_PV	REAL	External	<input type="checkbox"/>	поточне значення положення стопора	
stopperPos_SP	REAL	External	<input type="checkbox"/>	задане значення положення стопора	
AUTO_MODE	BOOL	External	<input type="checkbox"/>	режим роботи (TRUE=автоматичний)	
AUTO_MODE_INT	INT	External	<input type="checkbox"/>	режим роботи для візуалізації листів текстів та зобр...	
ImmersionDepth_PV	REAL	External	<input type="checkbox"/>	задане значення глибини проникнення	
CastTime_Str	STRING	External	<input type="checkbox"/>	форматоване значення часу розливки	
CastTime	TIME	External	<input type="checkbox"/>	час розливки	
CastTimeLTOD	LTIME_OF_DAY	External	<input type="checkbox"/>	час розливки у форматі Time_OF_DAY	
castSpeed_PV	REAL	External	<input type="checkbox"/>	швидкість розливки	
tundishWeight_PV	REAL	External	<input type="checkbox"/>	вага металу у проміжному ковші	<input type="text"/>

Рисунок 3.12 – Вкладка Variables з описом основних змінних блоку main програми ПЛК

На рис. 3.13 наведено зовнішній вигляд запущеного проєкту візуалізації у браузері.

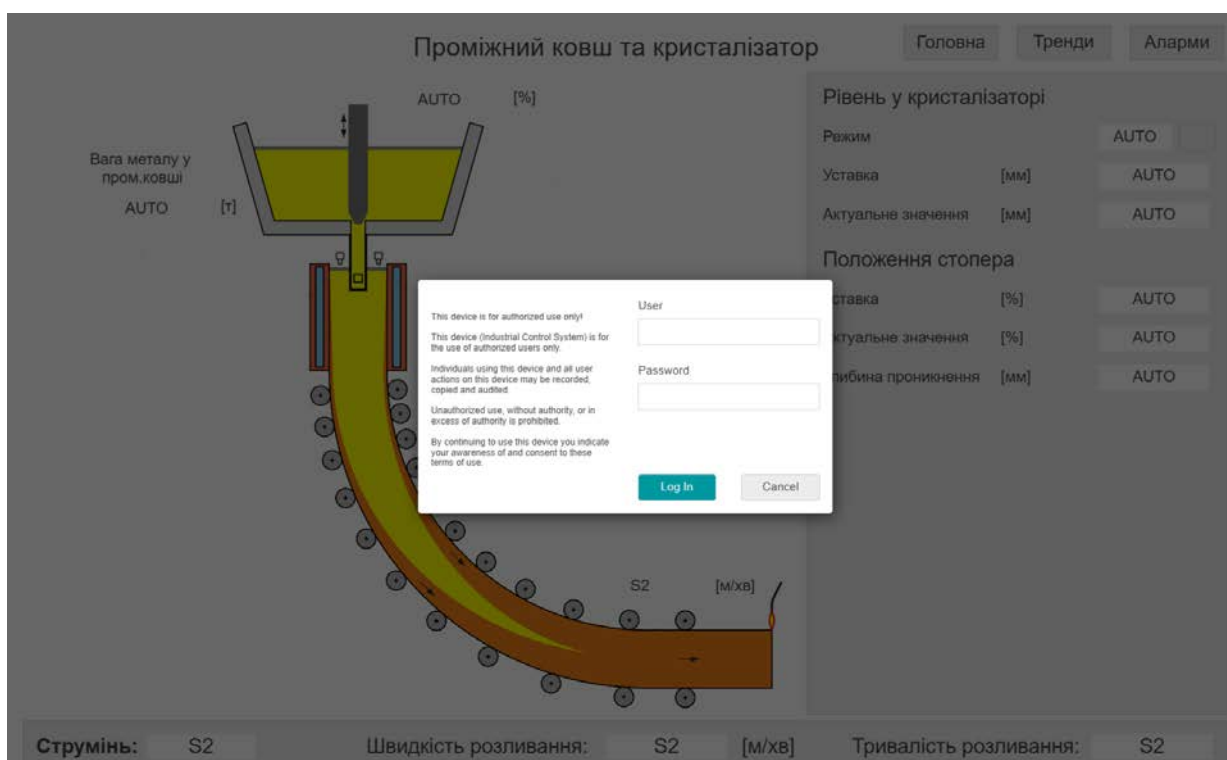


Рисунок 3.13 – Вікно авторизації користувача

Як видно з рис. 3.13, при вході до системи користувачу потрібно ввести свій логін і пароль, за рахунок чого відбувається авторизація користувача та розмежування доступу до функціоналу системи диспетчерського контролю та керування.

На рис. 3.14 наведено головну сторінку системи візуалізації після входу користувача.

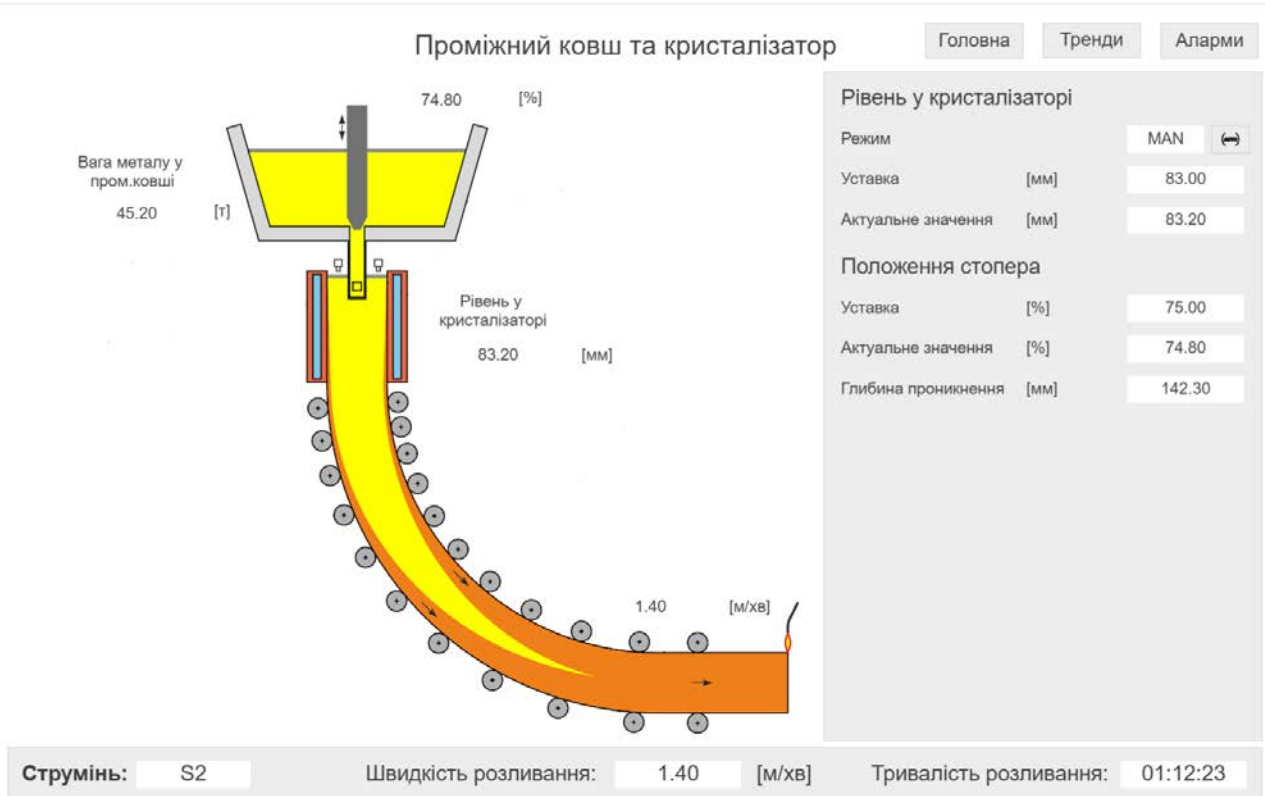


Рисунок 3.14 – Головна сторінка розробленої системи візуалізації технологічного процесу керування рівнем у проміжному ковші та кристалізаторі МБЛЗ

Як видно, розроблена система дозволяє переглянути основні параметри технологічного процесу, їх уставки та поточні значення, перемикатись між автоматичним та ручним режимом керування стопором проміжного ковшу тощо. Інтерфейс системи розроблявся з урахуванням вимог стандарту ISA-101 та концепції ситуаційної обізнаності оператора.

### *Висновки за розділом*

На основі аналізу основних тенденцій розвитку систем автоматизації металургійного виробництва визначено перспективність застосування платформи PLCnext та програмного забезпечення PLCnext Engineer для реалізації функцій диспетчерського контролю та керування рівнем металу у проміжному ковші МБЛЗ. Головними критеріями вибору даної платформи слугували висока швидкодія, відкритість, підтримка мережевих протоколів та сучасних технологій інтеграції, відповідність тенденціям концепції Industry 4.0.

З використанням інструментального програмного забезпечення PLCnext Engineer розроблено проєкт системи візуалізації процесу керування рівнем металу у проміжному ковші та кристалізаторі МБЛЗ. Проведена практична апробація розробленої системи з використанням симулятора ПЛК показала зручність та ефективність прийнятих проєктних рішень. Водночас, не всі заплановані функції вдалося реалізувати через обмеженість доступних безкоштовно версій ПЛК для симуляції. Це, зокрема, не дало у повній мірі розгорнути та протестувати підсистему тривоги (алармів), оскільки сервер алармів доступний лише в останніх версіях процесорних модулів, під яких немає безкоштовних симуляторів.



## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до якості металопродукції та необхідністю впровадження сучасних засобів автоматизації в умовах індустрії 4.0. Розробка та впровадження автоматизованих систем керування рівнем металу є важливим кроком у напрямку цифровізації металургійного виробництва, що сприяє підвищенню його конкурентоспроможності.

Технологічний процес безперервної розливки сталі є одним із ключових етапів у металургії, що впливає на якість кінцевого продукту. Стабільність та ефективність цього процесу значною мірою залежать від рівня автоматизації.

Проміжні ковші відіграють важливу роль у забезпеченні рівномірного потоку металу, компенсації температурних втрат і контролю хімічного складу сталі. Визначено основні види та функції ковшів, а також їх значення у технологічному процесі.

Проміжний ковш як об'єкт автоматизації характеризується складністю через необхідність управління багатьма параметрами, такими як температура металу, рівень сталі, контроль шлакової фази та часу перебування. Це визначає високі вимоги до систем автоматизації та точності вимірювальних пристроїв.

Проведено математичний опис технологічного процесу розливання сталі в проміжному ковші з урахуванням теплообміну, динамічних процесів та автоматизації управління рівнем металу.

Розроблено модель теплообміну для процесу розливання сталі при сталій швидкості МБЛЗ. Модель враховує теплові втрати через футеровку, випромінювання з поверхні металу та конвекцію. Аналіз показав, що тепловий стан промковша має незначний вплив на процес у сталому режимі, проте його роль зростає в перехідних умовах.

Охарактеризовано промковш як важливий елемент у виробничій лінії МБЛЗ, що виконує функції буферного пристрою, додаткового рафінування сталі

та стабілізації процесу розливання. Визначено ключові параметри, що впливають на якість розплаву, зокрема рівень металу, гідродинамічні характеристики та температурні градієнти.

З використанням програмного забезпечення PLCnext Engineer розроблено проєкт системи диспетчерського контролю та керування технологічними процесами, що відбуваються при розливці металу з проміжного ковша у кристалізатор МБЛЗ, виконано його практичну апробацію з використанням симулятора ПЛК АХС F 1152.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дюдкин Д А. Качество непрерывнолитой стальной заготовки. -Киев: Техника, 1988, 253 с.
2. Смирнов А.П., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали: Учебник. Донецк: ДонНТУ, 2011. 482 с.
3. Чернега Д.Ф., Богушевський В.С., Грищенко С.Г. Основи металургійного виробництва металів і сплавів. К.: Вища школа, 2006. 503 с.
4. Жукова Н.В., Корчак В.В. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора / *Наукові праці Дніецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. Випуск - 21(183). Донецьк, ДонНТУ. 2011. С. 6-11
5. Смирнов А Н., Пилющенко В Л., Минаев А.А., Момот С.В., Белобров Ю.Н Процессы непрерывной разливки. Донецк: ДонНТУ, 2002, 536с.
6. B.G. Thomas, Q. Yuan, L. Zhang, S.P. Vanka, Flow Dynamics and Inclusion Transport in Continuous Casting of Steel, *NSF Design, Service, and Manufacturing Grantees and Research Conf. Proc.*, R.G.Reddy, ed., (2003), p.2328 - 2362.
7. Гільченко, О. М. Автоматизація технологічних процесів та виробництв. Київ: КНТЕУ, 2018. 256 с.
8. Попович, Л. М., Савченко, Г. О. Основи проектування автоматизованих систем керування. Львів: ЛНТУ, 2019. 240 с.
9. Васильєв, П. А. Сучасні підходи до автоматизації виробничих процесів. Одеса: ОНПУ, 2017. 295 с.
10. Sahai Y., Emi T. Tundish Technology for Clean Steel Production. New Jersey: World Scientific, 2008. P. 316
11. Wolf M. Advanced tundish metallurgy in slab casting // *Proceedings 2-nd Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries. October 28-31, 1997, Wuhang, China*. 316p.

12. Лазаренко, О. П. Інтеграція програмного забезпечення для автоматизованих систем. Львів: ЛНТУ, 2019. 200 с.
13. Tsai H., Yin H., Lowry M. et al. Analysis of Transverse Corner Crackson Slabs and Countermeasures // *Iron and Steel Technology*, 2006, Vol. 3, N7.
14. Smirnov A., Grydin S., Physical and mathematical modeling fluid flows movement in tundish for 6-strand billet CCM // *1-st International Conference Simulation and Modeling of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEELSIM-2005)*, Brno, 2005. Brno: 2005. P. 244-252.
15. Thiede, S., Herrmann, C. "Automation in Manufacturing: Sustainable and Smart Solutions". Springer, 2021. 350 p.
16. Смирнов А.Н., Кравченко А.В., Кузнецов Д.Ю. Физическое моделирование параметров рафинирования стали в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ при продувке аргоном / *Зборник научних трудов конференції «Інноваційні технології внепечної обробки чугуна і сталі»* / Донецьк 2011.С.182-190
17. Troniman J., Comacho D. Plasma tundish heating at Nucor Steel Nebraska// *Iron and Steel Engineer*. 1995. V.73. No.11. P.39-44.
18. Kittaka Setsuo, Wakida Shuji, Kanki Toyohiko, Hosokawa Takafumi Nippon Steel Type Tundish Plasma Heater "NS-Plasma I" for Continuous Caster / *Shinnittetsu Giho*. 2001. №375. P.145-149
19. Kumar, V. Modern Database Design for Automated Systems. New York: Wiley, 2020. 280 p.
20. Green, P. Practical Guide to Industrial Weight Automation. Amsterdam: Elsevier, 2021. 215 p.
21. Шаповал, С. А. "Інтеграція автоматизованих систем управління в умовах промислових підприємств". Харків: Видавництво ХІП, 2020. 312 с.
22. Лебедєв, І. Г., Корольова, Н. В. "Автоматизація технологічних процесів: Теорія та практика". Київ: Кондор, 2021. 284 с.

23. Викулов, В. М. "Впровадження сучасних технологій автоматизації в металургії". Дніпро: Ліра, 2019. 275 с
24. Архипов, В. В. Інформаційні технології в промислових системах. Харків: УкрНТЕІ, 2021. 290 с.
25. Буланов Л.В., Юровский Н А, Парфенов Е.П., Корзунин Л Г., Дернягин А.Б., Смирнов А.А. Система управления качеством непрерывнолитых заготовок // *«Металлургическая и горнорудная промышленность»*. Украина, Днепропетровск, № 8. 2003. с. 131-135
26. Cruz, D. Estruturas de Controle Preditivo Repetitivo Baseadas na Formulação GPC. Master's Thesis, Federal University of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2015.
27. de B. Araújo, R.; Durandal, E.C.; Rosa, G.A.; Coelho, A.A.R. Adaptive Repetitive Control Design and Filtered Positional GPC Controller For Periodic Disturbance Rejection. In Proceedings of the XXI Congresso Brasileiro de Automática-CBA, Vitória, Brazil, 6–10 October 2016.
28. Camacho, E.F.; Bordons, C. Model Predictive Control; Springer: London, UK, 2004; ISBN 3-540-762-41-8.
29. Francis, B.A.; Wonham, W.M. The Internal Model Principle of Control Theory. *Automatica* 1976, 12, 457–465.
30. Costa-Castelló, R.; Nebot, J.; Griñó, R. Demonstration of the Internal Model Principle by Digital Repetitive Control of an Educational Laboratory Plant. *IEEE Trans. Educ.* 2005, 48, 73–80.
31. Cruz, D.M.; Normey-Rico, J.E.; Costa-Castelló, R. Repetitive Model Based Predictive Controller to Reject Periodic Disturbances. *IFAC Proc. Vol.* 2014, 19, 11494–11499.
32. Ljung, L. System Identification—Theory for the User, 2nd ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 1999.
33. Pereira, R.P.d.A.; Almeida, G.M.d.; Salles, J.L.F.; Cuadros, M.A.d.S.L.; Valadao, C.T.; Freitas, R.O.d.; Bastos-Filho, T. A Model-Based Predictive Controller

of the Level of Steel in the Mold with Disturbances Using a Repetitive Structure. *Metals* 2021, 11, 1458.

34. PLCnext Engineer online help. PLCnext Engineer online help. URL: <https://engineer.plcnext.help/> (дата звернення: 16.11.2024).

35. Маринич І. А., Тронь В. В. Методичні рекомендації до виконання кваліфікаційної роботи магістра для студентів спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”. Кривий Ріг : Видавничий центр КНУ, 2022. 50 с.

36. ДСТУ 3008:2015. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. Київ, ДП «УкрННЦ», 2015. 26с. (Інформація та документація).

37. ДСТУ 8302:2015. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання Київ, ДП «УкрННЦ», 2016. 16 с. (Інформація та документація).

38. ДСТУ 3582:2013. Бібліографічний опис. Скорочення слів і словосполучень в українській мові. Загальні вимоги та правила. Київ, ДП «УкрННЦ», 2013. 23 с. (Інформація та документація)

39. ДСТУ 3651.0-97 Метрологія. Одиниці фізичних величин. Основні одиниці фізичних величин Міжнародної системи одиниць. Основні положення, назви та позначення Київ, Держстандарт України, 1998. 27 с. (Інформація та документація)