

УДК 669.162.22

Черевко О. О., Щербаков С. В., Шаповалов О. І.

ІНВАРІАНТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ МЕТАЛУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ МБЛЗ

На якість поверхні злитка істотно впливає робота системи автоматичного регулювання (САР) рівня металу в кристалізаторі МБЛЗ. Переривання струменя металу, що надходить в кристалізатор, а також коливання рівня призводять до утворення поверхневих дефектів злитка. Великі відхилення від заданого рівня можуть призводити до виникнення аварійних ситуацій.

Виконано аналіз роботи існуючої САР рівня металу в кристалізаторі. Встановлено, що основним обуренням по навантаженню, яке призводить до коливань рівня, є зміна швидкості витягування злитка, що відбувається при зміні пром.ковша та розливного стакану, при переході на другий стопор промковша, при спрацьовуванні системи запобігання проривів та інших причин.

Для підвищення динамічної точності стабілізації рівня металу запропоновано структурну схему комбінованої САР, що використовує принципи управління по відхиленню та обуренню. Внесено відповідні пропозиції щодо удосконалення системи.

Функціонування системи управління перевірено на моделях. Доведено, що розроблена САР абсолютно інваріантна до обурення по навантаженню.

Дослідження показали, що запропоновані нововведення дозволяють істотно покращити умови вторинного охолодження злитка, підвищити якість стабілізування рівня металу в кристалізаторі, і, як наслідок, якість кінцевої продукції.

Ключові слова: МБЛЗ, злиток, кристалізація, вторинне охолодження, система автоматизованого управління, інваріантність, комп'ютерне моделювання.

Постановка проблеми. Стабілізація рівня металу в кристалізаторі МБЛЗ повинна здійснюватися з високою точністю, оскільки перевищення рівнем металу заданого значення може привести до переливу через верхню кромку кристалізатора, а зниження рівня може стати причиною формування досить міцної кірки злитка і прориву металу під кристалізатором. Такі ситуації є серйозними аваріями. Неприпустимими є перерви струменя металу в ході розливки, тому що вони ведуть до утворення спаїв (поясів) на злитку. Коливання рівня металу внаслідок зміни швидкості витягування злитка викликають появу складок на його поверхні.

З огляду на ці умови рівень металу в кристалізаторі повинен бути надійно стабілізованим при можливо менших коливаннях величини керуючого впливу (відкриття затвора промковша) та без статичної помилки. При проектуванні системи регулювання рівня слід враховувати інерційність виконавчого механізму і регулюючого органу.

Таким чином, якість одержуваних на МБЛЗ слябів, а також надійність і безпека роботи агрегату багато в чому залежать від функціонування системи автоматичного регулювання рівня металу в кристалізаторі. САР рівня металу в кристалізаторі МБЛЗ повинна відповідати особливим вимогам по точності, швидкодії, якості перехідних процесів, а також стійкості до зовнішніх впливів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день найбільш поширеним способом дозування сталі є дозування за допомогою стопорного механізму, який переміщується відносно стакана-дозатора, змінюючи витрати металу, що надходить в кристалізатор з проміжного ковша [1, 2].

При стопорній розливці основними обуреннями, які впливають на рівень металу в кристалізаторі, є [3]:

- зміна швидкості витягування злитка з кристалізатора;
- розмивання або руйнування головки стопора;
- заростання внутрішньої порожнини стакана-дозатора.

Для стабілізації рівня металу в кристалізаторі застосовуються системи, побудовані за принципом зворотного зв'язку за регульованою величиною [3, 4], які часто характеризуються незадовільними показниками якості перехідних процесів. Більш ефективними є комбіновані САР, що використовують методи регулювання по відхиленню та обуренню [5].

Основним обуренням, яке призводить до коливань рівня металу, є швидкість витягування злитка тягнутою кліткою, яка розташовується в зоні, де заготовка вже практично повністю затверділа. Оскільки швидкість витягування змінюється в процесі розливання по відомому закону, її вплив на рівень металу можна заздалегідь компенсувати [3]. Комбіновані системи регулювання проектується з використанням принципу інваріантності, який полягає в компенсації впливу зовнішніх обурень довільного характеру на перебіг перехідних процесів в системі [5].

Зменшити вплив зовнішніх обурень можна або за рахунок збільшення коефіцієнта посилення контуру зі зворотним зв'язком по регульованій змінній, або за рахунок введення компенсуючих зв'язків по обуренню.

Оскільки підвищення коефіцієнта посилення веде до зниження запасів стійкості та погіршення якості перехідних процесів, запропонована в роботі САР побудована шляхом створення компенсуючого каналу передачі обурення.

Метою даної роботи є удосконалення САР рівня металу в кристалізаторі за рахунок застосування принципів теорії інваріантності, що дозволить підвищити точність регулювання, поліпшити якість продукції, безпеку та надійність роботи агрегату.

Виклад основного матеріалу. Рівень металу в кристалізаторі МБЛЗ контролюється електромагнітним датчиком рівня. Регулятор рівня реалізований програмно на базі контролера. При виникненні неузгодженості (різниці між заданим і поточним значеннями рівня) регулятор формує сигнал керування для регулюючого органа (РО) шляхом зміни положення стопорного затвора промковша. Стопорний затвор обладнаний гідравлічним виконавчим механізмом (ВМ). РО переміщується до тих пір, поки сигнал неузгодженості не буде зведено до нуля. При виникненні несправностей в гідравлічному ВМ стопорним затвором можна керувати вручну.

Стопорний затвор промковша разом із гідравлічним виконавчим механізмом є замкнутою слідкуючою САР, структура якої представлена на рис. 1.

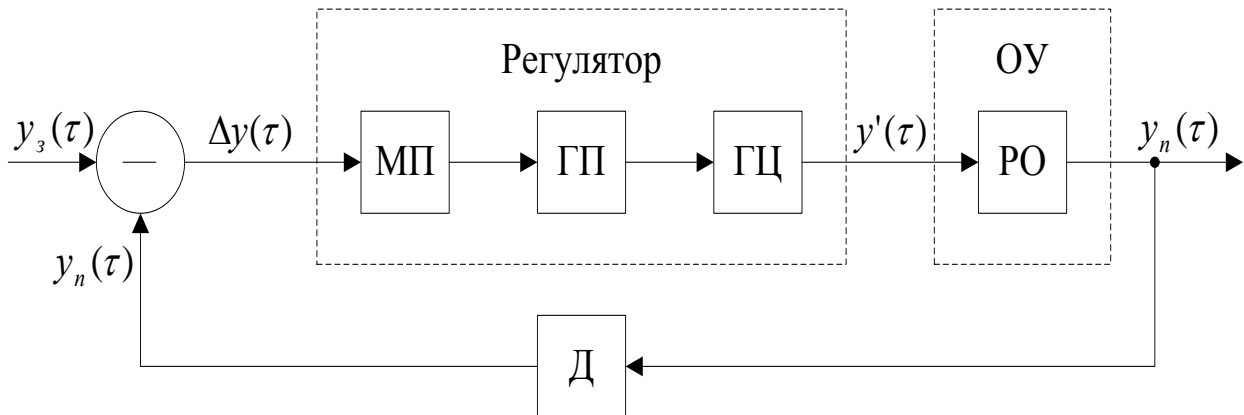


Рисунок 1 – Структура ВМ, розробленого у вигляді слідкуючої САР:
 Д – датчик положення РО; МП – мікропроцесорний пристрій
 ГП – гідравлічний перетворювач; ГЦ – гідравлічний циліндр

Інформація про поточне положення РО $y_n(\tau)$, яке контролюється датчиком Д, подається на пристрій формування сигналу помилки. Задане значення положення РО $y_3(\tau)$ надходить від регулятора рівня металу або встановлюється оператором вручну. Сигнал помилки $\Delta y(\tau)$ обчислюється як різниця між заданим і поточним значеннями положення РО. Регулятор являє собою сукупність мікропроцесорного пристрою МП, який реалізує алгоритм регулювання, гідравлічного перетворювача ГП і гідравлічного циліндра ГЦ. На вхід регулятора надходить сигнал помилки $\Delta y(\tau)$, а вихідною величиною є швидкість переміщення РО $y'(\tau)$. Об'єктом управління (ОУ) є стопорний затвор промковша, який можна розглядати як інтегруючу ланку. Вхідною величиною ОУ є його швидкість переміщення $y'(\tau)$, вихідною – поточне положення $y_n(\tau)$.

Виконавчий механізм (ВМ), розроблений у вигляді слідкуючої системи, працює таким чином, щоб в будь-який момент забезпечити рівність поточного положення РО заданому. Задане положення РО змінюється за певним законом і є функцією часу.

На рисунку 2 представлена структурна схема САР рівня металу в кристалізаторі. Вихідна величина об'єкта управління (поточне значення рівня $h_n(p)$) включає в себе дві складові: вихідну величину ОУ по каналу обурення (передавальна функція $W_{об}^z(p)$) і вихідну величину ОУ по каналу управління (передавальна функція $W_{об}(p)$). Вимірювальна система має передавальну функцію $W_{вим}(p)$. Отримане поточне значення рівня металу в кристалізаторі $h_n^{вим}(p)$ подається на вхід пристрою формування сигналу помилки.

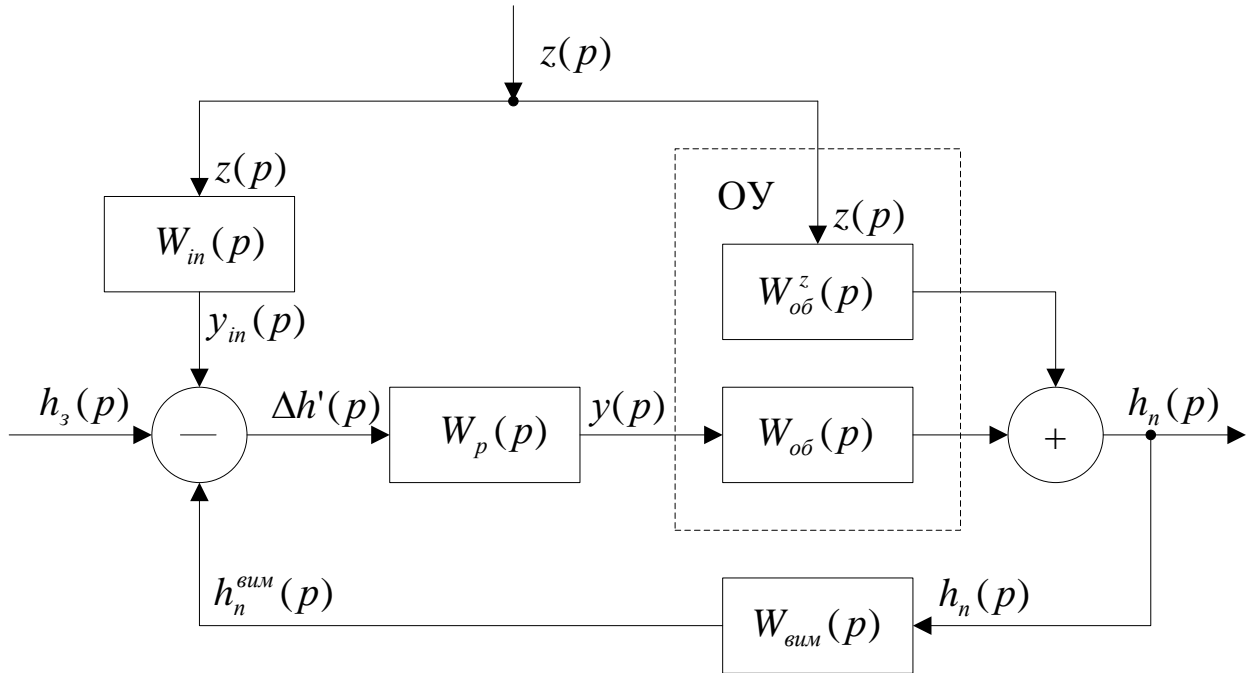


Рисунок 2 – Структурна схема САР рівня металу в кристалізаторі МБЛЗ

Для збільшення динамічної точності системи при наявності обурення по швидкості витягування злитка $z(p)$ запропонована комбінована система управління, яка використовує принципи управління по відхиленню та обуренню. Для цього до складу системи введений інваріантний перетворювач $W_{in}(p)$, сигнал якого $y_{in}(p)$ подається на вхід пристрою формування сигналу помилки.

Сигнал помилки $\Delta h'(p)$, який є функцією поточного виміряного $h_n^{вим}(p)$ і заданого $h_3(p)$ рівнів металу, а також вихідного сигналу інваріантного перетворювача $y_{in}(p)$, надходить на вхід регулятора $W_p(p)$. На підставі $\Delta h'(p)$ регулятор формує керуючий вплив $y(p)$, який подається на вхід ОУ.

Вихідною величиною САР є поточне значення рівня металу $h_n(p)$, а вхідними – задане значення рівня металу $h_3(p)$ і обурення за швидкістю витягування $z(p)$. Визначимо залежність вихідної величини від вхідних величин:

$$h_n(p) = W_{o\delta}(p)y(p) + W_{o\delta}^z(p)z(p); \quad (1)$$

$$y(p) = W_p(p)\Delta h'(p); \quad (2)$$

$$\Delta h'(p) = h_3(p) - h_n^{вим}(p) + y_{in}(p); \quad (3)$$

$$h_n^{вим}(p) = W_{вим}(p)h_n(p); \quad (4)$$

$$y(p) = W_p(p)(h_3(p) - W_{вим}(p)h_n(p) + W_{in}(p)z(p)); \quad (5)$$

$$h_n(p) = W_{об}(p)W_p(p)(h_z(p) - W_{вим}(p)h_n(p) + W_{ин}(p)z(p)) + W_{об}^z(p)z(p). \quad (6)$$

Після перетворень виразу (6) отримуємо:

$$h_n(p) = \frac{W_{об}(p)W_p(p)}{1 + W_{об}(p)W_p(p)W_{вим}(p)} \cdot h_z(p) + \frac{W_{об}^z(p) + W_{об}(p)W_p(p)W_{ин}(p)}{1 + W_{об}(p)W_p(p)W_{вим}(p)} \cdot z(p). \quad (7)$$

З виразу (7) видно, що САР рівня металу в кристалізаторі можна зробити інваріантною до обурення по швидкості витягування $z(p)$ при виконанні умови:

$$W_{об}^z(p) + W_{об}(p)W_p(p)W_{ин}(p) = 0, \quad (8)$$

тобто якщо вдасться реалізувати інваріантний перетворювач з передавальною функцією

$$W_{ин}(p) = -\frac{W_{об}^z(p)}{W_{об}(p)W_p(p)}. \quad (9)$$

Розглянемо передавальні функції складових системи.

За каналом управління ОУ апроксимується ідеальною інтегруючою ланкою:

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{p}. \quad (10)$$

Залежність рівня металу в кристалізаторі $h_n(\tau)$ від швидкості витягування злитка $v_p(\tau) = z(\tau)$ описується як ідеальна інтегруюча ланка:

$$h_n(\tau) = -\int_0^\tau z(\tau) d\tau, \quad (11)$$

тому передавальна функція ОУ за каналом обурення має вигляд:

$$W_{об}^z(p) = -\frac{1}{p}. \quad (12)$$

Вимірювальна система апроксимується аперіодичною ланкою з передавальною функцією:

$$W_{вим}(p) = \frac{K_{вим}}{T_{вим}p + 1}. \quad (13)$$

де $K_{вим}$ – коефіцієнт передачі вимірювальної системи; $T_{вим}$ – постійна часу вимірювальної системи, що визначається інерційністю засобів вимірювання.

Для поліпшення якості перехідних процесів в САР використовується ПІД-регулятор.

Загальна передавальна функція слідкуючої системи $W_{САР}(p)$ (стопорного затвора промковша з гідравлічним виконавчим механізмом) описується як зустрічно-паралельне з'єднання ланок: регулятора і ОУ з передавальними функціями $W_p(p)$ та $W_{об}(p)$ відповідно:

$$W_{САР}(p) = \frac{W_{об}(p)W_p(p)}{1 + W_{об}(p)W_p(p)}. \quad (14)$$

З виразу (14) передавальна функція регулятора дорівнює:

$$W_p(p) = \frac{W_{CAP}}{W_{o\sigma} - W_{CAP}W_{o\sigma}}. \quad (15)$$

Якщо передавальна функція регулятора буде відповідати виразу (15), то всю слідкуючу систему можна буде апроксимувати за допомогою однієї аперіодичної ланки:

$$W_{CAP}(p) = \frac{1}{T_{CAP}p + 1}. \quad (16)$$

ОУ апроксимується як ідеальна інтегруюча ланка з передавальною функцією:

$$W_{o\sigma}(p) = \frac{1}{p}, \quad (17)$$

тому залежність положення стопорного затвора від швидкості його переміщення має вигляд:

$$y_n(\tau) = \int_0^{\tau} y'(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Підставивши у вираз (15) передавальні функції слідкуючої CAP і ОУ

$$W_p(p) = \frac{\frac{1}{T_{CAP}p + 1}}{\frac{1}{p} - \frac{1}{p} \cdot \frac{1}{T_{CAP}p + 1}}, \quad (19)$$

отримаємо передавальну функцію регулятора:

$$W_p(p) = \frac{1}{T_{CAP}}. \quad (20)$$

Це П-регулятор з коефіцієнтом передачі

$$K_p = \frac{1}{T_{CAP}}. \quad (21)$$

Знаючи коефіцієнт передачі регулятора, можна висловити постійну часу системи:

$$T_{CAP} = \frac{1}{K_p}. \quad (22)$$

При збільшенні коефіцієнта передачі регулятора постійна часу слідкуючої САР T_{CAP} зменшується, тобто зменшується інерційність системи. За $K_p \rightarrow \infty$ та $T_{CAP} \rightarrow 0$ аперіодична ланка вироджується в пропорційну з коефіцієнтом передачі, рівним одиниці. При цьому положення стопорного затвора промковша буде дорівнювати заданому в будь-який момент часу незалежно від зміни заданого положення.

На практиці K_p завжди обмежений. Для даної системи максимальне значення K_p визначається часом повного ходу ВМ:

$$K_p = \frac{1}{T_{BM}} = \frac{1}{2c} = 0,5 \frac{\%XPO/c}{\%XPO}. \quad (23)$$

Аналіз структури слідкуючої системи, представленій сукупністю стопорного затвора промковша і гідравлічного виконавчого механізму, виявив можливість апроксимації даної САР за допомогою аперіодичної ланки.

Передавальна функція ПІД-регулятора рівня з баластною ланкою, якою апроксимується ВМ, дорівнює:

$$W_p(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{p} + T_d p\right) \frac{1}{T_{BM} p + 1}, \quad (24)$$

де K_p – коефіцієнт передачі регулятора, % XPO/мм; T_i – час інтегрування, с; T_d – час диференціювання, с; T_{BM} – постійна часу баластної ланки, яка дорівнює часу повного ходу ВМ, с.

Маючи передавальні функції елементів системи, за виразом (9) знайдемо передавальну функцію інваріантного перетворювача, структура якого зображена на рис. 3:

$$W_{in}(p) = -\frac{\frac{1}{p}}{\frac{K_{об}}{p} K_p \left(1 + \frac{1}{T_i} \cdot \frac{1}{p} + T_d p\right) \frac{1}{T_{BM} p + 1}}; \quad (25)$$

після перетворення:

$$W_{in}(p) = \frac{T_i}{K_{об} K_p} \cdot \frac{1}{T_i T_d p^2 + T_i p + 1} \cdot p \cdot (T_{BM} p + 1). \quad (26)$$

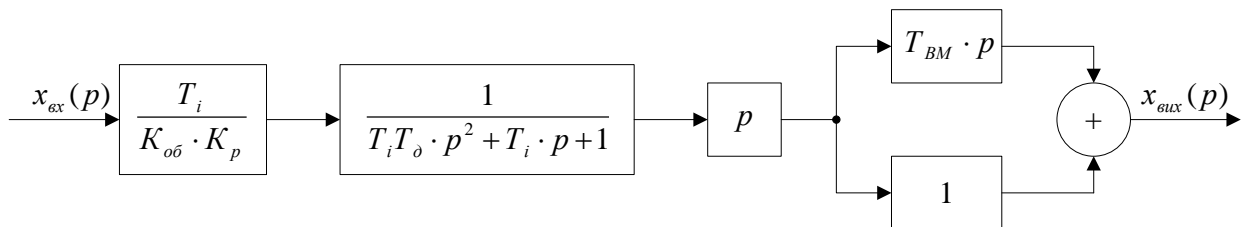


Рисунок 3 – Структура інваріантного перетворювача

До складу інваріантного перетворювача входять пропорційна ланка, інерційна ланка другого порядку та дві ідеальних диференціюючих ланки. Передавальна функція інваріантного перетворювача може бути реалізована на мікропроцесорному пристрої (контролері або ЕОМ).

Для дослідження роботи інваріантної САР рівня металу в кристалізаторі розроблена її комп'ютерна модель.

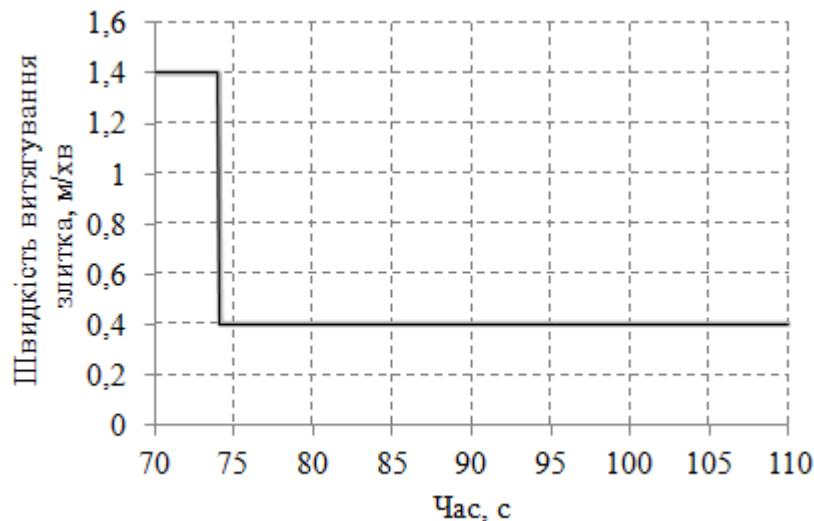
У моделі реалізовані передавальні функції окремих елементарних ланок, з яких зібрана структура інваріантної САР. Такий підхід робить програму універсальною і дозволяє використовувати її для моделювання інших САР.

Розроблена модель дозволяє в реальному масштабі часу змінювати задане значення рівня металу, швидкість витягування злитка, параметри налагодження регулятора, вмикати та вимикати інваріантний перетворювач, будувати тренди поточного і заданого значень рівня металу, а також швидкості витягування злитка.

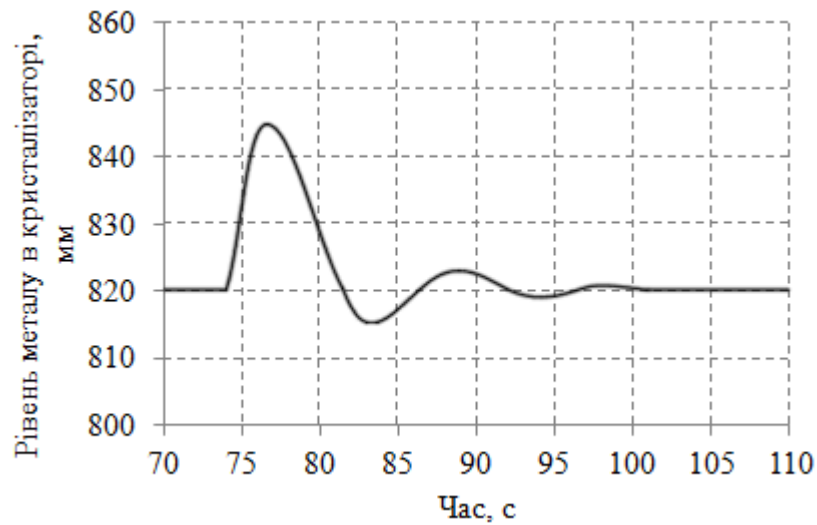
Досліджено вплив інваріантного перетворювача на роботу системи шляхом моделювання перехідного процесу по навантаженню з вимкненим та увімкненим інваріантним перетворювачем.

При вимкненому інваріантному перетворювачі та обуренні по навантаженню $\Delta z = 1,0 \text{ м/хв}$ (рис. 4, а) поточне значення рівня металу в кристалізаторі було приведене до заданого без статичної помилки (рис. 4, б). Динамічна помилка склала 25 мм , коефіцієнт перерегулювання – 20% , час регулювання – 30 с .

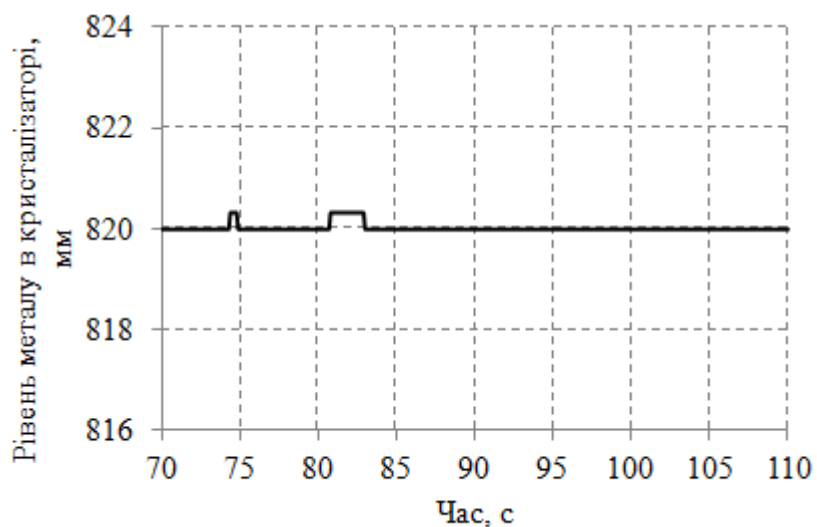
При увімкненому інваріантному перетворювачі таке ж за величиною обурення не викликало відхилення регульованої величини від заданого значення (рис. 4, в), тобто запропонована САР рівня металу нечутлива до зміни швидкості витягування злитка.



а)



б)



в)

Рисунок 4 – Перехідні процеси по навантаженню при обурюючому впливі (а), вимкненому (б) та увімкненому (в) інваріантному перетворювачі

ВИСНОВКИ

Для підвищення динамічної точності САР рівня металу в кристалізаторі при наявності обурення по швидкості витягування злитка запропоновано застосувати комбіновану систему управління, яка використовує принципи регулювання по відхиленню та обуренню.

Розроблено структуру комбінованої САР рівня металу. На основі аналізу передавальної функції системи сформульовані умови її інваріантності до зміни швидкості витягування та знайдена передавальна функція інваріантного перетворювача.

Для вивчення особливостей функціонування розробленої САР створена програмна

модель. Проведені на моделі дослідження показали, що за наявності інваріантного перетворювача робота САР не залежить від величини та характеру обурюючого впливу.

Впровадження розробленої САР дозволить оптимізувати процес регулювання рівня металу в кристалізаторі, а, отже, підвищити якість продукції, безпеку та надійність роботи агрегату.

Перелік використаних джерел:

1. Буланов, Л. В. Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов. – Екатеринбург : Уральский центр ПР и рекламы «Марат», 2004. – 449 с.
2. Смирнов, А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – 482 с.
3. Чернышев, Н. Н. Комбинированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н. Н. Чернышев // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту / ДонНТУ : всеукр. наук. зб. Серія : Обчислювальна техніка та автоматизація. – Покровськ, 2013. – Вип. 2 (25). – С. 72–78.
4. Непрерывная разливка сортовой заготовки : монография / А. Н. Смирнов [и др.]. – Донецк : Цифровая типография, 2012. – 417 с.
5. Попов, Е. П. Теория систем автоматического управления / Е. П. Попов, В. А. Бесекерский. – СПб. : Профессия, 2003. – 752 с.

Черевко Е. А., Щербаков С. В., Шаповалов А. И.

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ

Существенное влияние на качество поверхности слитка оказывает работа системы автоматического регулирования (САР) уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ. Перерывы струи металла, поступающего в кристаллизатор, а также колебания уровня приводят к образованию поверхностных дефектов слитка. Большие отклонения от заданного уровня могут приводить к возникновению аварийных ситуаций.

Выполнен анализ работы существующей САР уровня металла в кристаллизаторе. Установлено, что основным возмущением по нагрузке, приводящим к колебаниям уровня, является изменение скорости вытягивания слитка, происходящее при смене промковша и разливного стакана, при переходе на второй стопор промковша, при срабатывании системы предупреждения прорывов и другим причинам.

Для повышения динамической точности стабилизации уровня металла предложена структурная схема комбинированной САР, использующей принципы управления по отклонению и возмущению. Внесены соответствующие предложения по совершенствованию системы.

Функционирование системы управления проверено на моделях. Доказано, что разработанная САР абсолютно инвариантна к возмущению по нагрузке.

Исследования показали, что предложенные решения позволяют существенно улучшить условия вторичного охлаждения слитка, повысить качество стабилизации уровня

металла в кристаллизаторе, и, как следствие, качество конечной продукции.

Ключевые слова: МНЛЗ, слиток, кристаллизация, вторичное охлаждение, система автоматизированного управления, инвариантность, компьютерное моделирование.

Cherevko O. O., Shcherbakov S. V., Shapovalov A. I.

INVARIANT SYSTEM OF AUTOMATIC REGULATION OF THE METAL LEVEL IN THE CCM CRYSTALLIZER

The operation of the automatic control system (ACS) of the metal level in the continuous casting crystallizer has a significant impact on the surface quality of the ingot. Breaks in the stream of metal entering the crystallizer, as well as level fluctuations lead to the formation of surface defects of the ingot. Large deviations from the set level can lead to emergencies.

The analysis of the operation of the existing ACS metal level in the crystallizer has done. It has been established that the main disturbance in the load, which leads to level fluctuations, is a change in the ingot pulling speed that occurs when changing the bucket and the pouring nozzle, when switching to the second bucket stopper, when the breakout warning system is triggered, and for other reasons.

To increase the dynamic accuracy of stabilization of the metal level, a block diagram of a combined ACS is proposed, using the principles of control for deviation and perturbation. Corresponding proposals have been made to improve the system.

The functioning of the control system is tested on models. It is proved that the developed ACS is absolutely invariant to load disturbance.

Research have shown that the proposed innovations can significantly improve the conditions of the secondary cooling of the ingot, improve the quality of stabilization of the metal level in the crystallize, and, as a result, the quality of the final product.

Keywords: continuous casting machine, ingot, crystallization, secondary cooling, automated control system, invariance, computer simulation

Рецензент: канд. техн. наук, доц. Воротнікова З. Є.

Стаття надійшла

УДК 004.92

Ясінська Т. А., Федотова Н. А., Вашенко С. М.

ВЕБ-РЕСУРС ВІЗУАЛІЗАЦІЇ 3D-МОДЕЛЕЙ

Стаття присвячена вирішенню актуальної практичної задачі візуалізації 3D-моделей різних форматів без спеціалізованого програмного забезпечення. Проведено аналіз сучасного стану питання, технологій реалізації та ресурсів-аналогів. Згідно сучасних тенденцій розвитку інформаційних технологій реалізацію виконано у форматі веб-ресурсу. Базовою технологією реалізації висунутих функціональних вимог обрано WebGL.

Даний вид технологій застосовується на веб-сторінках Інтернет-магазинів, різних фірм, в системі дистанційного навчання. Причиною даного явища є те, що за рахунок