

УДК 004.942:669

**І.О. ГАРМАТЕНКО, В.В. ПОЦЕПАЄВ** (канд. техн. наук, доцент)  
**Державний вищий навчальний заклад**  
**«Донецький національний технічний університет»**  
**igoren92@gmail.com, potsepaev56@mail.ru**

## **МОДЕРНІЗОВАНА САУ РІВНЯ МЕТАЛУ В КРИСТАЛІЗАТОРІ МБЛЗ**

*Розглядається система регулювання рівня металу в кристалізаторі за допомогою стопорного механізму. Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що застосування комбінованої системи регулювання дозволяє значно зменшити відхилення рівня від необхідного значення в перехідних режимах роботи. Досліджується зміна видаєткової характеристики стопорного дозуючого пристрою в процесі безперервного розливання металу на МБЛЗ і його вплив на роботу системи управління процесом безперервного розливання. Розроблено алгоритм оцінки зміни пропускної здатності каналу дозування рідкої сталі в кристалізатор в процесі розливання на основі математичної моделі і даних вимірювань.*

**Ключові слова:** кристалізатор, МБЛЗ, компенсатор, Matlab, погрузна склянка, витратна характеристика, стопор, рівень металу, промковш, збурюючий вплив, пропускна здатність, алгоритм.

### **Постановка проблеми**

Регулювання рівня металу в кристалізаторі має першорядне значення для процесу безперервного розливання, тому що якість злитків у великому ступені залежить від точності регулювання. Цей рівень у процесі розливання повинен перебувати в досить вузьких заданих межах, що обумовлено наступними причинами виникнення аварійних ситуацій: перевищення рівня може привести до переливу металу через верх кристалізатора; зниження рівня нижче припустимої межі приводить до одержання в межах кристалізатора тонкої скоринки злитка, її розриву й прориву рідкого металу під кристалізатором.

Значні коливання рідкого металу порушують також стабільність охолодження злитка в кристалізаторі, змінюють умови кристалізації й позначаються на якості безперервно литого злитка.

Підтримання постійного рівня забезпечується за рахунок дозування сталі, що витікає з проміжного ковша. Застосовуються такі методи дозування:

- вільне витікання металу;
- використання стопорного механізму;
- використання шиберного затвору.

На металургійних заводах найбільшого поширення набув метод дозування витікаючої з проміжного ковша сталі з використанням стопорного затвору. Стопорний механізм переміщається щодо стакану-дозатора і змінює витрати металу, що надходить в кристалізатор з проміжного ковша

Висока стабільність рівня металу в кристалізаторі машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) є необхідною умовою отримання металу високої якості. Однак цей процес піддається впливу збурень, серед яких найбільш значущими є:

- зміна швидкості втягування;
- нелінійність характеристик елементів системи;
- заростання стакану-дозатора і погрузного стакану;
- розмивання і розбивання стакану-дозатора;
- конструктивно зумовлені обурення: забивання, люфти і т.п.;
- хвильові явища на поверхні металу в кристалізаторі.

Аналіз роботи МБЛЗ показав, що заростання каналу дозування рідкого металу (що складається з стакану-дозатора і погрузного стакану) є серйозною проблемою, оскільки при тривалому розливанні відбувається зменшення його робочого діаметру. Шар відкладень впливає на характер потоку металу через дозуючий пристрій, формує несиметричний потік в кристалізаторі і в цілому створює додаткові виробничі проблеми, погіршення якості продукції, виникає загроза відриву неметалічних включень і забруднення злитка.

Крім того, це впливає на роботу системи управління, оскільки змінюється витратна характеристика каналу дозування і істотно обмежується максимальна витрата металу в кристалізатор. Тому врахування ступеня заростання погрузного стакану для корекції керуючих впливів формованих системою автоматичного управління рівнем металу в кристалізаторі МБЛЗ є актуальним завданням[1].

### **Мета**

Мета дослідження полягає в підвищенні якості системи управління виробництвом литих заготовок шляхом модернізації системи автоматичного управління рівнем металу в кристалізаторі МБЛЗ з урахуванням збурюючих впливів: зміни швидкості втягування заготовки і зміни пропускної здатності каналу дозування рідкого металу в процесі розливання.

© Гарматенко І.О., Поцєпаєв В.В., 2015

### Математична модель системи

На рисунку 1 представлена структурна схема системи регулювання рівня металу в кристалізаторі.

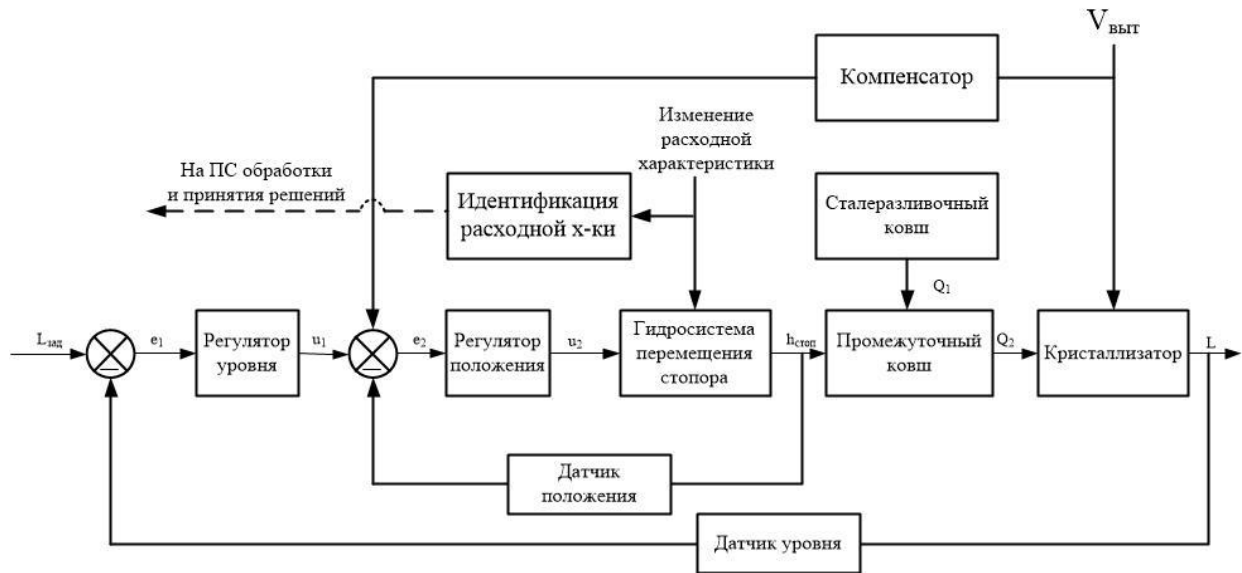


Рисунок 1 – Структурна схема системи регулювання рівня металу в кристалізаторі

Диференціальне рівняння, що описує зміну рівня сталі в сталерозливному ковші при вільному її витіканні через отвір на дні ковша:

$$\frac{dV_c}{dt} = -Q_1(H_c, t), \quad V_c = S_c(H_c, t) \cdot H_c(t), \quad Q_1(H_c, t) = S_0 \mu (2gH_c(t))^{1/2}, \quad (1)$$

де  $V_c$  – об'єм сталі,  $m^3$ ;  $Q_1$  – витрата витікаючої сталі через отвір,  $m^3/c$ ;  $\mu$  – коефіцієнт витікання металу з отвору, що враховує тертя і швидкість;  $S_0 = \pi r^2$  – площа отвору,  $m^2$ .

$$\frac{dH_c}{dt} = -S_0 \mu S_c(H_c, t)^{-1} (2gH_c(t))^{1/2}. \quad (2)$$

Динамічні властивості проміжного ковша МБЛЗ стопорного типу характеризуються наступним рівнянням:

$$\frac{dH_n}{dt} = \frac{Q_1 - Q_2}{\rho F(H_n)}, \quad (3)$$

де  $H_n$  – рівень,  $m$ ;  $Q_1$  – надходження металу з сталеразливочного ковша,  $kg/c$ ;

$Q_2$  – витрата металу з проміжного ковша,  $kg/c$ ;  $\rho$  – щільність металу,  $kg/m^3$ ;

$F(h)$  – площа дзеркала металу в промковші,  $m^2$ .

Витрата металу з проміжного ковша в кристалізатор:

$$Q_2(t) = S_{доз}(t) \mu \sqrt{2gH_n}, \quad (5)$$

де  $S_{доз}(t) = \pi d^2(t)/4$  – поточне значення прохідного перерізу вихідного отвору дозатора, яке залежить від висоти підняття стопора [ $m^2$ ].

Рівень металу в кристалізаторі  $L_{кр}$  пов'язаний з величиною витрати сталі із промковша й витратою сталі із кристалізатора рівнянням виду:

$$S_{кр} \frac{dL_{кр}}{dt} = Q_2(t) - Q_3(t), \quad (6)$$

де  $S_{кр}$  – площа перетину кристалізатора, [ $m^2$ ].

Витрата металу з кристалізатора пропорційна швидкості витягування заготовки і площі перетину кристалізатора:

$$Q_3(t) = S_{кр}(t) V_{выт}(t), \quad (7)$$

де  $V_{выт}$  – швидкість витягування заготовки.

Якщо зовнішні збурювання, що впливають на об'єкт керування, можна вимірювати до того, як вони пройдуть на вихід системи, той їхній вплив можна істотно послабити за допомогою прямого зв'язку. Прямий зв'язок

дозволяє компенсувати похибку швидше, ніж зворотний зв'язок виявить помилку як різницю між керованою величиною й керуючим впливом. Швидкість витягування змінюється за відомим законом у процесі розливання, а отже, її вплив на величину рівня металу в кристалізаторі може бути заздалегідь скомпенсований.

$$K_{\text{компенсатора}} = \frac{K_{\text{выт}} \cdot S_{\text{кр}}}{K_{\text{рас}}} \quad (8)$$

**Моделювання перехідних процесів в системі управління**

Моделювання виконано в пакеті Matlab&Simulink. На рисунку 2 представлені схеми моделювання.

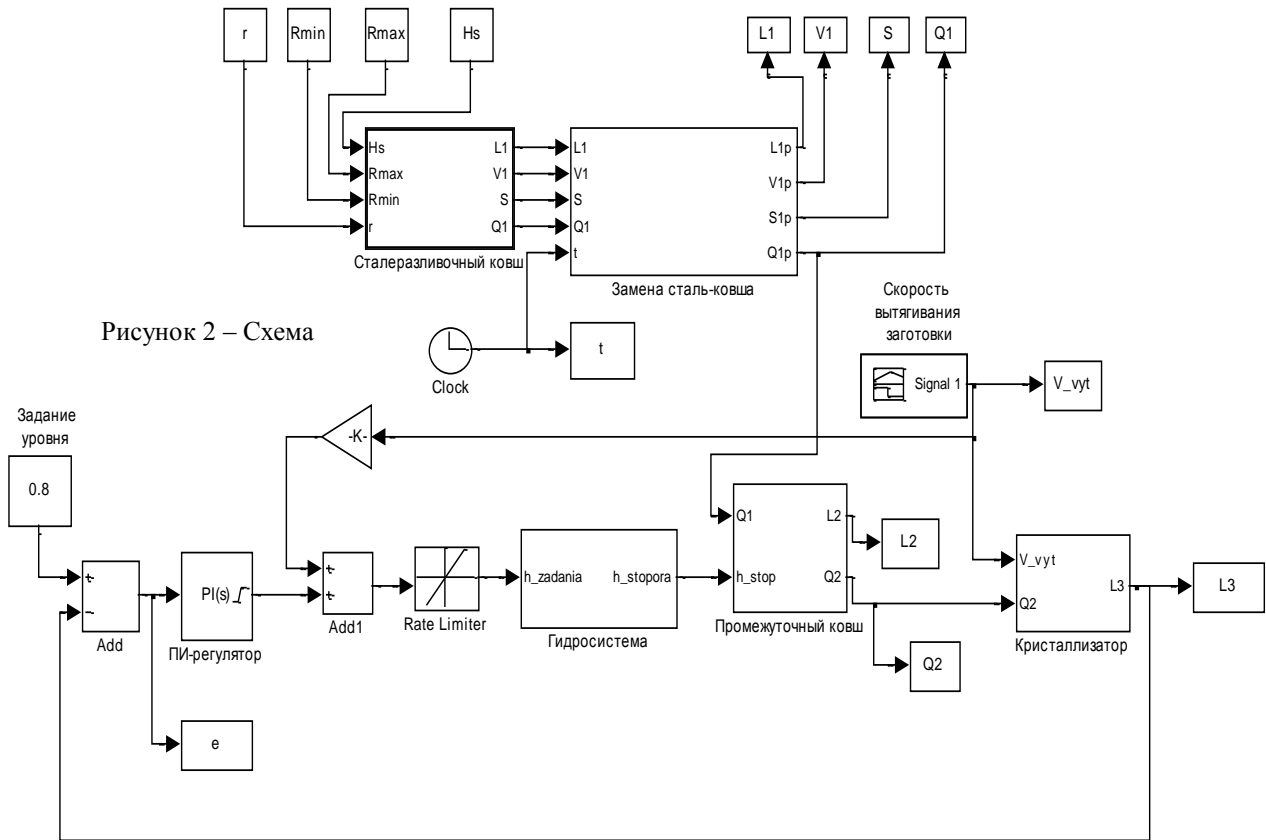


Рисунок 2 – Схема

Рисунок 2 – моделювання в Matlab&Simulink

На рисунках 3-5 представлені графіки перехідних процесів.

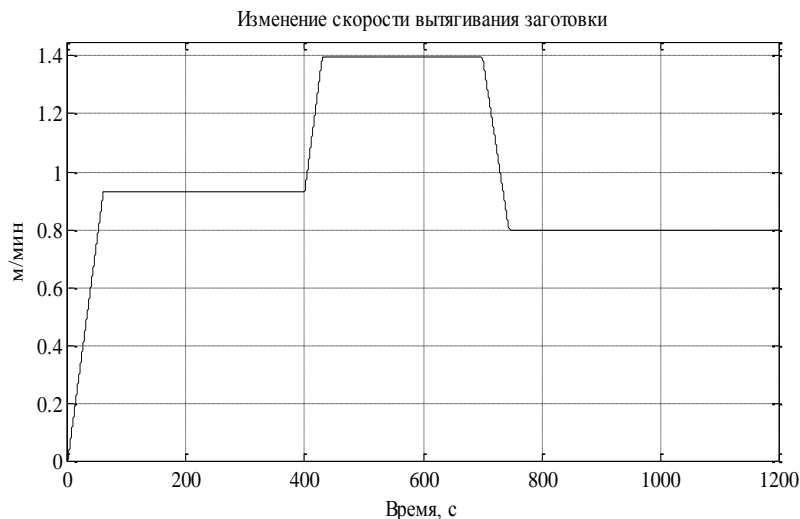


Рисунок 3 – График збурюючого впливу

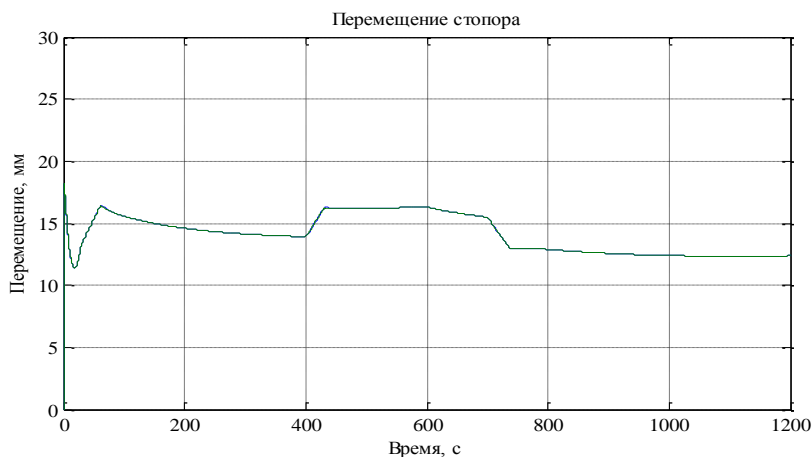


Рисунок 4 - Графік переміщення стопора

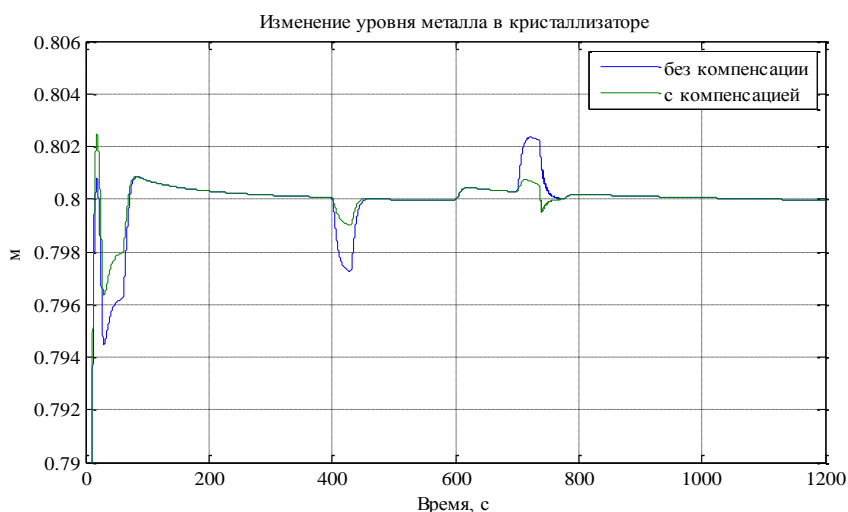


Рисунок 5 - Графік зміни рівня металу

Застосування компенсатору дозволяє зменшити відхилення рівня металу від заданого значення майже у 2 рази.

#### Оцінка ступеня заростання каналу дозування металу

При тривалому розливанні заростання внутрішньої порожнини погрузної склянки є значною проблемою, оскільки залежно від матеріалу склянки, складу розливної сталі, вже через кілька годин після початку розливання виникає необхідність у заміні стакану (рисунок 6). Це відбувається внаслідок зменшення його робочого діаметра до такої міри, що навіть при граничному значенні висоти підйому стопора не забезпечується необхідна витрата металу в кристалізатор і стає неможливим забезпечувати задану швидкість розливання. Крім того, зростає загроза відриву відкладень і, отже, забруднення злитка неметалевими включеннями.



Рисунок 6 – Фотографія заростання внутрішньої порожнини погрузного стакану включеннями глинозему (а) і схематичне зображення характеру зносу погрузного склянки в процесі розливання (б)

При стопорному розливанні витрата металу з промковша  $Q_1(t)$  визначається відповідно витратною характеристикою стопора і відповідає  $G_1(h_{\text{стопора}})$ , тобто можна вважати, що

$$G_1(t) = Q_1(t). \quad (9)$$

При заростанні сталевипускного каналу, робоча область зсувається і може виявитися на нелінійній ділянці (рисунок 3).

Оскільки поточні значення  $h_{\text{стопора}}$ ,  $L$  і  $V_{\text{выт}}$  вимірюються, то вирішити зворотну задачу і визначити поточну витратну характеристику  $G_1(h_{\text{стопора}})$  можна відповідно до виразу:

$$G_1(t) = Q_1(t) = S_{\text{кр}} \frac{dL_{\text{кр}}(t)}{dt} + S_{\text{кр}} k_{\text{выт}} V_{\text{выт}}(t) = S_{\text{кр}} \left( \frac{dL}{dt} + k_{\text{выт}} V_{\text{выт}} \right) \quad (10)$$

Оскільки  $h_{\text{стопора}}(t)$  і  $G_1(t)$  для одних і тих же моментів  $t$  буде відомо, то можна отримати залежність  $G_1(h_{\text{стопора}})$ . В результаті моделювання системи була отримана витратна характеристика, приведена на рисунку 5.

На рисунку 7 приведені задана витратна характеристика і характеристика, змінена в процесі розливки при виникненні заростання.

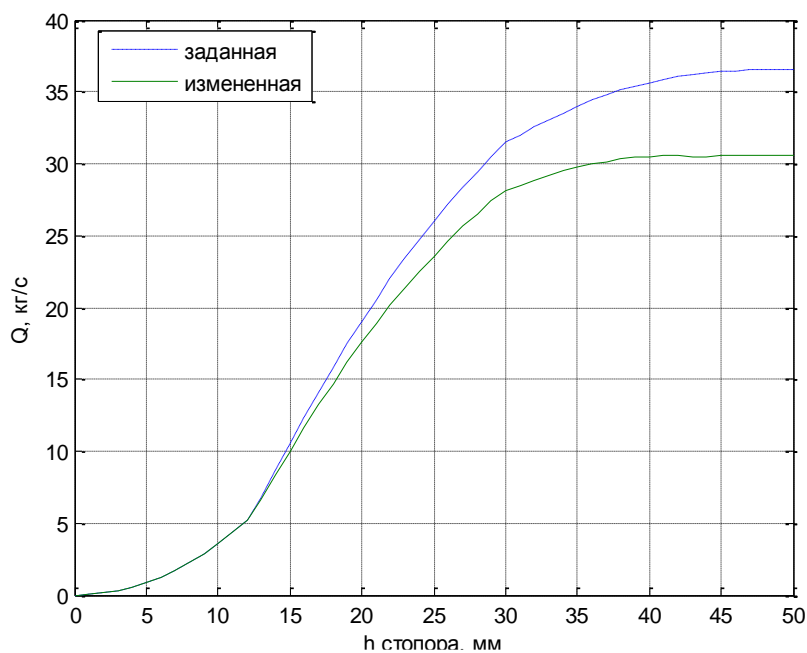


Рисунок 7 - Витратні характеристики стопорної системи

Практичне застосування отриманих результатів відображено в розробці алгоритму взаємодії локальної системи управління рівнем з системою управління безперервної розливанням.

Запропонований алгоритм полягає в наступному. На початку роботи МБЛЗ знімається вихідна («еталонна») витратна характеристика стопорної системи і зберігається в базі даних. Через деякі проміжки часу на основі даних вимірювань з датчиків швидкості витягування  $V_{\text{выт}}$ , рівня  $L$  і лінійного переміщення стопора  $l$  у відповідності з виразом (10) обчислюється поточна витратна характеристика в робочій області. Потім визначається ступінь її невідповідності вихідної (рисунок 7), тобто оцінюється, наскільки знизилася пропускна здатність каналу дозування.

Якщо зниження пропускної здатності перевищило задану межу - видається повідомлення оператору, який приймає рішення по даній ситуації (необхідність заміни склянки, зниження швидкості розливання і т.д.).

#### Висновки

Розроблено структурну схему комбінованої системи регулювання рівнем металу в кристалізаторі безперервної машини лиття заготовок. На підставі принципу інваріантності знайдений статичний компенсатор, що має просту структуру і фізичну реалізацію.

Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що розроблена модифікація системи автоматичного регулювання забезпечує зменшення відхилення рівня металу в кристалізаторі в 2 рази в порівнянні з існуючою при зміні швидкості витягування заготовки. Запропоновано метод оцінки ступеня заростання каналу дозування

рідкої сталі в процесі розливання на основі прямих вимірювань рівня, швидкості витягування заготовки та лінійного переміщення стопорного механізму.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чернышев Н.Н. Синтез математической модели системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н. Чернышев // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології», гол. ред. В.Ф.Євдокимов. – Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, 2012. – Випуск 65. – С. 195-202.
2. SIMETAL LevCon. Mold level control and stability with the utmost precision. – Режим доступа: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-LevCon-en.pdf>
3. Гарматенко И.А. Разработка математической модели САУ уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ / И.А. Гарматенко // Автоматизация технологических и бизнес процессов, г. Одесса, 2014. – Выпуск №2(18). – с.88-92.

#### REFERENCES

1. NN Chernyshev Synthesis matematycheskoy model system of automatic regulation urovnem metal in crystallizer / NN Chernyshev // Collected Works "Modeling and Information Technologies", Ch. Ed. V.F.Yevdokymov. - Kyiv: Institute for Modelling in Energy Engineering. GE Puchov, 2012. - Issue 65. - P. 195-202.
2. SIMETAL LevCon. Mold level control and stability with the utmost precision. – Access: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industriesolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-LevCon-en.pdf>
3. Garmatenko I.A. Razrabotka matematycheskoy modely SAU urovnya metala in crystallizer MNLZ// IA Garmatenko// Tehnologhycheskyh automation and business processes, d Odessa, 2014. - issue №2 (18). - S.88-92.

*Надійшла до редколегії 01.12.2015*

*Рецензент: Саенко Ю.Л.*

I.A.GARMATENKO, V.V. POTSEPAEV

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

**The modernized system of the automatic control of metal level in the mold.** *Stabilization of the metal in the mold during continuous casting of steel is needed to ensure a high quality ingot, increasing the metal yield, reduce the time and improve the safety of the casting process. Maintaining a constant level provided stopper mechanism steel arising from tundish. Reducing deflection of the metal in the mold by improving the system of automatic control, ensuring stabilization of the performance and the constraints set production schedules when the speed of the ingot. Main disturbance has a significant impact on the level, is pulling speed billet pulling crate, which is located in the area where harvesting is almost completely hardened. Pulling speed varies according to certain laws in the casting process, and therefore can be pre-compensated for its influence on the metal level. Thus, it is advisable to use the principle of combined control based compensation controlled perturbations (ingot pulling rate) and the feedback process variable (level of metal). The block diagram of the combined system of regulation of the metal in the mold of continuous casting machines is provided. Based on the principle of invariance found static compensator has a simple structure and physical implementation. Computer simulation found that the modification designed automatic control system provides a reduction of deviation of the metal in the mold by 3-4 times compared to the existing system of automatic control. The change in the flow characteristics of the locking of the metering device in the process of continuous casting of metal in the CCM and its impact on the work of the process control system of continuous casting. An algorithm for assessing change in throughput channel capacity dosing of liquid steel into the mold in Various Application-based mathematical models and measurement data. Conclusions: The structure of the combined control system of level metal in the mold of continuous casting machines is developed. On the basis of the principle of invariance a static compensator is determined. It has a simple structure and physical implementation. Computer simulation revealed that the modernized automatic control system provides reduction of deviation mold level by 2 times in comparison with existing when changing the drawing speed of the billet. A method of estimating the degree of overgrowth dispensing channel of liquid steel casting process based on direct measurements of the level, speed stretching the preform and the linear movement of the locking mechanism is suggested.*

**Keywords:** *mold, caster, equalizer, Matlab, submersible glass, costly description, the stopper, the level of metal tundish, perturbations, bandwidth algorithm.*