

УДК 681.5:661.2

**Н.Н. Чернышев (канд. техн. наук, доц.)**  
ГБУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: [kolyachernishov@mail.ru](mailto:kolyachernishov@mail.ru)

## КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЕМ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ

*Рассматривается система регулирования уровнем металла в кристаллизаторе с помощью стопорного механизма. Предложен принцип комбинированного управления уровнем металла в кристаллизаторе. Найдена структура и параметры компенсатора уменьшающего влияние скорости вытягивания заготовки на качество поддержания уровня металла в процессе непрерывной разливки. Методом компьютерного моделирования установлено, что применение комбинированной системы регулирования позволяет значительно уменьшить отклонение уровня от требуемого значения в переходных режимах работы.*

**Ключевые слова:** уровень металла, кристаллизатор, комбинированная система, компенсатор, математическая модель, нелинейность.

### Общая постановка проблемы

Стабилизация уровня металла в кристаллизаторе в процессе непрерывной разливки стали необходима для обеспечения высокого качества слитка, увеличения выхода годного металла, сокращения времени и повышения безопасности процесса разливки. Поддержание постоянного уровня обеспечивается за счёт дозирования стали вытекающей из промежуточного ковша. Применяются следующие методы дозирования [1,2,3]:

- свободное истечение металла;
- использование стопорного механизма;
- использование шиберного затвора.

На металлургических заводах наибольшее распространение получил метод дозирования стали при помощи стопорного механизма. Стопорный механизм перемещается относительно стакана-дозатора и изменяет расход поступающего металла в кристаллизатор из промежуточного ковша [4,5,6,7].

При стопорной разливке основными возмущениями, которые оказывают влияние на уровень металла в кристаллизаторе, являются [7,8]:

- изменение скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора;
- размывание или разрушение головки стопора;
- зарастание внутренней полости стакана-дозатора;
- волнообразование на поверхности металла в кристаллизаторе;
- люфты в приводе и стопорном механизме.

В таких случаях даже при оптимальных настройках регуляторов система регулирования уровнем, построенная по принципу обратной связи, характеризуются неудовлетворительными показателями качества переходных процессов. Более эффективным способом управления является комбинированное управление на основании компенсации возмущений и обратной связи по регулируемой координате [9,10].

### Цель работы

Уменьшение отклонения уровня металла в кристаллизаторе за счет совершенствования системы автоматического регулирования, обеспечивающей стабилизацию уровня и выполнение ограничений, заданных технологическим регламентом при изменении скорости вытягивания заготовки.

### Постановка задачи

Разработать модификацию системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе инвариантную к действию внешних возмущений (скорости вытягивания заготовки) в заданных диапазонах.

### Функциональная схема комбинированной системы регулирования

Для поддержания уровня металла в кристаллизаторе наиболее часто применяется принцип обратной связи по регулируемой переменной (рис. 1) [2,5,12,13]. Основным возмущением, оказывающим существенное влияние на уровень, является скорость вытягивания заготовки тянущей клетью, которая располагается в зоне, где заготовка уже практически полностью затвердела.

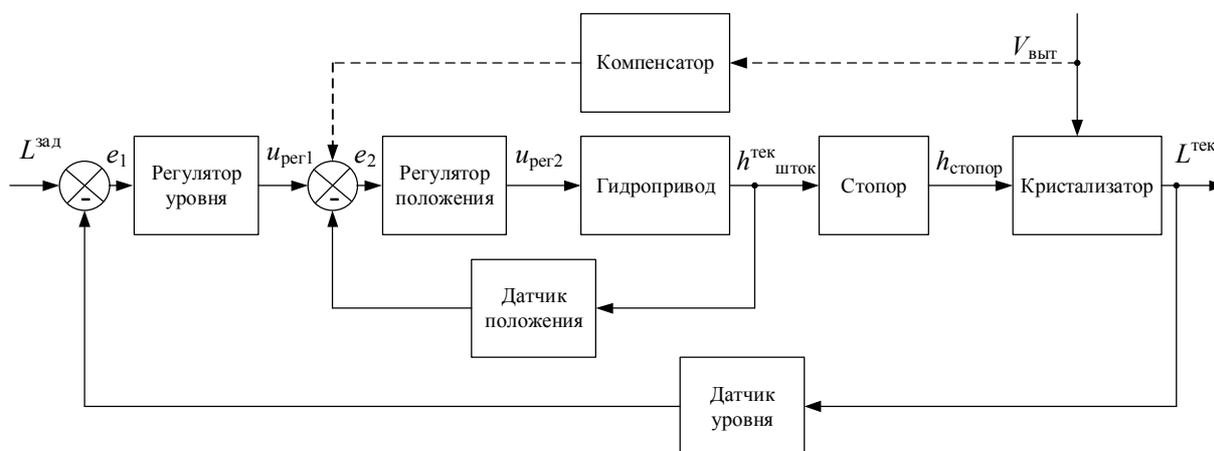


Рисунок 1 – Функциональная схема комбинированной системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе

Скорость вытягивания изменяется по известному закону в процессе разливки, а значит, может быть заранее скомпенсировано ее влияние на величину уровня металла в кристаллизаторе. При синтезе компенсирующих устройств применяется принцип инвариантности, который заключается в том, что отклонение выходной переменной от заданного значения должно быть равно нулю при любых задающих или возмущающих воздействиях [9,11].

Уменьшить влияние внешних возмущений можно двумя способами:

- 1) увеличивать петлевое усиление контура с обратной связью по регулируемой переменной;
- 2) найти обратную модель по каналу «точка приложения сигнала от компенсатора – регулируемая переменная».

Повышение коэффициента передачи приведет к снижению запасов устойчивости и ухудшению качества переходных процессов. При использовании второго способа, реализация обратной динамики объекта управления является проблематичной задачей, поэтому достижение полной инвариантности в реальных системах управления практически невозможно. По этим причинам обычно ограничиваются частичной инвариантностью или используют статические модели, что существенно упрощает задачу нахождения обратной модели объекта управления.

Для компенсации неконтролируемых возмущений, используется обратная связь по регулируемым переменным – уровень металла и перемещение штока гидроцилиндра.

**Синтез компенсатора для комбинированной системы регулирования**

Для нахождения структуры и параметров компенсатора запишем уравнения для каждого структурного звена системы регулирования (рис. 1).

Динамические характеристики гидропривода описываются дифференциальным уравнением [8,11,14]:

$$T_{\text{гц}} \frac{d^2 h_{\text{шток}}}{dt^2} + \frac{dh_{\text{шток}}}{dt} = k_{\text{гц}} h_{\text{зол}}(t), \quad (1)$$

где  $h_{\text{шток}}$  – перемещение штока, мм;  $h_{\text{зол}}$  – перемещение золотника, мм;  $k_{\text{гц}}$  – скорость перемещения штока, мм/с;  $T_{\text{гц}}$  – постоянная времени гидроцилиндра, с.

Высота подъема стопорного механизма однозначно определяется перемещением штока гидроцилиндра, поэтому

$$T_{\text{ст}} \frac{dh_{\text{стопор}}}{dt} + h_{\text{стопор}}(t) = k_{\text{ст}} h_{\text{шток}}(t), \quad (2)$$

где  $h_{\text{стопор}}$  – перемещение стопора, мм;  $k_{\text{ст}}$  – коэффициент передачи стопора, мм/мм;  $T_{\text{ст}} = T_{\text{гц}}$  – постоянная времени стопора, с.

Динамические характеристики кристаллизатора описываются уравнениями:

1) уровень металла в кристаллизаторе:

$$S_{\text{кр}} \frac{dL_{\text{кр}}}{dt} = Q_1(t) - Q_2(t), \quad (3)$$

где  $Q_1$  – объемный расход металла в кристаллизатор, м<sup>3</sup>/с;  $Q_2$  – объемный расход металла из кристаллизатора, м<sup>3</sup>/с;  $S_{\text{кр}}$  – площадь сечения кристаллизатора, м<sup>2</sup>.

2) расход металла из промежуточного ковша:

$$Q_1(t) = f(h_{\text{стопор}}), \quad (4)$$

будем считать, что является линейным, т.е.

$$Q_1(t) = k_{\text{рас}} h_{\text{стопор}}(t), \quad (5)$$

где  $k_{\text{рас}}$  – коэффициент расхода, (м<sup>3</sup>/с)/мм.

3) расход металла из кристаллизатора:

$$Q_2(t) = S_{\text{кр}} k_{\text{выт}} V_{\text{выт}}(t), \quad (6)$$

где  $V_{\text{выт}}$  – линейная скорость вытягивания слитка, м/мин;  $k_{\text{выт}} = 1/60$  – коэффициент пересчета размерности, мин/с.

Применяемые средства измерения обладают меньшими постоянными времени по сравнению с объектом управления, поэтому математическую модель датчиков можно представить безинерционными звеньями.

Передаточная функция компенсатора находится по формуле:

$$W_k(s) = - \frac{W_{\text{воз}}(s)}{W_{\text{упр}}(s)}, \quad (7)$$

где  $W_{\text{воз}}(s)$  – передаточная функция по каналу «скорость вытягивания – уровень металла»;  $W_{\text{упр}}(s)$  – передаточная функция по каналу «сигнал управления регулятора уровня – уровень металла».

Для нахождения статического компенсатора, необходимо найти отношение коэффициентов передачи этих передаточных функций. Из уравнения (3), с учетом (5) и (6), коэффициент усиления  $k_{\text{воз}}$  передаточной функции  $W_{\text{воз}}(s)$  равен  $k_{\text{выт}}$ . Коэффициент усиления  $k_{\text{упр}}$  передаточной функции  $W_{\text{упр}}(s)$  равен

$$k_{\text{упр}} = k_{\text{рп}} k_{\text{стопор}} k_{\text{рег}}, \quad (8)$$

где  $k_{\text{рп}} = 1$  – коэффициент усиления передаточной функции  $W_{\text{рп}}(s)$  замкнутой системы регулирования положением штока гидроцилиндра;  $k_{\text{ст}} = 1$  – коэффициент усиления

передаточной функции  $W_{\text{стопор}}(s)$  стопора;  $k_{\text{рег}}$  – коэффициент усиления передаточной функции  $W_{\text{рег}}(s)$  по каналу «перемещение стопора – уровень металла».

Коэффициент усиления  $k_{\text{рег}}$  найдем из уравнения (3), с учетом (5) и (6):

$$k_{\text{рег}} = k_{\text{рас}} S_{\text{кр}}^{-1}, \tag{9}$$

тогда  $W_k(0) = k_{\text{выт}} S_{\text{кр}} k_{\text{рас}}^{-1}$ .

### Функциональная схема комбинированной системы регулирования

На основании предложенной функциональной схемы и математических моделей составлена структурная схема комбинированной системы в интерактивной программе для моделирования, имитации и анализа динамических систем MATLAB&SIMULINK (рис. 2, 3) [15]. При моделировании учтены нелинейности и ограничения на крайние положения штока гидроцилиндра и скорость изменения сигнала задания.

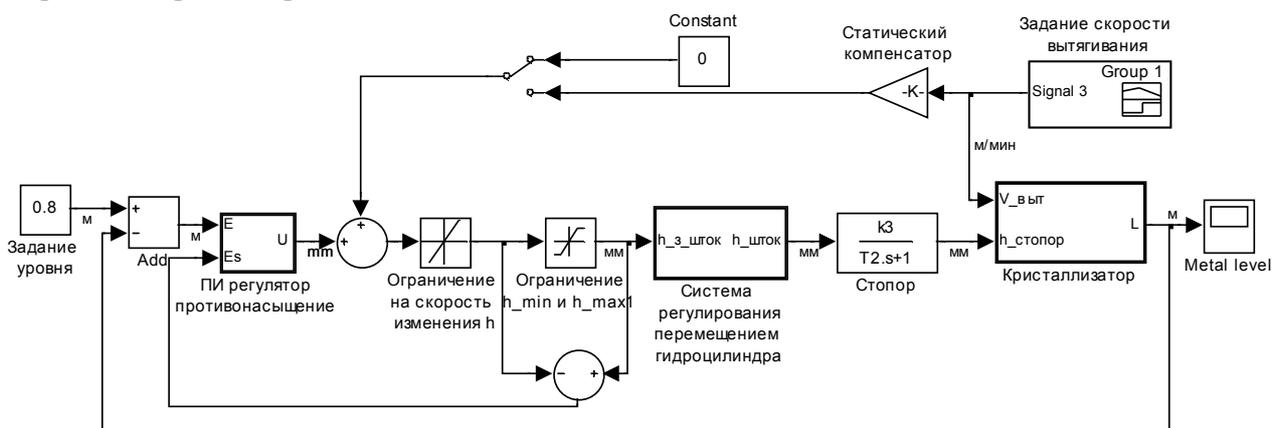


Рисунок 2 – Структурная схема комбинированной системы в пакете MATLAB&SIMULINK

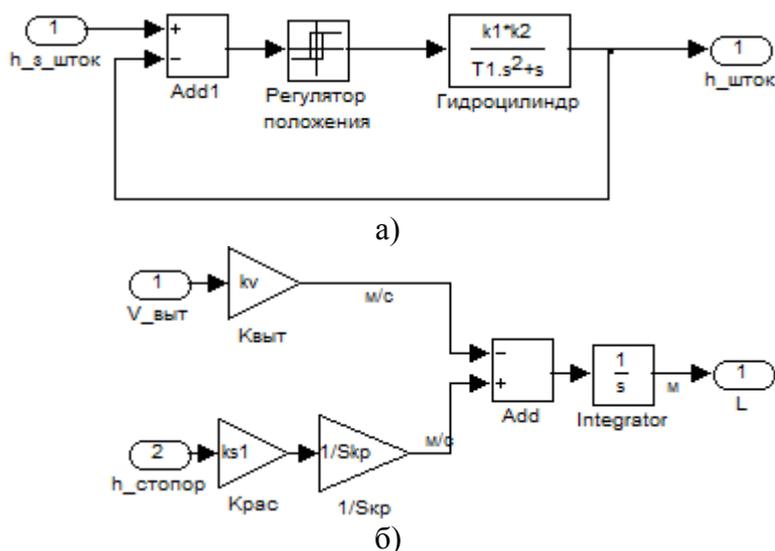


Рисунок 3 – Структурная схема системы регулирования перемещением штока гидроцилиндра (а) и кристаллизатора (б) в пакете MATLAB&SIMULINK

В процессе исследования комбинированной системы регулирования уровнем металла в кристаллизаторе скорость вытягивания заготовки изменялась по графику, представленному на рис. 4.

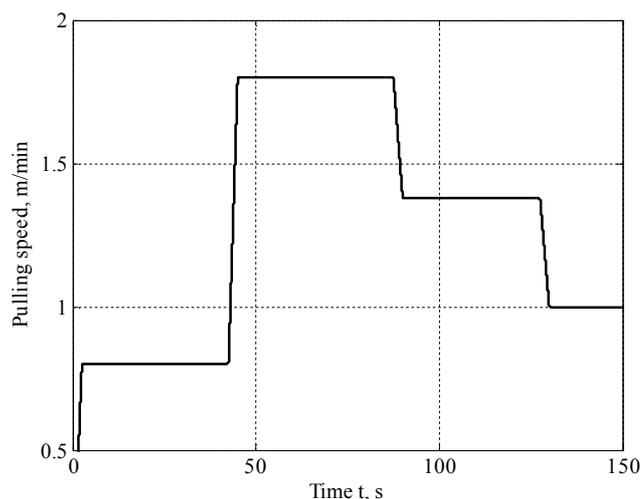


Рисунок 4 – График изменения скорости вытягивания заготовки по времени

На рис. 5, 6 приведены графики переходных процессов изменения уровня без и с применением компенсатора.

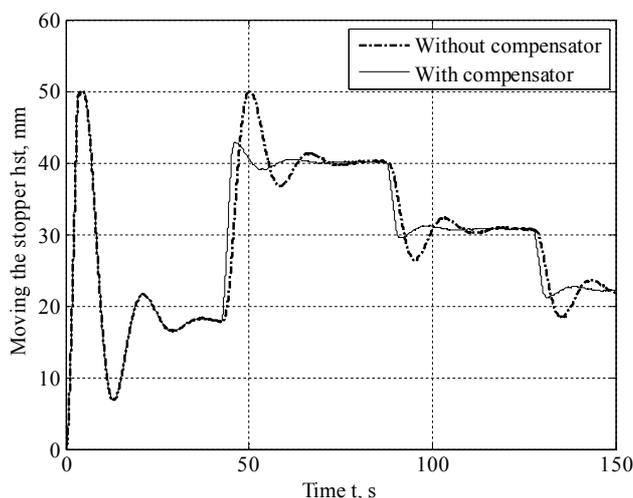


Рисунок 5 – График перемещения стопора при изменении скорости вытягивания заготовки

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование комбинированной системы регулирования позволяет уменьшить амплитуду отклонения уровня от заданного значения в 3-4 раза по сравнению с системой, построенной по принципу обратной связи.

#### Выводы

1. Обоснована целесообразность использования принципа комбинированного управления на основании компенсации контролируемого возмущения (скорости вытягивания заготовки) и обратной связи по регулируемой переменной (уровень металла).
2. Разработана структурная схема комбинированной системы регулирования уровнем металла в кристаллизаторе непрерывной машины литья заготовок.
3. На основании принципа инвариантности найден статический компенсатор, обладающий простой структурой и физической реализацией.
4. Методом компьютерного моделирования установлено, что разработанная модификация системы автоматического регулирования обеспечивает уменьшение

отклонения уровня металла в кристаллизаторе в 3-4 раза по сравнению с существующей при изменении скорости вытягивания заготовки.

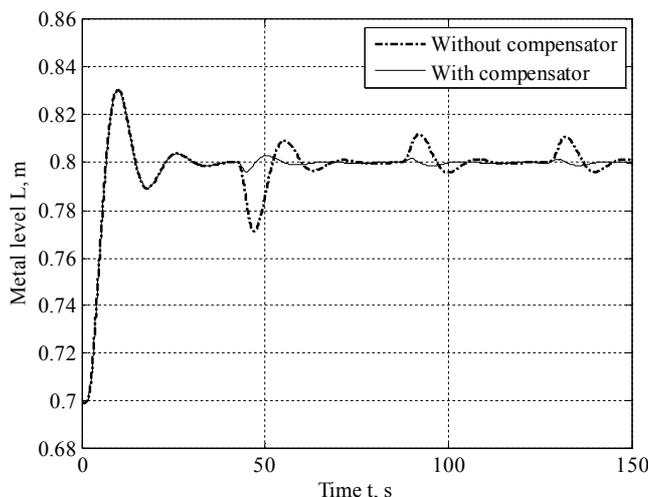


Рисунок 6 – График уровня металла при изменении скорости вытягивания заготовки

### Список используемой литературы

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
2. Непрерывная разливка сортовой заготовки: монография / [А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов и др.]. – Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417 с.
3. Процессы непрерывной разливки: монография / [А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, А.А. Минаев и др.]. – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
4. Куберский С.В. Непрерывная разливка стали: учебное пособие / С.В. Куберский. – Алчевск: ДГМИ, 2004. – 361 с.
5. Системы управления процессами и механизмами машин непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / [А.Ю. Цупрун, А.Г. Редько, А.В. Колоколов и др.] // Украинская Ассоциация Сталеплавильщиков. – Режим доступа: <http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php>.
6. Electrics/Automation for Continuous Casting [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.industry.siemens.com/verticals/metals-industry/en/metals/electrics-automation/continuous-casting/Pages/home.aspx>.
7. SIMETAL LevCon. Mold level control and stability with the utmost precision [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.industry.siemens.com/datapool/industry/industrysolutions/metals/simetal/en/SIMETAL-LevCon-en.pdf>.
8. Чернышев Н.Н. Синтез математической модели системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н. Чернышев; гол. ред. В.Ф.Свдокимов // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». - 2012. – Випуск 65. – С. 195-202.
9. Теория инвариантности и комбинированное управление [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tehnoinfra.ru/teorijasistempravlenija/50.html>.
10. Денисенко В.В. ПИД – регуляторы: принципы построения и модификации / В.В. Денисенко // СТА. – 2006. – Ч. 1, №4. – С. 66-74.
11. Волуева О.С. Система регулирования положения стопорной системы промковша машины непрерывного литья заготовок / О.С. Волуева // Науковий вісник Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2012 – Т. 3, випуск 2. – С. 74-78.

12. Глинков Г.М. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / Г.М. Глинков, В. А. Маковский, С. Л. Лотман, Р.М. Шапировский. – [2-е изд., перераб. и доп. ]. – М.: Металлургия, 1986. – 352 с.
13. УЗТМ Уралмашзавод. Машины непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.uralmash.ru/files/MNLZ\\_ru-03221131.pdf](http://www.uralmash.ru/files/MNLZ_ru-03221131.pdf)
14. Ооба Коичи Разработка линейного двигателя и линейного сервоклапана прямого управления для гидравлических компонентов [Электронный ресурс] / Ооба Коичи. – Режим доступа: <http://www.mikuni.ru/qa/32.html>.
15. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. Основы применения / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 806 с.

Надійшла до редакції:  
31.03.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Скобцов Ю.О.

**М.М. Чернишев**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Комбінована система автоматичного регулювання рівнем металу в кристалізаторі.** Розглядається система регулювання рівнем металу в кристалізаторі за допомогою стопорного механізму. Запропоновано принцип комбінованого управління рівнем металу в кристалізаторі. Знайдена структура та параметри компенсатора, що зменшує вплив швидкості витягування заготовки на якість підтримування рівня металу в процесі безперервного розливання. Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що застосування комбінованої системи регулювання дозволяє значно зменшити відхилення рівня від необхідного значення.

**Ключові слова:** рівень металу, кристалізатор, комбінована система, компенсатор, математична модель, нелінійність.

**N.N. Chernyshev**

**Donetsk National Technical University**

**Combined System of Automatic Control of Metal Level in the Mold.** Stabilization of metal in the mold during continuous casting of steel is needed to produce a high quality ingot, to increase metal yield, to reduce the time and improve the safety of the casting process. Constant level is maintained by stopper mechanism for steel coming from the tundish ladle. The main disturbance having significant impact on the level is the speed of pulling the ingot with a pulling crate, which is located in the area where metal almost completely hardens. Pulling speed varies according to certain laws in the casting process, and therefore its influence on the level of metal can be pre-compensated. Thus, it is advisable to use the principle of combined control based on compensation of controlled perturbation (ingot pulling rate).

A block diagram of the combined system of metal control in the mold is provided. Based on the principle of invariance we found a static compensator, which has simple structure and physical implementation. Computer simulation confirmed that the developed automatic control system reduces deviation of metal level in the mold by 3-4 times compared to the existing automatic control system.

**Keywords:** metal level, mold, control system, compensator, mathematical model, nonlinearity.