

УДК 681.5:661.2

**Н.Н. Чернышев (канд. техн. наук, доц.), О.С. Волуева**  
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: cnn@donntu.edu.ua, voluevaos@gmail.com

## **КОМПЕНСАЦИЯ ЗАРАСТАНИЯ КАНАЛА ДОЗИРОВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ**

*Рассматривается система управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ при помощи стопорного механизма. Используется принцип подчиненного управления с ПИ-законом регулирования и компенсацией интегрального насыщения. Улучшение качества регулирования в процессе разливки достигается за счет компенсации зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ. Методом компьютерного моделирования установлено, что компенсация отклонения расходной характеристики дозирующего устройства в результате накопления неметаллических отложений в канале позволяет в 2 раза уменьшить отклонение уровня металла в кристаллизаторе от заданного значения при изменении скорости разливки.*

**Ключевые слова:** уровень металла, кристаллизатор, неметаллические включения, дозирование металла, математическая модель, компенсатор.

### **Актуальность**

Высокая стабильность уровня металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) является необходимым условием получения металла высокого качества. [1,2]. Однако этот процесс подвержен влиянию возмущений, среди которых наиболее значимыми являются [1,3]:

- изменение скорости втягивания;
- нелинейность характеристик элементов системы;
- зарастание стакана-дозатора и погружного стакана;
- размывание и разбивание стакана-дозатора.
- конструктивно обусловленные возмущения: забивания, люфты и т.п.
- волновые явления на поверхности металла в кристаллизаторе.

Для ослабления влияния возмущающих воздействий на уровень металла применяются комбинированные САУ, основанные на компенсации контролируемого возмущения и обратной связи по регулируемой переменной. В работах [4,5] рассмотрены методы уменьшения воздействия первых двух возмущений. Анализ работы МНЛЗ показал, что зарастание канала дозирования жидкого металла (состоящего из стакана-дозатора и погружного стакана) является серьезной проблемой, поскольку при длительной разливке происходит уменьшение его рабочего диаметра. Слой отложений влияет на характер потока металла через дозирующее устройство, формирует несимметричный поток в кристаллизаторе и в целом создает дополнительные производственные проблемы, ухудшение качества продукции, возникает угроза отрыва неметаллических включений и загрязнения слитка. Кроме того, это влияет на работу системы управления, поскольку изменяется расходная характеристика канала дозирования и существенно ограничивается максимальный расход металла в кристаллизатор [6]. Поэтому учет степени зарастания погружного стакана для коррекции управляющих воздействий формируемых системой автоматического управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ является актуальной задачей.

### Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение качества управления в системе автоматического поддержания уровня в кристаллизаторе МНЛЗ за счет учета степени зарастания канала дозирования жидкого металла в процессе разливки.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. При определении сигнала компенсации учесть степень зарастания канала подачи жидкого металла.
2. Разработать алгоритм автоматического определения коэффициента компенсатора с учетом параметров расходной характеристики дозирующего устройства.

### Комбинированная система управления уровнем металла

Для поддержания уровня металла в кристаллизаторе в работах [4,5,7] предложена структура системы управления, представленная на рис. 1. Для компенсации неконтролируемых возмущений, используется обратная связь по регулируемым переменным – уровень металла и перемещение штока гидроцилиндра.

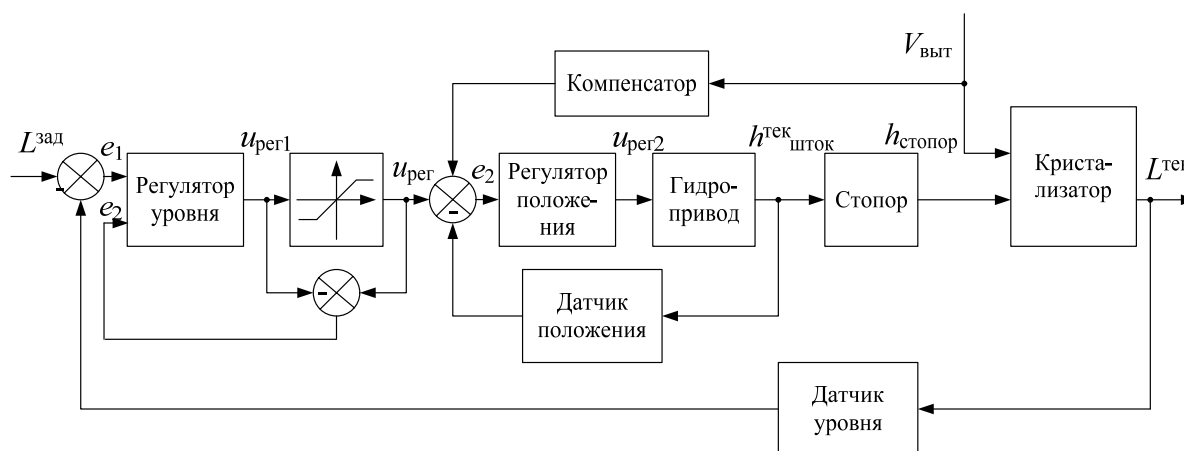


Рисунок 1 – Функциональная схема комбинированной системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе

При синтезе компенсатора скорости вытягивания заготовки тянущей клетью, применялся принцип инвариантности, который заключается в том, что отклонение выходной переменной от заданного значения должно быть равно нулю при любых задающих или возмущающих воздействиях [8,9]. Однако, на практике полная инвариантность оказывается практически не осуществимой по ряду причин, одна из них - это физическая нереализуемость «идеального» компенсатора. Поэтому часто ограничиваются частичной инвариантностью (использованием статических моделей). На основании этого допущения в работе [4] найден «статический» компенсатор, который рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{компенсатор}}(0) = h_{\text{шток}}(0) / V_{\text{выт}}(0) = k_{\text{компенсатор}} = k_{\text{выт}} S_{\text{кр}} k_{\text{рас}}^{-1}, \quad (1)$$

где  $h_{\text{шток}}$  – перемещение штока, мм;

$V_{\text{выт}}$  – скорость вытягивания слитка, м/мин;

$k_{\text{выт}}$  – коэффициент пересчета размерности, мин/с.;

$S_{\text{кр}}$  – площадь сечения кристаллизатора, м<sup>2</sup>;

$k_{\text{рас}}$  – коэффициент расхода, (кг/с)/мм.

Поскольку зарастание внутренней полости погружного стакана и стакана дозатора приводит к изменению расходной характеристики, а значит изменяется коэффициент передачи  $k_{\text{рас}}$  по каналу «высота подъема стопора – расход металла в кристаллизатор», следовательно, необходимо учесть это изменение и пересчитывать коэффициент компенсатора. Сделать это можно, если известна расходная характеристика, которая соответствует текущей пропускной способности канала дозирования металла.

### Оценка степени зарастания канала подачи жидкого металла

В работах [6,10] представлена методика определения расходной характеристики в системе дозирования металла при помощи стопорной системы [7]. В начале работы МНЛЗ снимается исходная («эталонная») расходная характеристика стопорной системы и сохраняется в базе данных. Через определенные промежутки времени на основе данных измерений скорости вытягивания заготовки, уровня металла и линейного перемещения стопора вычисляется текущая расходная характеристика в рабочей области. Затем определяется степень ее несоответствия исходной (рис. 2).

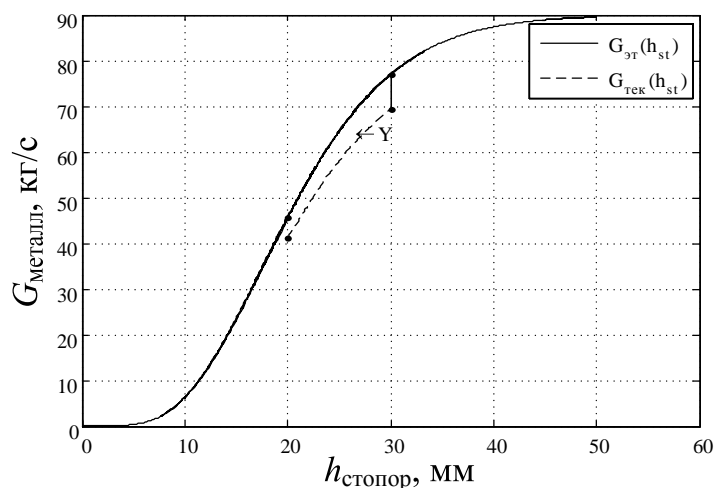


Рисунок 2 - Определение степени несоответствия исходной и текущей расходной характеристики стопорной системы

Зная текущие значения величины поднятия стопора и расхода металла в кристаллизатор можно определить актуальное значение коэффициента  $k_{рас}^{акт}$  по формуле:

$$k_{рас}^{тек}(i) = G_{металл}^{тек}(i) / h_{стопор}^{тек}(i), \quad i=1,2,3\dots \quad (2)$$

где  $G_{металл}^{тек}$  – расход металла из промковша в кристаллизатор на  $i$ -м такте измерения, кг/с;  
 $h_{стопор}^{тек}$  – высота подъема стопора на  $i$ -м такте измерения, мм.

Подставляя полученное значение  $k_{рас}^{тек}$  в формулу (1) получим формулу для «динамического» компенсатора:

$$k_{компенсатор}(i) = k_{выт} S_{кр} (k_{рас}^{тек}(i))^{-1}, \quad (3)$$

для расчета значения коэффициента компенсатора с учетом параметров реальной расходной характеристики дозирующего устройства

### Моделирование переходных процессов в системе управления

С учетом предложенных методов оценки степени зарастания канала подачи жидкого металла и определения коэффициента компенсатора на основе измерений основных технологических параметров процесса производства непрерывнолитых заготовок разработана имитационная модель, структурная схема которой приведена на рис. 3.

Схема включает в свой состав: ПИ регулятор уровня с противонасыщением [5], систему автоматического управления перемещением штока гидроцилиндра [3], модель стопора и кристаллизатора [3], а так же систему «Динамический» компенсатор» реализующую определение текущих значений расхода металла в кристаллизатор  $G_{металл}$ , коэффициента передачи  $k_{рас}$  и сигнала компенсации, который складывается с сигналом, формируемым регулятором уровня. Разработанная модель позволяет исследовать переходные процессы в системе управления по уровню, перемещению стопора без компенсатора, со «статическим» или «динамическим» компенсатором изменения скорости вытягивания заготовки с помощью блока «Управляемый переключатель».

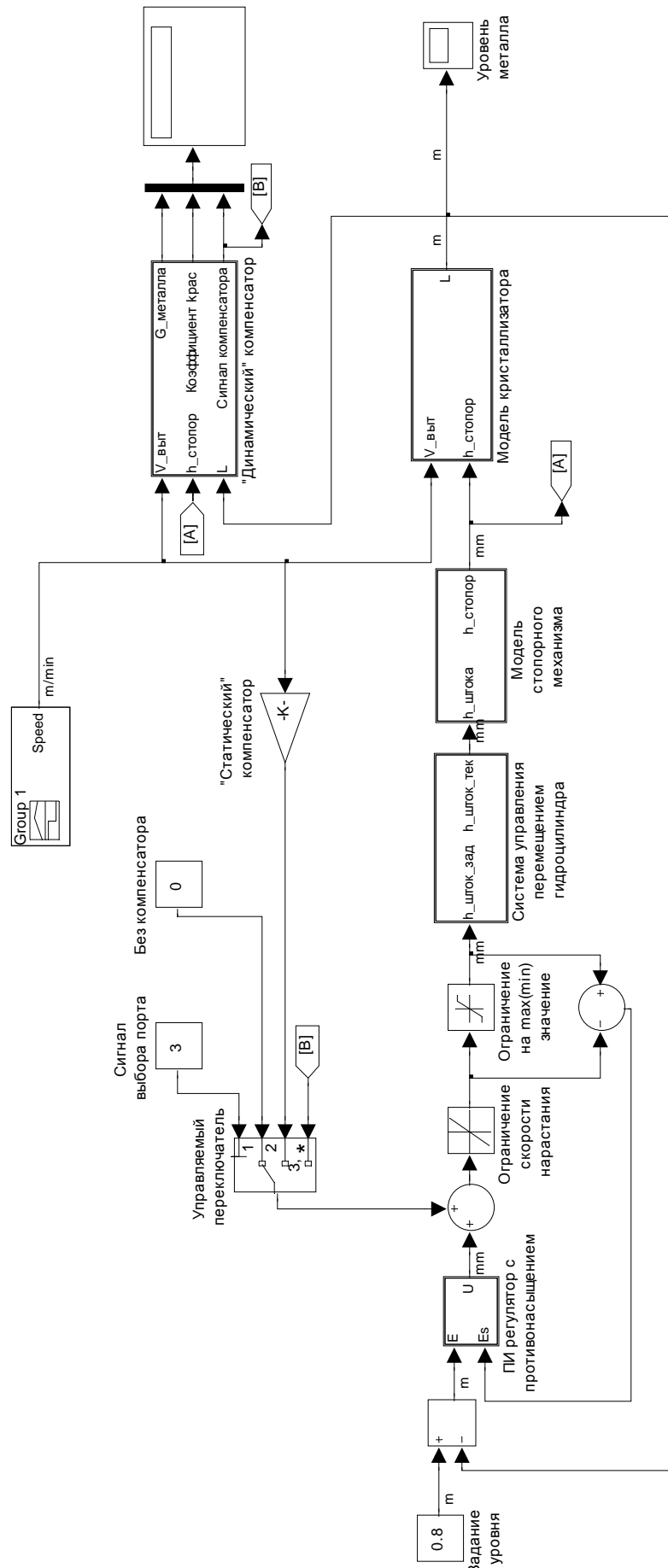


Рисунок 3 – Схема моделирования комбинированной системы управления уровнем металла в кристаллизаторе с учетом степеней заарастания канала подачи жидкого металла

В результате моделирования системы управления уровнем металла в кристаллизаторе были получены графики переходных процессов, представленные на рис. 4 и 5.

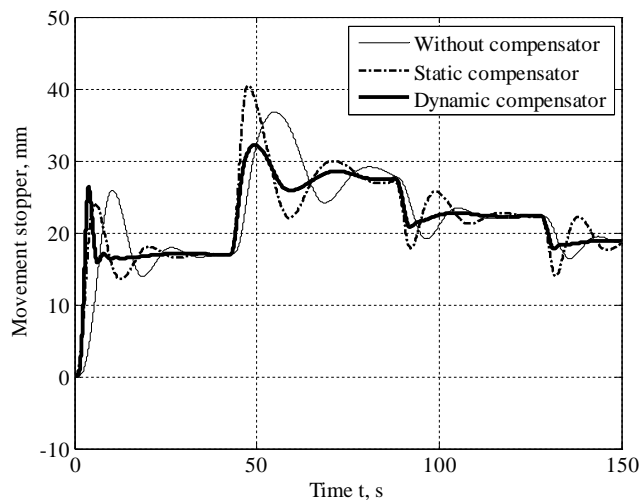


Рисунок 4 – График перемещения стопора при изменении скорости вытягивания заготовки

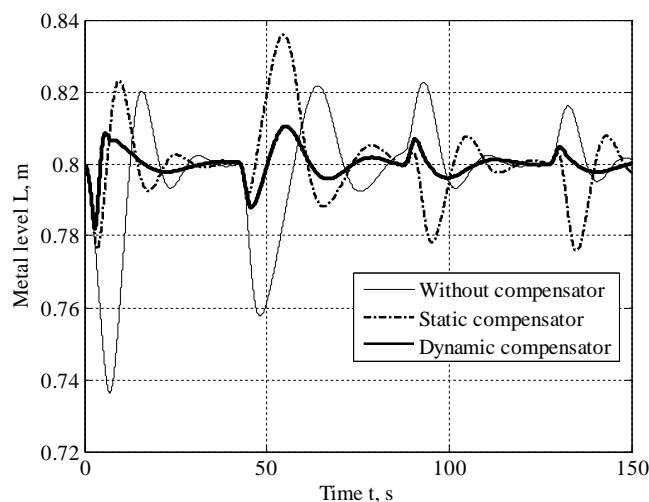


Рисунок 5 – График уровня металла при изменении скорости вытягивания заготовки

В качестве показателя оценки качества переходных процессов в системе использовано среднеквадратическое отклонение уровня от заданного значения[11]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (L_k^{\text{ист}} - L_k^{\text{зад}})^2}, k=1, 2, \dots, n, \quad (4)$$

где  $L_k^{\text{зад}}$  –  $k$ -е значение требуемого уровня металла в кристаллизаторе, м;  
 $L_k^{\text{ист}}$  –  $k$ -е действительное значение уровня металла в кристаллизаторе, м;  
 $n$  – объем выборки.

Получены следующие значения СКО:

- без применения компенсатора,  $\sigma = 0,0163$ ;
- «статический» компенсатор,  $\sigma = 0,0111$ ;
- «динамический» компенсатор,  $\sigma = 0,0039$ .

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование комбинированной системы регулирования с учетом степени зарастания канала дозирования, при расчете сигнала компенсации, позволяет уменьшить среднеквадратическое отклонение уровня от заданного значения в 2,5 раза по сравнению с системой без учета степени

зарастания канала дозирования и в 4 раза по сравнению с системой, которая построена по принципу обратной связи.

### **Выводы**

1. Для определения текущего вида расходной характеристики дозирующего устройства в процессе разлива предложен метод, основанный на прямых измерениях уровня, скорости вытягивания заготовки и линейного перемещения стопорного механизма.

2. Разработана структурная схема комбинированной системы регулирования уровнем металла в кристаллизаторе непрерывной машины литья заготовок с учетом изменения параметров расходной характеристики дозирующего устройства.

3. Методом компьютерного моделирования установлено, что разработанная модификация системы автоматического регулирования обеспечивает уменьшение амплитуды отклонения уровня металла в кристаллизаторе в 3 раза по сравнению с существующей при изменении скорости вытягивания заготовки.

### **Список использованной литературы**

1. Смирнов А.Н., Куберский С.В., Штепан Е.В. Непрерывная разливка стали: Учебник. – Донецк: ДонНТУ. - 2011. – 482 с.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В., Смирнов А.Н. Производство стали. Том 4. Непрерывная разливка металла. - М.: «Теплотехника».- 2009. - 528 с.
3. Чернышев Н.Н. Синтез математической модели системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н. Чернышев // Збірник наукових праць «Модельовання та інформаційні технології», гол. ред. В.Ф.Євдокимов, Інститут проблем модельовання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. – 2012. – Випуск 65. – С. 195-202.
4. Чернышев Н.Н. Комбинированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н. Чернышев // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2013. – Випуск 2(25). – С. 72-78.
5. Волуева О.С. Компенсация эффекта интегрального насыщения регулятора в системе управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ // Наукові праці ДонНТУ. Сер. Обчислювальна техніка та автоматизація. – 2013. – Випуск 2(25). – С. 13-20.
6. Ткаченко В.Н. Оценка степени зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ / В.Н. Ткаченко, Н.Н. Чернышев, О.С. Волуева // Науково-технічний журнал «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті». – Харків: Українська державна академія залізничного транспорту. – 2014. - №2(105). – С. 43-47.
7. Волуева О.С. Система регулирования положения стопорной системы проковша машины непрерывного литья заготовок. Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – 2013. – Том3, випуск 2. – С.74-78.
8. Чернышев Н.Н. Синтез компенсаторов для комбинированных систем автоматического регулирования // Збірник наукових праць ДонІЗТ. Серія Автоматика, телемеханіка, зв'язок. – 2012. – Випуск 32. – С. 52-57.
9. Жукова Н.В. Исследование комбинированных методов управления нелинейными неустойчивыми механическими объектами / Н.В. Жукова, Д.А. Панкин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2009. - Випуск 147(16). – С. 7-13.
10. Волуева О.С. Основные функции компьютерной системы управления процессом непрерывной разливки стали / О.С. Волуева, В.М.Ткаченко, А.О.Іванова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – 2005. - Випуск 88. – С. 63-69.

11. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления: Учебное пособие. 4-е изд., перераб. и доп. - СПб: Изд-во «Профессия». - 2003. – 752 с.

### References

1. Smirnov, A.N., Kuberskij, S.V. and Shtepan, E.V. (2011), *Nepreryvnaja razlivka stali* [Continuous casting of steel], DonNTU, Doneck, Ukraine.
2. Djudkin, D.A., Kisilenko, V.V. and Smirnov, A.N. (2009), *Proizvodstvo stali. Tom 4. Nepreryvnaja razlivka metalla* [Steel production. Volume 4. Continuous casting], Teplotehnika, Moscow, Russia.
3. Chernyshev, N.N. (2012), “The synthesis a mathematical model of the automatic control system metal level in the mold”, *Zbirnik naukovih prac' «Modeljuvannja ta informacijni tehnologii» Institut problem modeljuvannja v energetici im. G.E. Puhova*, no. 65, pp. 195-202.
4. Chernyshev, N.N. (2013), “Combined system of automatic control metal level in the mold”, *Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu. Serija: «Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija»*, no. 2(25), pp. 72-78.
5. Volueva, O.S. (2013), “Compensation of the PI-controller Integral Windup in the Mold Level Control System for Continuous Casting Machine”, *Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu. Serija: «Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija»*, no. 2(25), pp. 13-20.
6. Tkachenko, V.N., Chernyshev, N.N. and Volueva, O.S. (2014), “The estimation of healing of the channel for dispensing hot metal into continuous casting machine mold” / *Naukovo-tehničnij zhurnal «Informacijno-kerujuchi sistemi na zalizničnomu transporti» Ukraїns'ka derzhavna akademija zalizničnogo transportu*, no. 2(105), pp. 43-47.
7. Volueva, O.S. (2013), “Control system of the tundish stopper system’s moving for continuous casting machine”, *Naukovij visnik Chernivec'kogo nacional'nogo universitetu imeni Jurija Fed'kovicha. Serija: «Komp'juterni sistemi ta komponenti»*, vol. 3, no. 2, pp.74-78.
8. Chernyshev, N.N. (2012), “The synthesis compensators for combined automatic control systems”, *Zbirnik naukovih prac' Donetskyi instytut zaliznychnoho transportu. Serija: «Avtomatika, telemehanika, zv'jazok»*, no. 32, pp. 52-57.
9. Zhukova, N.V. and Pankin, D.A. (2009), “Research of multifunction control methods for nonlinear unstable mechanical objects”, *Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu. Serija: «Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija»*, no. 147(16), pp. 7-13.
10. Volueva, O.S., Tkachenko, V.M. and Ivanova, A.O. (2005) “The basic functions of the computer-based continuous steel casting process control system”, *Naukovi pracj Donec'kogo nacional'nogo tehničnogo universytetu. Serija: «Obchysljuval'na tehnika ta avtomatyzacija»*, no. 88, pp.63-69 .
11. Besekerskij, V.A. and Popov, E.P. (2003) *Teorija sistem avtomaticheskogo upravlenija: Uchebnoe posobie*. [Theory of automatic control systems: Tutorial], 4<sup>th</sup> ed., «Professija», St. Petersburg, Russia.

Надійшла до редакції:  
30.04.2014 р.

Рецензент:  
докт. техн. наук, проф. Ткаченко В.М.

**М.М. Чернишев, О.С. Волуєва**

**ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»**

**Компенсація заростання каналу дозування рідкого металу в системі управління рівнем металу в кристалізаторі МБЛЗ. Розглядається система регулювання рівня металу в кристалізаторі МБЛЗ за допомогою стопорного механізму. Використовується принцип підпорядкованого управління з ПІ - законом регулювання та противонасиченням. Поліпшення**

якості регулювання в процесі розливання досягається за рахунок компенсації заростання каналу дозування рідкого металу в кристалізатор МБЛЗ. Методом комп'ютерного моделювання встановлено, що компенсація відхилення витратної характеристики дозуючого пристрою в результаті накопичення неметалічних відкладень в каналі дозволяє в 2 рази зменшити відхилення рівня металу в кристалізаторі від заданого значення при зміні швидкості розливки.

**Ключові слова:** рівень металу, кристалізатор, неметалеві включення, дозування металу, математична модель, компенсатор.

**N.N. Chernyshev, O.S. Volueva**  
**Donetsk National Technical University**

**Nozzle clogging compensation in metal level control system for CCM.** The metal level control system for continuous casting machine mold with stopper dosing mechanism is considered in this paper. A cascade control system based on principles of controllable disturbances compensation and feedback is used to decrease disturbance effect on the mold level. The invariance principle was applied during the synthesis of compensator for casting speed (withdrawal-roll set speed). The PI-controller with integral windup compensation is used as the level controller. Nozzle clogging is a serious productivity and quality problem in continuous casting of steel. The consequences of clogging include: quality decrease because of ingot pollution by non-metallic inclusions, productivity decrease, costs increase. Therefore, a method for estimation the degree of nozzle clogging during the continuous casting process based on direct measurement of level, casting speed and linear movement of the stopper mechanism is proposed. The regulation quality enhance is achieved by consider the degree of nozzle clogging during computation of compensation signal. Computer simulations established that compensation of deviations dosing system's consumption characteristic because of the buildup of non-metallic inclusions in the flow passage between tundish and mold allows to reduce the metal level deviation in the mold from setpoint. The root-mean-square parameter was applied as a performance criterion of the proposed development.

**Keywords:** metal level, mold, nonmetallic inclusions, metal dosing, mathematical model, compensator.



**Чернышев Николай Николаевич**, Украина, закончил Донецкий национальный технический университет, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – автоматизация, компьютерный анализ, проектирование систем управления технологических процессов в промышленности.



**Волуева Ольга Сергеевна**, Украина, закончила Донецкий национальный технический университет, ассистент кафедры автоматизации и телекоммуникаций ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – автоматизация, компьютерный анализ, проектирование систем управления технологических процессов в металлургической промышленности.