

УДК 621.746.55

О.С. ВолуеваГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра автоматики и телекоммуникаций
E-mail: voluevaos@gmail.com**КОМПЕНСАЦИЯ ЭФФЕКТА ИНТЕГРАЛЬНОГО НАСЫЩЕНИЯ РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОРЕ МНЛЗ**

Рассматривается система регулирования уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ при помощи стопорного механизма. Используется принцип подчиненного управления с ПИ законом регулирования. Улучшение качества переходных процессов в неустановившемся режиме достигается за счет компенсации интегрального насыщения. Методом компьютерного моделирования установлено, что использование подсистемы компенсации интегрального насыщения позволяет уменьшить отклонение уровня металла в кристаллизаторе от заданного значения в нестационарных режимах работы.

Ключевые слова: уровень металла, кристаллизатор, интегральное насыщение, нелинейность, математическая модель, ПИ-регулятор.

Введение

Эффективность работы машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) и результирующее качество непрерывно-литой заготовки в первую очередь определяется динамичными процессами, протекающими в кристаллизаторе. Необходимым условием для получения заготовки высокого качества является высокая стабильность процесса непрерывной разливки. Анализ технологии показал, что колебания уровня металла в кристаллизаторе приводят к значительным нарушениям процесса разливки, что в свою очередь влечет за собой ухудшение качества продукции. Отклонение значения уровня металла в ту или иную сторону даже на 0,5-1% приводит к дефектам внутренней структуры слитка и его загрязнению неметаллическими включениями [1-3].

Задача поддержания уровня металла в кристаллизаторе может быть решена несколькими способами, наиболее распространенным из них является применение системы автоматического регулирования потока поступающего из промковша металла с помощью стопорного механизма.

Цель

Уменьшение колебания уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ в неустановившемся режиме за счет совершенствования системы автоматического регулирования.

Постановка задачи

Разработать регулятор с компенсацией накопления интегральной составляющей в системе автоматического регулирования уровня жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ

Синтез системы регулирования положения уровня

Для поддержания уровня металла в кристаллизаторе с высокой точностью, целесообразным является применение принципа подчиненного регулирования [4,5]. Внутренний контур управления – управление положением стопора. Главное требование, предъявляемое к этому контуру – высокое быстродействие и точность перемещения стопора. Внешний контур управления должен компенсировать отклонение уровня металла при действии возмущений и обеспечивать заданную точность регулирования (рис. 1).

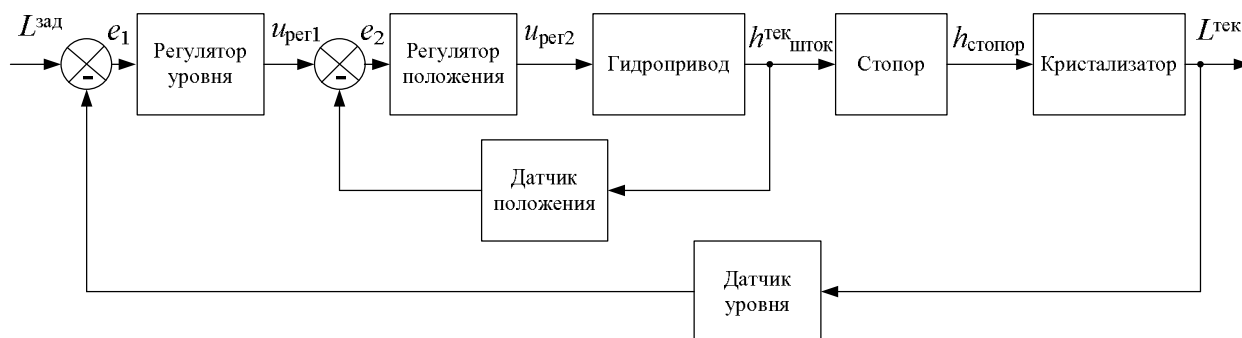


Рисунок 1 – Функциональная схема системы управления уровня металла в кристаллизаторе

Объектом исследования является внешний контур регулирования уровня металла в кристаллизаторе слябовой машины непрерывного литья заготовок. Наиболее распространенным принципом управления для данного класса систем является принцип обратной связи по регулируемой переменной [2,4,8,10]. В качестве закона управления уровнем металла можно использовать самый распространенный в промышленности ПИ(Д) закон изменения управляющей величины, который обладает простотой построения, реализации и ясности функционирования [8,10].

Для системы управления уровнем можно выделить следующие основные возмущения:

1. изменение скорости втягивания;
2. влияние нелинейностей характеристик элементов системы;
3. зарастание стакана-дозатора и погружного стакана;
4. размывание и разбивание стакана-дозатора.
5. конструктивно обусловленные возмущения: забивания и люфты и т.п.
6. волновые явления на поверхности металла в кристаллизаторе

Рассмотрим модель данной системы.

1) Динамические характеристики элементов гидропривода можно описать передаточной функцией реально интегрирующего звена (1), связывающей время открытия золотникового клапана с перемещением штока гидроцилиндра [6]. Эта передаточная функция имеет вид:

$$W_1(s) = \frac{H_{\text{шток}}(s)}{U_{\text{рег}}(s)} = \frac{k_1}{(T_1 s + 1)s} k_2, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент передачи гидроцилиндра [мм/с]; k_2 – коэффициент передачи золотника [ед.]; T_1 – постоянная времени [с].

2) Золотниковый клапан является безынерционным звеном, так как постоянная времени несоизмеримо мала по сравнению с другими элементами системы, поэтому его постоянную времени принимают равной нулю.

3) Математическая модель стопора представляет собой инерционное звено первого порядка с передаточной функцией

$$W_2(s) = \frac{H_{\text{стопор}}(s)}{H_{\text{шток}}(s)} = \frac{k_3}{(T_2 s + 1)}, \quad (2)$$

где k_3 – коэффициент передачи стопора [мм/мм]; T_2 – постоянная времени стопора [с].

4) Для измерения положения штока гидропривода используется датчик перемещения с передаточной функцией вида

$$W_3(s) = k_4. \quad (3)$$

Динамические характеристики кристаллизатора описываются уравнениями [7]:

5) Уровень металла в кристаллизаторе $L_{кр}$ однозначно связан с величиной расхода стали из промковша и расходом стали из кристаллизатора:

$$S_{кр} \frac{dL_{кр}}{dt} = Q_1(t) - Q_2(t), \quad (4)$$

где Q_1 – объемный расход металла в кристаллизатор, [m^3/c]; Q_2 – объемный расход металла из кристаллизатора, [m^3/c]; $S_{кр}$ – площадь сечения кристаллизатора, [m^2].

6) Расход разливаемого металла из промковша определяется площадью сечения отверстия дозатора и уровнем стали в промковше:

$$Q_1(t) = S_{доз}(t) \mu \sqrt{2gL_{пк}}, \quad (5)$$

где $S_{доз}(t) = \pi d^2(t)/4$ – текущее значение проходного сечения выходного отверстия дозатора, зависящее от высоты подъема стопора, [m^2]; μ – эмпирический коэффициент истечения металла из отверстия, учитывающий трение и скорость струи; g – ускорение свободного падения, [m/c^2]; $L_{пк}$ – уровень металла в промковше, [m].

7) расход металла из кристаллизатора пропорционален скорости вытягивания заготовки и площади сечения кристаллизатора:

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

где $V_{выт}$ – линейная скорость вытягивания слитка, [m/c].

Уровень металла в кристаллизаторе будет оставаться постоянным, если в единицу времени будет поступать и выходить одинаковое количество стали. Постоянство подачи металла в кристаллизатор обеспечивается изменением диаметра дозирующего канала при постоянном уровне металла в промежуточном ковше. Расходная характеристика системы стопор-дозатор $Q_1 = f(h_{стопор})$ является существенно нелинейной.

8) закон изменения управляющего воздействия регулятора [9]:

$$u_{рег2} = \begin{cases} 1, & \text{если } e_2 > 0; \\ 0, & \text{если } e_2 = 0; \\ -1, & \text{если } e_2 < 0, \end{cases} \quad (7)$$

где $e_2 = h_{шт\text{ок}}^{\text{зад}} - h_{шт\text{ок}}^{\text{тек}}$ – сигнал рассогласования.

9) ПИ-закон изменения управляющей величины [5,6]:

$$U_{py}(t) = k_p e_1(t) + k_i \int_0^t e_1(\tau) d\tau. \quad (8)$$

На основе структурной схемы рис. 1, передаточных функций (1)-(6) и предложенных законов управления (7)-(8), а также учитывая заданные технологическим регламентом ограничения, построена модель системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе в пакете прикладных программ MATLAB&Simulink (рис. 2) [7,9,11].

Поскольку в данной модели учитываются ограничения выходных величин регуляторов и исполнительных механизмов, то возникает необходимость учесть такой фактор, как интегральное насыщение ПИ регулятора.

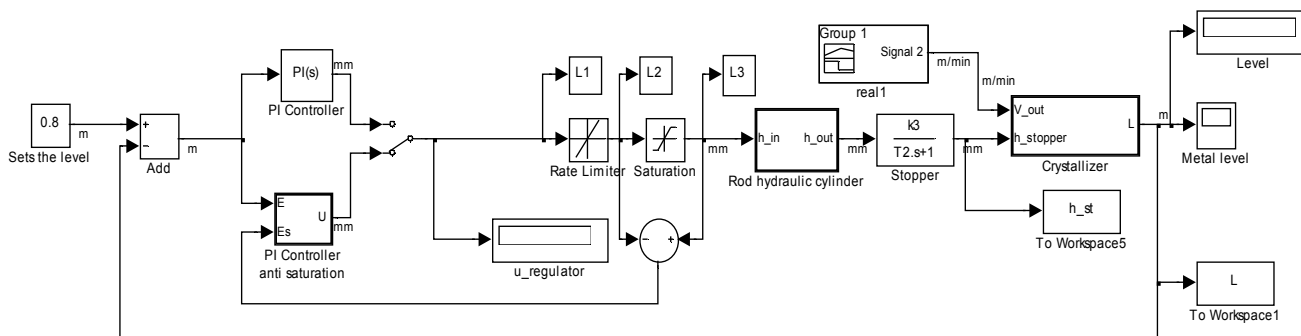


Рисунок 2 - Структурная схема исследуемой системы в пакете MATLAB&SIMULINK

Интегральное насыщение представляет собой эффект, который наблюдается, когда ПИ (или ПИД) регулятор в течение длительного времени должен компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной. Поскольку выход регулятора ограничен, ошибку сложно свести к нулю. Если ошибка управления длительное время сохраняет знак, величина интегральной составляющей регулятора становится очень большой. Это, в частности, происходит, если управляющий сигнал ограничен настолько, что расчетный выход регулятора отличается от реального выхода исполнительного механизма. Так как интегральная часть становится равной нулю лишь некоторое время спустя после того, как значение ошибки изменило знак, интегральное насыщение может привести к большому перерегулированию [12].

Эффект от такого накопления не мгновенен, но для обеспечения заданной точности поддержания уровня металла в кристаллизаторе им нельзя пренебречь. Для компенсации интегрального насыщения в исходную систему была введена подсистема компенсации Windup, структура которой представлена на рис. 3. Принцип работы данной подсистемы следующий. При выходе управляемой величины за рамки ограничений (срабатывает нелинейный элемент типа «ограничение») возникает разница между сигналом на выходе регулятора и сигналом на входе гидроцилиндра E_s . Эта разница умножается на некоторый коэффициент и суммируется с интегральной частью ПИ-регулятора.

В качестве возмущения использовался сигнал изменения скорости разливки (согласно регламенту), представленный на рис.4. Изменение скорости вытягивания оказывает значительное возмущение на уровень металла в кристаллизаторе, поскольку регламент изменения скорости имеет несколько переходных участков, на которых происходят существенные скачки. Влияние интегрального насыщения будет ощутимо именно на таких участках.

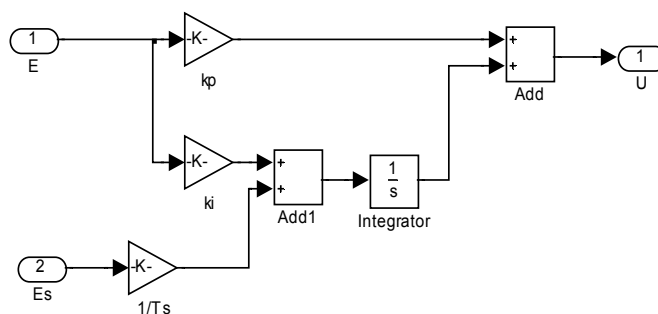


Рисунок 3 – Подсистема компенсации эффекта интегрального насыщения.

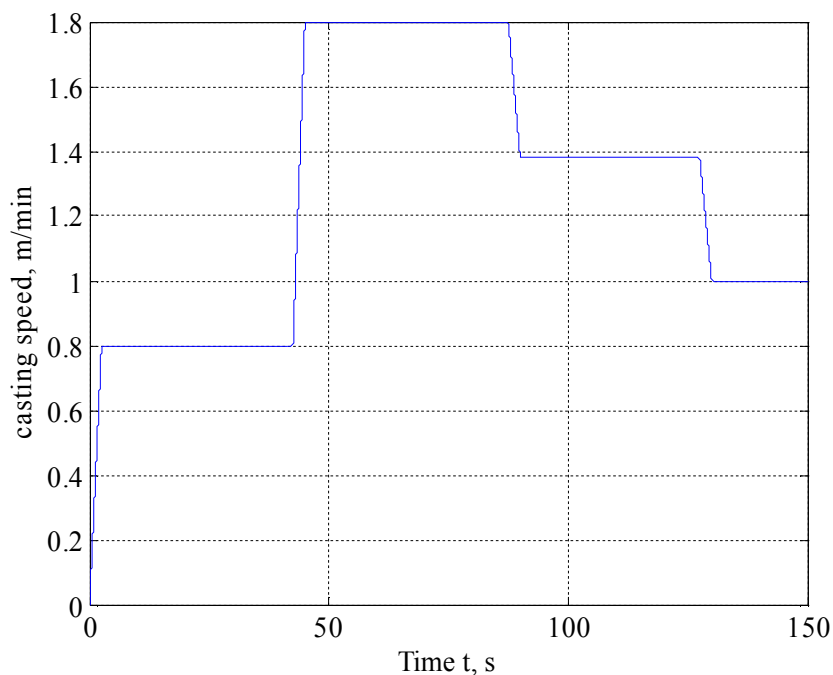


Рисунок 4 - График изменения скорости вытягивания заготовки по времени

Для разрабатываемой системы изменения уровня с обычным ПИ-регулятором и ПИ-регулятором с компенсацией накопления интегральной составляющей приведены на рис.5.

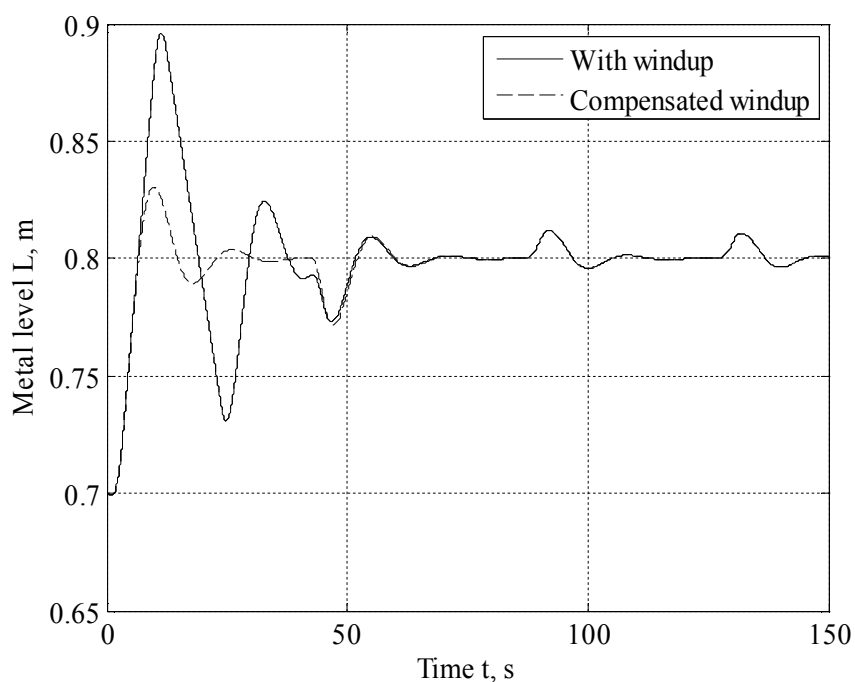


Рисунок 5 – Временные зависимости уровня металла в кристаллизаторе с компенсацией интегральной ошибки и без нее

На рис.6 представлены графики зависимости уровня металла в кристаллизаторе с различными коэффициентами компенсации интегральной ошибки. Коэффициент $K=1/T_c$, где значение T_c изменялось в пределах $[0.002 \div 200]$. В результате было определено оптимальное

для данной системы значение $K=1/0.2$ (K_4 на рис.6). Дальнейшее изменение не привело к дальнейшим существенным положительным изменениям в переходных процессах.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование системы подчиненного регулирования с компенсацией эффекта интегрального насыщения позволяет уменьшить амплитуду отклонения уровня от заданного значения в 2,5-3 раза по сравнению с системой, построенной по принципу обратной связи.

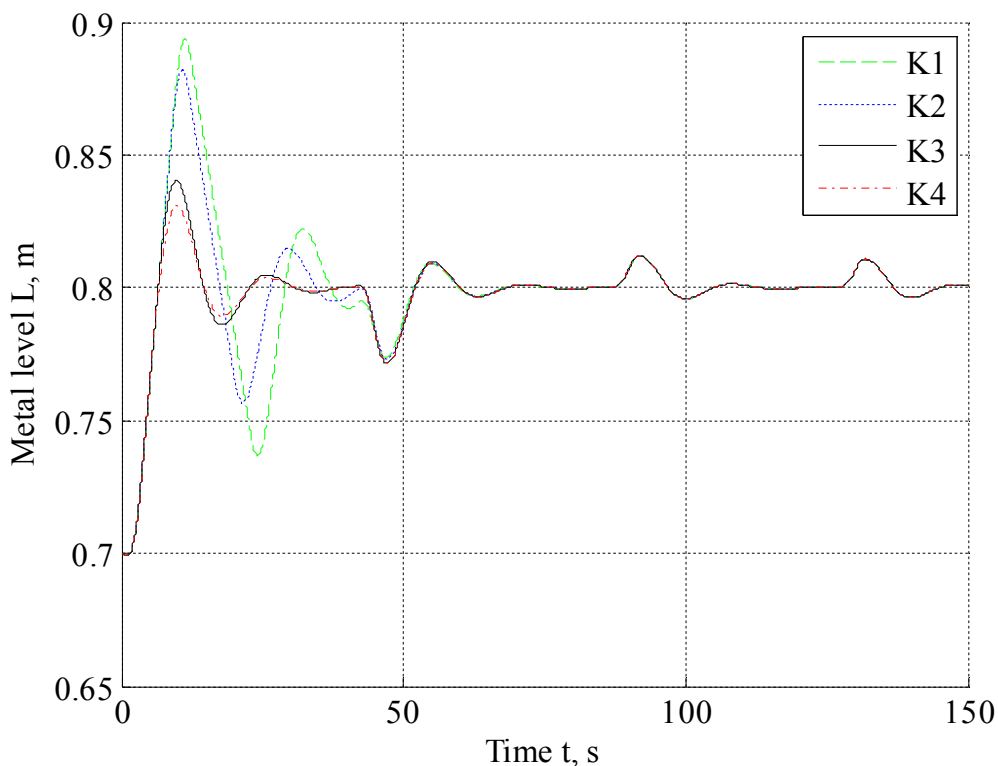


Рисунок 6 – Временные зависимости уровня металла в кристаллизаторе с компенсацией интегральной ошибки при различных значениях $K=1/T_c$ ($T_c=200, 20, 2, 0.2$)

Выводы

1. Разработана математическая модель системы подчиненного регулирования уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ с помощью стопорного механизма. В качестве закона управления применен ПИ-закон.

2. Анализ результатов моделирования показал, что разработанная математическая модель адекватно отображает динамические процессы.

3. Исследовано влияние интегрального насыщения ПИ-регулятора в системе с нелинейностями. Предложено использовать подсистему компенсации интегрального насыщения. Исследовано влияние значения коэффициента передачи цепи компенсации на переходные процессы в системе. Коэффициент изменялся в широких пределах, в результате чего экспериментально было выбран оптимальный диапазон значений для данной системы. В результате исследования выявлено, что существует предельное значение, после которого изменение данного коэффициента уже не оказывает положительного влияния на динамику процесса.

Список использованной литературы

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали: учебник / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан. – Донецк: Доннгу, 2011. – 482 с.

2. Теория и практика непрерывного литья заготовок / [А.Н. Смирнов, А.Я. Глазков, В.Л. Пилюшенко и др.]. – Донецк: Норд Компьютер, 2000. – 363 с.
3. Смирнов А.Н Совершенствование методов моделирования и оптимизация параметров систем дозирования стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.П. Верзилов // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Металургія. – 2011. – Вип. 13 (194). – С.98-107.
4. Физико-химические расчеты электросталеплавильных процессов: учеб. пособие для вузов / [В.А. Григорян, А.Я. Стомахин, А.Г. Пономаренко и др.]. - М.: Металлургия, 1989. – 288 с.
5. Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем: учебник для вузов / Д.Н. Попов. - [2-е изд., перераб. и доп.]. – М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.
6. 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>.
7. Чернышев Н.Н. Синтез математической модели системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н. Чернышев; гол. ред. В.Ф. Євдокимов // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». – 2012. – Випуск 65. – С. 195-202.
8. Денисенко В.В. ПИД – регуляторы: принципы построения и модификации / В.В. Денисенко // СТА. – 2006. – Ч. 1, №4. – С. 66-74.
9. Волуева О.С. Система регулирования положения стопорной системы проковша 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.
10. 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.
11. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7.0 Simulink 5/6. Основы применения / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 806 с.
12. Ковриго Ю.М. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab [Электронный ресурс] / Ю.М. Ковриго, Б.В. Фоменко, И.А. Полищук // ААЭКС, Моделирование объектов и систем управления. – 2007. - №2(20). - Режим доступа <http://aaecs.org/kovrigo-yum-fomenko-by-polishuk-ia-matematicheskoe-modelirovanie-sistem-avtomaticheskogo-regulirovaniya-s-uchetom-ogranichenii-na-upravlenie-v-pakete-atlab.html>.

Надійшла до редакції:
31.03.2013

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

О.С. Волуєва

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Система управління рівнем металу в кристалізаторі машини безперервного розливу заготовок. Розглядається система регулювання рівнем металу в кристалізаторі за допомогою стопорного механізму. Запропоновано принцип підпорядкованого управління рівнем металу в кристалізаторі згідно принципу управління за відхиленням з компенсацією інтегрального

насичення. Застосування такого підходу дозволяє зменшити вплив якості підтримування рівня металу такого фактору, як інтегральне насичення ПІ-регулятора. Досліджувався вплив коефіцієнта петлі компенсації на вигляд перехідних процесів в системі. Методом комп'ютерного моделювання встановлено адекватність і доцільність розробленої структури.

Ключові слова: рівень металу, кристалізатор, інтегральне насичення, не лінійність, ПІ-регулятор, математична модель.

O.S. Volueva

Donetsk National Technical University

Compensation of the PI-controller Integral Windup in the Mold Level Control System for Continuous Casting Machine. *The efficiency of the continuous casting machine (CCM) and the total quality of billet is primarily determined by the dynamic processes taking place in the mold. High stability of continuous casting process is a requirement for high-quality billet. Fluctuations of the metal level in the mold lead to significant violation of the casting process, which in turn leads to a deterioration in the quality of production (defects occur in the internal structure of the ingot and non-metallic inclusions appear).*

The problem of maintaining the level of metal in the mold can be solved in several ways, the most common of these is the application of an automatic flow control system supplied from the tundish through the stopper mechanism.

The main purpose is to reduce metal fluctuations in the mold during transient regime by improving the system of automatic control. To achieve this purpose it is required to develop a controller with integral windup compensation for the automatic level control system of molten metal in a continuous casting mold.

To maintain the level of metal in the mold with high accuracy, it is reasonable to use the principle of the cascade control. Inner control loop - control of the stopper's position. The main requirement for this loop - high speed and accuracy of the stopper's movement. External (main) control loop is to compensate the deviation of the metal level due to disturbances and to ensure the required accuracy of regulation. The object of study is the external control loop for automatic metal level control in the mold of slab continuous casting machine. Control structure is based on the principle of feedback control. The most accepted PI-controller was chosen as the most relevant because of its simple construction, implementation and transparent performance.

The mathematical model of the cascade level control using stopper mechanism in the mold was developed. PI control law is applied as control law. Analysis of simulation results showed that the developed mathematical model adequately reflects the dynamic processes.

The model enabled the study of influence of conditions of the effect of integral windup PI(D) controller in a system with non-linearities. It is proposed to use the subsystem of windup compensation. We studied the influence of the values of the loop transfer gain on the transitional processes in the system. The coefficient varied within wide limits, whereby the optimum range for the system has been experimentally chosen. The study revealed that there is a limit, after which the change in this gain value has no positive effect on the dynamics of the process.

Keywords: mold, metal level, integral windup, control system, mathematical model, nonlinearity, PI-controller.