

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

*На правах рукописи*



**Волуева Ольга Сергеевна**

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В  
НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК**

Специальность 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Донецк – 2018

Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», г. Донецк

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, доцент  
**Чернышев Николай Николаевич,**  
ГОУВПО «ДОННТУ»,  
доцент кафедры «Автоматика и  
телекоммуникации»

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
**Чепцов Михаил Николаевич,**  
ГОУВПО «ДонИЖТ»,  
ректор

кандидат технических наук, доцент  
**Шевцов Дмитрий Валерьевич,**  
ГОУВПО «ДонНУ»,  
заведующий кафедрой  
прикладной математики и  
теории систем управления

**Ведущая организация:** **Республиканский академический научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт горной геологии, геомеханики, геофизики и маркшейдерского дела (РАНИМИ) (г.Донецк)**

Защита состоится «12» февраля 2019 г. в 14<sup>30</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 01.024.04 при ГОУВПО «ДОННТУ» и ГОУВПО «ДонНУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп.1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-55, e-mail: uchensovets@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артема, 58, корп. 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.024.04  
кандидат технических наук



Т.В. Завадская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время повышение эффективности металлургического комплекса Донбасса невозможно без внедрения нового оборудования и современных технологий автоматизации. В условиях постоянного повышения стоимости энергоресурсов и конкурентоспособности металлургических предприятий, усиления требований к безопасности производства, вопросы, связанные с повышением качества металлургической продукции, приобретают все большее значение.

Наиболее прогрессивным и эффективным способом литья стали является разливка на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), поскольку этот способ позволяет получать высококачественные заготовки и создает условия для комплексной автоматизации технологического процесса. Важнейшим технологическим звеном МНЛЗ, обеспечивающим начальную кристаллизацию стали и формирование правильной геометрии слитка, является кристаллизатор. Процессы, происходящие в кристаллизаторе МНЛЗ, являются основополагающим фактором, определяющим качество производимой непрерывно-литой заготовки.

Исследование режимов работы кристаллизатора МНЛЗ, а также факторов, влияющих на стабильность уровня металла, включая методы их оценки и компенсации при помощи разработки новых или модернизации существующих систем автоматического управления (САУ), является актуальным направлением.

Таким образом, повышение эффективности работы МНЛЗ путем обоснования структуры и параметров модифицированной системы автоматического управления в нестационарных режимах, позволяющей повысить качество непрерывно-литой заготовки за счет стабилизации уровня металла в кристаллизаторе является **актуальной задачей**, имеющей большое значение для металлургической промышленности.

Работа выполнена в соответствии с тематическим планом ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» по темам НИР № Н-15-05 «Современные методы исследования динамических процессов в системах контроля, управления и телекоммуникаций», № Н-3-11 «Исследование и разработка методов проектирования и повышения технической эффективности цифровых систем управления, информационно-измерительных систем и телекоммуникаций», № Н-9-16 «Разработка системы автоматического управления очередью пограничного маршрутизатора в инфокоммуникационных системах».

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросами совершенствования конструкции, улучшения условий эксплуатации МНЛЗ, а также проблемами автоматизации технологических элементов МНЛЗ посвящено большое количество отечественных и зарубежных трудов.

Отечественные разработки в основном представляют собой решения на базе промышленных контроллеров (ПИД-регулятор и его вариации),

некоторые с использованием наблюдателей состояния. Зарубежные авторы отдают предпочтение контроллерам на базе нечеткой логики, управления с прогнозирующими моделями (MPC-регуляторы). В некоторых работах для оценки неизмеряемых параметров разливки используются нейро-сети.

Однако, несмотря на значительный объем исследований, направленных на повышение эффективности работы МНЛЗ, синтезу систем управления уровнем металла в кристаллизаторе уделяется недостаточно внимания. В этих исследованиях не учитываются технические ограничения технологических элементов, в частности исполнительных устройств. Исследователи часто ограничиваются линеаризованными моделями технологических аппаратов (сталеразливочный и промежуточный ковш, кристаллизатор), а параметры регуляторов настроены для статических режимов работы и дают неудовлетворительное качество переходных процессов в нестационарных режимах работы МНЛЗ.

Для МНЛЗ, которые в настоящее время уже находятся в эксплуатации, вопрос улучшения режимов работы необходимо решать с минимальными конструктивными изменениями, за счет применения новых алгоритмов управления.

**Цель и задачи исследований.** Цель работы – разработать структуру и обосновать параметры модифицированной системы управления уровнем металла в нестационарных режимах литья заготовок, позволяющей повысить качество непрерывно-литой заготовки за счет стабилизации уровня металла в кристаллизаторе.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Определить факторы, влияющие на величину отклонения уровня металла в кристаллизаторе при работе МНЛЗ в нестационарных режимах с целью снижения его неустойчивости, а также установить особенности взаимодействия технологических аппаратов участка «стальковш-кристаллизатор».

2. Разработать математическую модель технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор», отражающую взаимосвязь отдельных технологических аппаратов и исследовать ее динамические свойства по каналам управления и возмущений. Провести имитационное компьютерное моделирование изменения уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ в различных режимах разливки.

3. Синтезировать модифицированную систему автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок, робастную к действию внешних возмущений в заданных диапазонах и параметрической неопределенности.

4. Разработать метод оценки степени зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ в процессе разливки на основании математической модели технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор».

5. Разработать структуру технической реализации модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок как составной части системы управления процессом непрерывной разливки стали на основе современных средств промышленной автоматизации.

**Объект исследования.** Объектом исследования является система автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок.

**Предмет исследования.** Предметом исследования являются методы анализа и синтеза системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Получила дальнейшее развитие динамическая математическая модель технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор», основанная на комплексном рассмотрении материальных балансов и отражающая взаимосвязь функционирования отдельных технологических аппаратов, позволяющая формализовать в комплексе процессы анализа и синтеза системы управления. При этом впервые учтены конструктивные особенности и заданные технологическим регламентом ограничения.

2. Впервые предложена структура модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе в нестационарных режимах работы МНЛЗ, отличающаяся тем, что регулятор и компенсатор имеют переменную структуру, зависящую от режима разливки заготовок.

3. Дальнейшее развитие получил метод оценки степени зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ в процессе разливки, отличающийся тем, что производится расчет индекса зарастания на основании математической модели технологического процесса на участке «стальковш-кристаллизатор» с учетом нестационарности режима разливки.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость результатов исследований заключается в раскрытии особенностей протекания процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор» МНЛЗ и их использовании для совершенствования системы управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе в нестационарных режимах литья заготовок.

Практическое значение результатов исследований.

1. Разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать динамические режимы работы МНЛЗ на участке «стальковш-кристаллизатор», выполнять оперативную оценку и управление процессом поступления жидкого металла.

2. Разработаны алгоритмы настройки параметров регуляторов в соответствии с режимами функционирования МНЛЗ с учетом

технологического регламента и требуемого качества стабилизации уровня металла в кристаллизаторе.

3. Разработан алгоритм оценки изменения пропускной способности канала дозирования жидкой стали в кристаллизатор и представления оператору МНЛЗ релевантной информации для принятия решений.

4. Предложена структура и комплекс технических средств модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе в нестационарных режимах литья заготовок на основе современных промышленных контроллеров и инфокоммуникационных технологий, что позволит реализовать концепцию автоматизированного цифрового управления металлургическим предприятием.

5. Результаты, полученные в диссертационной работе, приняты к использованию ООО «КИП СТС-Восток» при составлении технических проектов модернизации систем автоматизации в металлургической промышленности и применяются на кафедре автоматике и телекоммуникаций ГОУВПО «ДОННТУ» в учебном процессе.

**Методология и методы исследования.** Для решения поставленных задач использованы: системный подход к анализу процессов массопереноса; метод декомпозиции; метод численного решения задач массового баланса; метод идентификации и анализа результатов эксперимента. Также в работе применялась методология имитационного компьютерного моделирования. Теоретической базой исследования технологического процесса непрерывной разливки стали являлись научные труды отечественных и зарубежных авторов, посвященные проблемам создания, а также совершенствования конструкции и систем управления отдельных технологических агрегатов МНЛЗ.

#### **Научные положения, выносимые на защиту.**

1. Методом математического моделирования с учетом нелинейности процессов и параметрических связей установлено, что существует подмножество рациональных значений параметров регуляторов, при которых обеспечивается уменьшение степени отклонения уровня металла на 30-40 % в кристаллизаторе в нестационарных режимах литья заготовок.

2. Показано, что введение в структуру системы компенсатора возмущений с переменной структурой позволяет достичь уменьшения степени отклонения уровня в 2-5 раз по сравнению с системой управления, построенной по принципу обратной связи в нестационарных режимах литья заготовок.

3. Установлено, что для повышения точности оценки степени зарастания канала дозирования жидкого металла в процессе литья заготовок целесообразно совместное использование двух методов: метода, основанного на математической модели, и метода на основе прямых измерений, что позволит разработать способ эффективного использования металлургического оборудования.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается

корректностью формулировки математического описания задачи; использованием основополагающих положений теории массового баланса и истечения жидкостей, современных методов имитационного моделирования в компьютерной среде с применением специализированного программного обеспечения.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов, существу полученных результатов диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в частности: п.1. «Автоматизация производства заготовок, изготовления деталей и сборки»; п.13 «Теоретические основы и прикладные методы анализа и повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

Основные положения диссертационной работы апробированы на научно-технических конференциях: XIII международная конференция по автоматическому управлению «Автоматика - 2006», г. Винница, 25-28 сентября 2006 г.; XVIII международная конференция по автоматическому управлению «Автоматика - 2011», г. Львов, 28-30 сентября 2011 г.; XIX международная конференция по автоматическому управлению «Автоматика - 2012», г. Харьков, 26-28 сентября 2012 г.; VIII Всеукраинская научно-практическая конференция «Современные тенденции развития информационных технологий в науке, образовании и экономике», г. Луганск, 17 – 18 марта 2014 г.; Международная научно-техническая конференция «Завалишинские чтения-2016», г. Санкт-Петербург, 11-15 апреля 2016 г.

**Личный вклад соискателя.** Все результаты и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и ее реализации, цели и задач работы, в выборе методов и направлений исследований, выполнении теоретических, аналитических и экспериментальных исследований, разработке положений и методических рекомендаций по использованию результатов работы, а также их внедрению в производство.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 14 научных работах, в том числе: 1 работа в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН ДНР; 7 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН Украины; 1 – в других изданиях; 5 – по материалам конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа содержит 161 страницу машинописного текста и состоит из введения, пяти разделов, заключения, списка литературы из 107 источников на 12 страницах и 6 приложений на 12 страницах. Основной текст, изложенный на 138 страницах, иллюстрируется 91 рисунком и содержит 6 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе работы «Состояние вопроса управления технологическим процессом непрерывной разливки стали» рассмотрен, как сложный, взаимосвязанный процесс непрерывной разливки стали в заготовки. Проведен анализ особенностей технологического процесса непрерывной разливки стали (НРС). На основе системного подхода технологический НРС стали представлен как сложный многомерный многосвязный объект, что не учтено существующими САУ.

Технологическая схема процесса НРС представлена на рисунке 1.

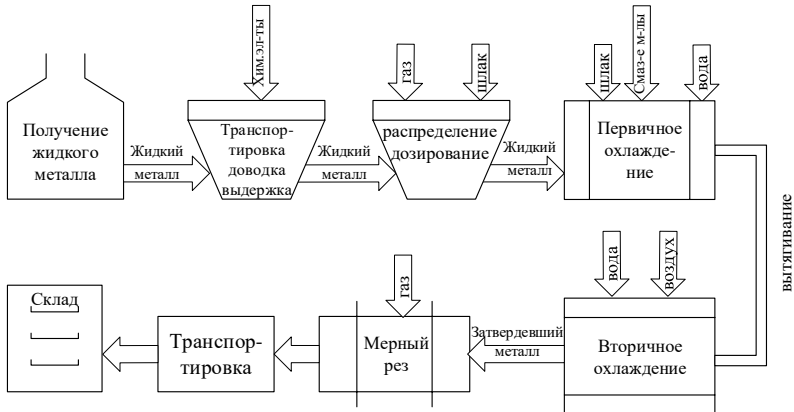


Рисунок 1 – Схема технологической цепочки процесса получения непрерывно-литой заготовки

Стабильность процесса НРС, являющаяся одним из главных условий получения высококачественной заготовки, во многом определяется степенью выполнения технологических требований на участке дозирования стали из стальной ванны в кристаллизатор. Упрощенная схема участка «стальковша-кристаллизатор» представлена на рисунке 2.

На основании проведенного анализа технологического процесса НРС из стальной ванны в кристаллизатор как объекта управления сделан вывод, что рассматриваемый процесс является сложным, многомерным и многосвязным объектом управления.

Обзор существующих алгоритмов и методов построения систем управления процессом показал, что существует ряд нерешенных проблем:

- отсутствует обобщенная динамическая математическая модель технологического процесса НРС на участке «стальковша-кристаллизатор»;
- параметры регуляторов настроены для статических режимов и часто дают неудовлетворительное качество переходных процессов в нестационарных режимах литья заготовок.



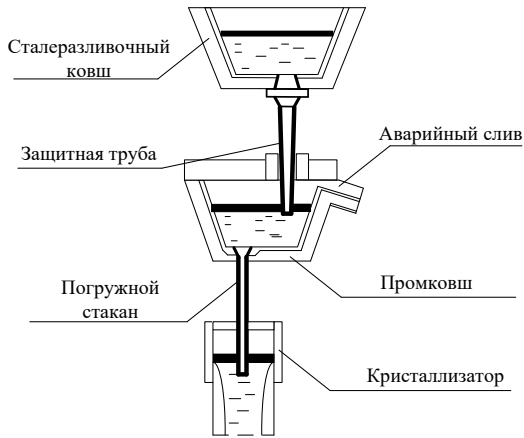


Рисунок 2 – Устройство МНЛЗ на участке «стальковш-кристаллизатор»

На основании выявленных нерешенных задач на теоретическом и практическом уровне возникает проблема, связанная с совершенствованием САУ стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья, что позволило сформулировать цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** «Математическая модель и исследование динамики технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор» проведена декомпозиция участка «стальковш-кристаллизатор» (Рисунок 3).

Для стальковша (СК) приняты следующие обозначения. Управляющие параметры:  $H^{CK}$  - положение шиберного затвора. Управляемые параметры:  $Q^{CK}$  – расход жидкого металла из стальковша;  $M^{CK}$  - вес металла в стальковше (для косвенного определения уровня металла). Возмущающие параметры:  $f_1$  – изменение параметров сталевыпускного канала (стакана-коллектора);  $f_2$  – колебания деталей привода, люфты, изменения, связанные с высокой температурой и т.д.);  $f_3$  – температура стали.

Определена зависимость изменения уровня стали в стальковше от времени ее истечения:

$$\frac{dL^{CK}(t)}{dt} = \frac{-S_0^c \mu_l}{\pi(kL^{CK}(t) + r_0^c)^2} \sqrt{2gL^{CK}(t)}, \quad (1)$$

где  $L^{CK}$  – уровень металла в стальковше;  $S_0^c$  - площадь проходного сечения шиберного затвора стальковша;  $r_0^c$  - диаметр выпускного отверстия;  $k$  – угловой коэффициент образующей усеченного конуса;  $\mu_l$  – коэффициент расхода струи для стальковша;  $g$  – ускорение свободного падения.

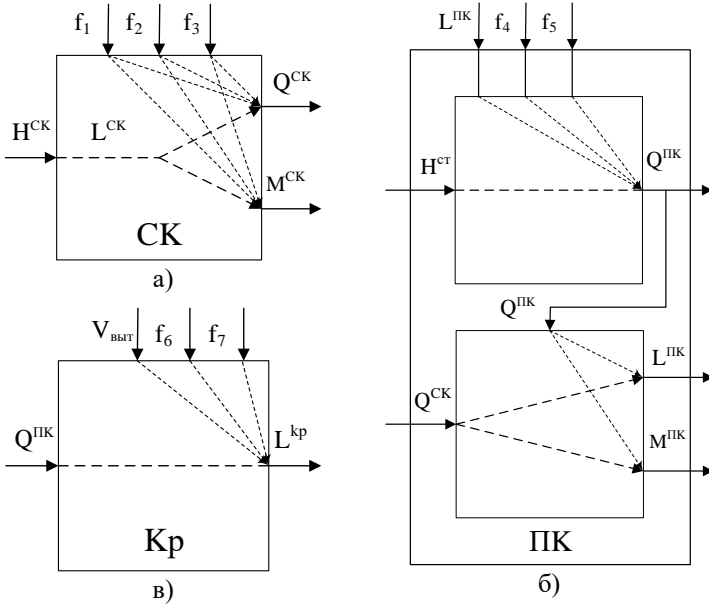


Рисунок 3 – Декомпозиция объекта управления:  
а) стальковш; б) промковш; в) кристаллизатор

Для промковша (ПК) приняты обозначения. Управляющие параметры:  $Q^{СК}$  – расход жидкого металла из стальковша. Регулируемые параметры:  $L^{ПК}$  – уровень жидкого металла в промковше. Контролируемые параметры:  $M^{ПК}$  – вес металла в промковше;  $H^{СТ}$  – высота поднятия стопора. Возмущающие переменные:  $f_4$  – изменение расхода из стальковша;  $f_5$  – колебания деталей привода.

Определена зависимость изменения уровня стали в промковше в зависимости от времени ее истечения:

$$\frac{dL^{ПК}(t)}{dt} = \frac{Q^{СК}(t) - S_0^n(t)\mu_2\sqrt{2gL^{ПК}(t)}}{(L_2 + 2R_c^n)(W_2 + 2R_c^n)}, \quad (2)$$

где  $Q^{СК}(t) = \pi_0^c \mu \sqrt{2gL^{СК}(t)} = S_0^n(t)\mu_1\sqrt{2gL^{СК}(t)}$  – количество металла, поступающего из стальковша,  $S_0^n$  – площадь проходного сечения стопорного затвора;  $R_c^n$  – текущая разность между длиной основания ковша и длиной верхнего сечения на текущем уровне;  $L_2$ ,  $W_2$  – длина и ширина основания промковша соответственно;  $\mu_2$  – коэффициент расхода струи для промковша;  $g$  – ускорение свободного падения.

Для кристаллизатора (Кр) приняты обозначения. Управляющие параметры:  $Q^{СК}$  – расход жидкого металла из промковша. Регулируемые

параметры:  $L^{kp}$  – уровень жидкого металла в кристаллизаторе. Контролируемые переменные:  $L^{kp}$  – уровень жидкого металла в кристаллизаторе. Возмущающие переменные:  $f_6$  – изменение пропускной способности канала дозирования жидкого металла;  $f_7$  – люфты механизмов;  $V_{выт}$  – скорость вытягивания заготовки.

Определена зависимость изменения уровня металла в кристаллизаторе в зависимости от времени ее истечения:

$$\frac{dL^{kp}(t)}{dt} = \frac{1}{S^{kp}} (Q^{ПК}(t) - Q^{kp}(t)), \quad (3)$$

где  $Q^{ПК}(t) = \pi_0^n \mu_2 \sqrt{2gL^{ПК}(t)} = S_o^n(t) \mu_2 \sqrt{2gL^{ПК}(t)}$  – количество поступающего из проковша металла;  $S^{kp}$  – сечение кристаллизатора;  $Q^{kp}(t) = V_{выт}(t) S_{кр}$  – количество удаляемого из кристаллизатора металла.

Проведено моделирование свободного последовательного истечения 50 т жидкой стали на участке «стальковш-кристаллизатор» (Рисунок 4).

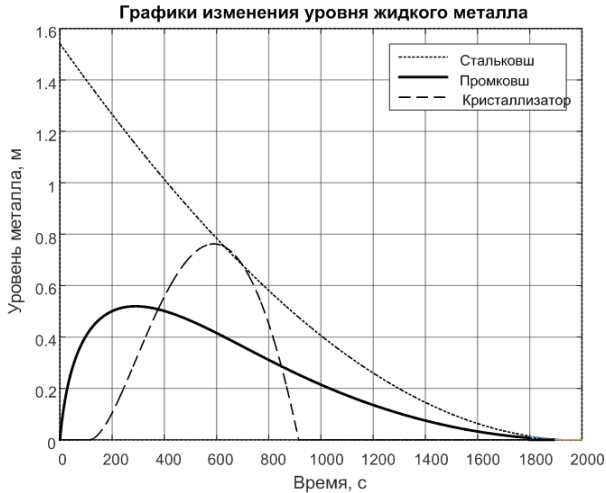


Рисунок 4 – График переходных процессов изменения уровней жидкого металла

Анализ результатов моделирования подтверждает соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технологического процесса, а также данным, приведенных в литературных источниках.

Таким образом, разработанная математическая модель технологического процесса НРС адекватно отображает динамические процессы, протекающие на участке «стальковш-кристаллизатор» МНЛЗ, позволяет проводить исследования динамики работы и может быть использована для синтеза САУ стабилизацией уровня металла нестационарных режимах литья.

**В третьем разделе** «Синтез модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок» рассматриваются задачи разработки структуры и определения параметров регуляторов САУ стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок в соответствии с требованиями технологического регламента.

Разработана функциональная схема модифицированной САУ стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ, представленная на рисунке 5.

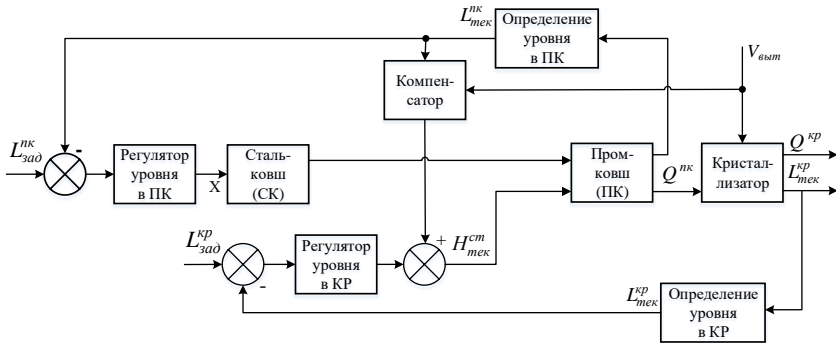


Рисунок 5 – Функциональная схема модифицированной САУ стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ

В работе предлагается использовать регулятор с переменной структурой:

1) при запланированном изменении задания и выходе объекта на установившийся режим – регулятор с пропорциональным законом управления:

$$U_{\text{рег}}(t) = k_p e(t). \quad (4)$$

2) в установившемся режиме для быстрой компенсации неконтролируемых возмущений и точной отработки задания – регулятор с пропорционально-интегральным законом управления:

$$U_{\text{рег}}(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Разработан алгоритм настройки параметров регуляторов в соответствии с режимами функционирования МНЛЗ и требуемого качества стабилизации уровня металла в кристаллизаторе на основании численного моделирования с фиксированным шагом по параметрам регулятора.

1. Задаются граничные значения коэффициентов регулятора  $k_p^{\min(\max)}$  ( $k_i^{\min(\max)}$ ), а также шаг изменения  $dk_p$  ( $dk_i$ ). На первом шаге принимается

$$k^1_p = k_p^{\min} \quad (k^1_i = k_i^{\min}).$$

2. Вычисляется реакция замкнутой системы на задающее воздействие, если она не удовлетворяет условию

$$L^{\min} \leq L \leq L^{\max}, \quad (6)$$

тогда выполняется переход к шагу 6.

3. Вычисляется величина управляющего воздействия  $u(t)$ , формируемого регулятором. Если она не удовлетворяет условию  $u^{min} \leq u \leq u^{max}$ , тогда выполняется переход к шагу 6.

4. Вычисляются показатели качества переходных процессов. Если они не удовлетворяют требуемым, выполняется переход к шагу 6.

5. Запоминается параметр  $k_p^i$  ( $k_i^i$ ) как допустимый.

6. Изменяется настройка регулятора

$$k_p^{i+1} = k_p^i + dk_p \quad (k_i^{i+1} = k_i^i + dk_i),$$

и проверяется выполнение условия достижения граничных значений  $k_p^{max}$  ( $k_i^{max}$ ). При достижении граничных значений вычислительный процесс завершается, в противном случае вычислительный алгоритм повторяется с шага 2.

В результате работы предложенного алгоритма найдена область рациональных значений параметров регуляторов, при которых переходные процессы в системе управления стабилизацией уровня металла обладают лучшими показателями качества (на 30-40 %) по сравнению с допустимыми. На рисунке 6, на примере регулятора уровня металла в кристаллизаторе, представлены полученные в процессе настройки результаты.

Расчет компенсатора по каналу «скорость вытягивания – уровень металла в кристаллизаторе» проведен в соответствии с принципом инвариантности.

Синтезирован статический компенсатор с переменным коэффициентом компенсации:

$$K_k(L^{ПК}) = -\frac{K_{\text{воз}}}{K_{\text{упр}}(L^{ПК})}, \quad (8)$$

где  $K_{\text{упр}}(L^{ПК})$  - коэффициент передачи по каналу управления, зависящий от уровня металла в проковше;  $K_{\text{воз}}$  - коэффициент передачи по каналу возмущения.

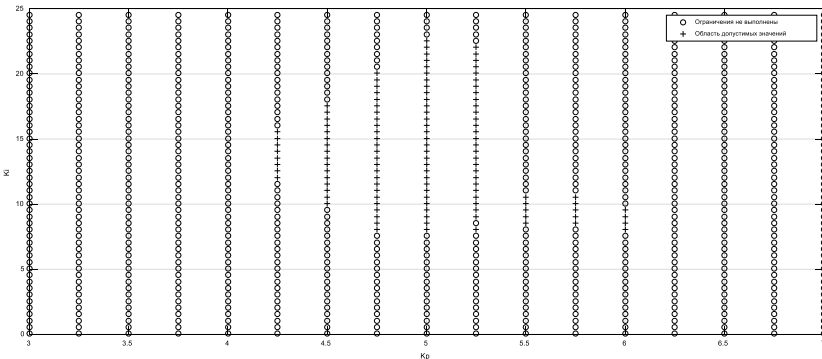


Рисунок 6 – Область допустимых значений параметров  $k_p$  и  $k_i$ , полученная в результате настройки регулятора уровня металла в кристаллизаторе

На рисунке 7 представлены переходные процессы в САУ стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе при использовании регулятора с полученными параметрами при действии ограниченного возмущения по скорости вытягивания.

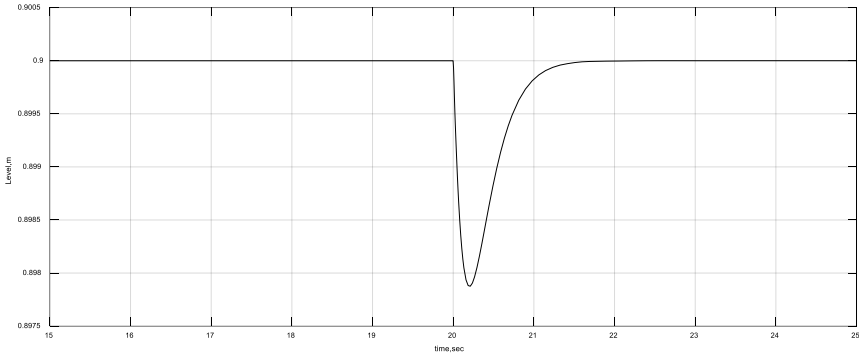


Рисунок 7 – Переходные процессы в САУ стабилизацией уровня металла

Проанализировав полученные результаты моделирования (Рисунок 8), можно сделать вывод, что введение в структуру системы компенсатора возмущений с переменной структурой позволяет достичь уменьшения степени отклонения уровня в 2-5 раз по сравнению с САУ, построенной по принципу обратной связи в нестационарных режимах литья заготовок.

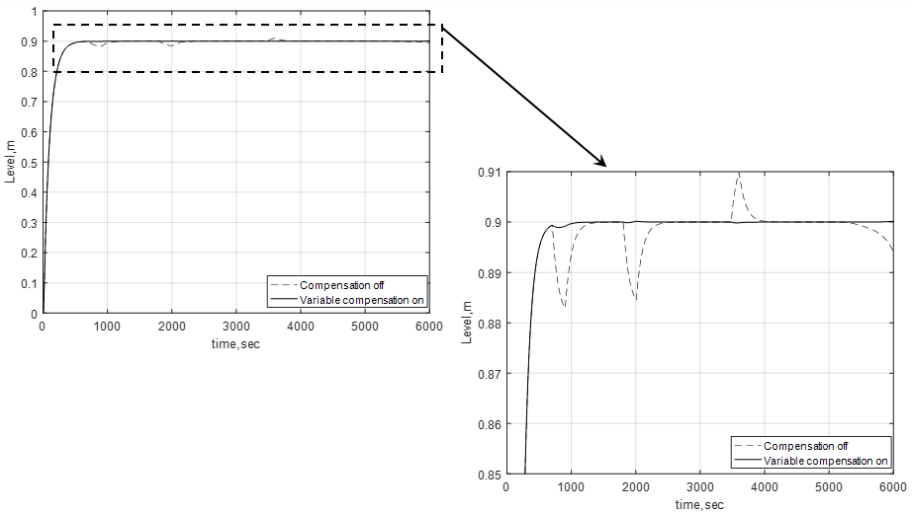


Рисунок 8 – Графики переходных процессов в комбинированной САУ с переменным коэффициентом компенсации  $K_k$

Выяснено, что полностью компенсировать изменение пропускной способности канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор за счет обратной связи не представляется возможным, вследствие физических ограничений дозирующих устройств, однако можно оценить процент зарастания с целью принятия решения о необходимости замены соответствующих устройств.

В четвертом разделе «Оценка степени зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ» проведено исследование влияния на работу системы управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ изменения пропускной способности канала дозирования жидкой стали из промковша в кристаллизатор МНЛЗ.

Исследовались следующие методики расчета такого параметра оценки уменьшения проходного сечения погружных стаканов, как индекс зарастания *C.I. (Clogging Index)*:

$$C.I_1 = 1 - \frac{Q_{\phi}^{ПК}}{Q_m^{ПК}}, \quad (9)$$

$$C.I_2 = 1 - \frac{H_m^{cm}}{H_{\phi}^{cm}}, \quad (10)$$

где  $Q_m^{ПК} = S (H_m^{cm}) \mu \sqrt{2gL^n}$  – теоретический расход металла и промковша;  $Q_{\phi}^{ПК} = Q^{сп} = V_{выт} S^{сп}$  – фактический расход металла и промковша;  $H_m^{cm}$  – теоретическая высота поднятия стопора промковша;  $H_{\phi}^{cm}$  – фактическая высота поднятия стопора промковша.

Проведено исследование точности оценки степени зарастания канала дозирования с использованием методик (9)-(10) методами математического моделирования.

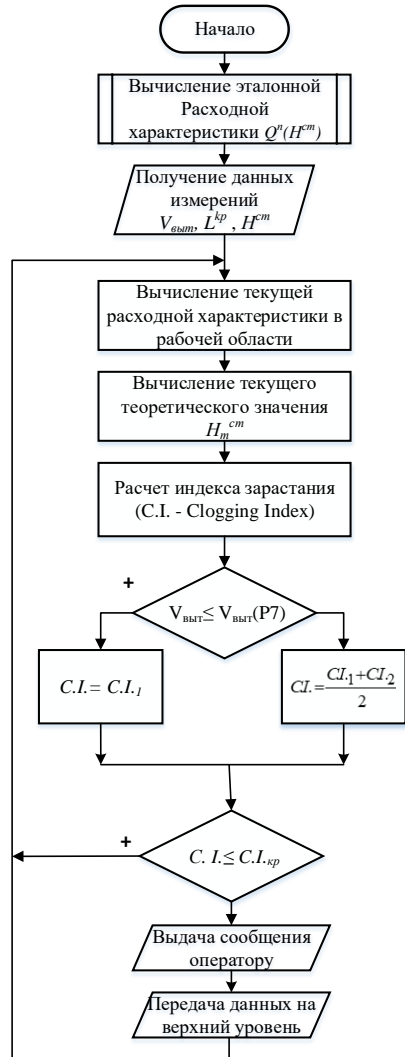


Рисунок 9 – Алгоритм работы подсистемы оценки индекса зарастания

Выявлено, что оценка индекса зарастания на основе выражения (10) может давать значения с недостатком до 5% при снижении уровня металла в промковше и повышении скорости разливки, причем точность оценки ухудшается при увеличении зарастания.

Установлено, что для получения более точной оценки степени зарастания, расчет индекса зарастания необходимо осуществлять в зависимости от режима разливки: целесообразным является использовать  $C.I._1$  в стационарном режиме разливки, в нестационарном режиме - использовать  $C.I._2$  или усредненный результат обеих формул.

В результате предложен алгоритм оценки изменения пропускной способности канала дозирования жидкой стали в кристаллизатор и представления оператору МНЛЗ релевантной информации для принятия решений (Рисунок 9).

Таким образом, разработанная структура системы и алгоритмы автоматического управления обеспечивают выполнение технологического регламента в нестационарных режимах литья заготовок и могут быть использованы при построении технической реализации модифицированной САУ стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок.

**В пятом разделе** «Разработка структуры технической реализации модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок» предложен вариант построения САУ уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ и согласования ее с децентрализованной многоуровневой системой управления технологическим процессом НРС на основе современного оборудования и программного обеспечения.

Схематично предлагаемый вариант технической реализации представлен на рисунке 10.

Таким образом, предложена структура комплекса технических средств САУ стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок в составе системы управления НРС на базе современных средств промышленной автоматизации и информационных технологий, обеспечивающая объективную и оперативную оценку текущей ситуации, принятия управленческих решений, ликвидацию информационных и организационных барьеров между управленческим и технологическим уровнями, интеграцию различных подсистем в единую систему управления предприятием.



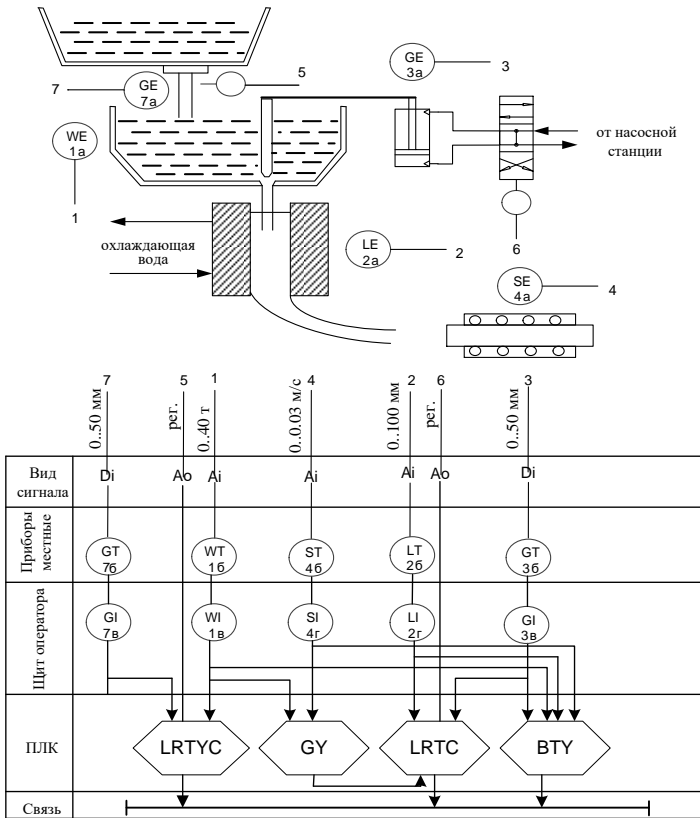


Рисунок 10 – Функциональная схема автоматизации

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и приведено решение научно-практической задачи совершенствования системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок, позволяющее выполнять требования технологического регламента, повысить безотказность и долговечность системы, придать ей свойства открытости, масштабируемости и тиражируемости.

По результатам диссертационной работы сформулированы следующие выводы:

1. Выполнен анализ технологии непрерывной разливки стали и существующих систем автоматического управления процессом разливки стали в заготовки. В результате определено, что в нестационарных режимах работы

наблюдаются существенные колебания уровня металла в кристаллизаторе, при этом эффективность работы существующих систем управления процессом разливки значительно ухудшается.

2. С использованием системного подхода технологический процесс непрерывной разливки стали представлен как сложный многосвязный объект, что не учитывалось в существующих и применяющихся в настоящее время системах автоматического управления уровнем металла, построенных на основе принципа управления по отклонению. Декомпозиция процесса непрерывной разливки стали на ряд технологических участков позволила определить основные переменные, влияющие на ход процесса, а также выявить взаимосвязь между участками технологической схемы как объектами управления. Разработана динамическая математическая модель технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор», основанная на рассмотрении материального баланса с учетом существующих технических ограничений. Анализ результатов моделирования подтверждает соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технологического процесса, а также результатам, приведенным в литературных источниках.

3. Выполнен синтез модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок. Предложена структура комбинированного управления, на основе компенсации возмущающих воздействий с использованием статического компенсаторов с переменной структурой и обратной связи по регулируемым координатам с использованием регулятора с переменной структурой. Методом математического моделирования найдены области допустимых значений параметров регуляторов и проведено исследование качественных показателей динамических процессов по выходному параметру. Исследования показали, что применение комбинированного управления позволяет снизить колебания уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ в 2-5 раз по отношению к переходным процессам в системе, построенной по принципу отклонения. Разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать динамические режимы работы МНЛЗ на участке «стальковш-кристаллизатор», выполнять оперативную оценку и управление процессом поступления жидкого металла.

4. Разработана математическая модель оценки зарастания канала дозирования жидкого металла в процессе литья на основании математической модели массопереноса с использованием данных измерений. Этот показатель служит достаточно надежным инструментом для планирования замены технологического оборудования. Исследовано влияние измеряемых параметров разливки, а именно значения скорости втягивания и уровня металла в промковше на индекс зарастания, рассчитанный с использованием двух различных подходов. В результате предложен модифицированный метод расчета индекса зарастания зависимости от режима разливки. Разработан алгоритм оценки изменения пропускной способности канала дозирования

жидкой стали в кристаллизатор и формирования рекомендаций о замене погружного стакана.

5. Разработана структура комплекса технических средств модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок на основе современных промышленных контроллеров и инфокоммуникационных технологий, что позволит реализовать концепцию автоматизированного цифрового управления металлургическим предприятием.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Донецкой народной республики:**

1. Волууева О.С. Алгоритм настройки параметров регуляторов для стационарных и нестационарных режимов работы технологических установок / **О.С. Волууева**, Н.Н. Чернышев // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – Донецк, ДонИЖТ, 2018. – Номер 50. – С. 15-21.

**- в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых Министерством образования и науки Украины:**

2. Волууева, О.С. Основные функции компьютерной системы управления процессом непрерывной разливки стали / **О.С. Волууева**, В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 88. – С. 63-69.

3. Волууева, О.С. Система автоматического управления скоростью вытягивания на прямолинейном участке МНЛЗ / **О.С. Волууева**, Н.В. Жукова, В.В. Корчак // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 183. – С. 6-11.

4. **Волууева, О.С.** Система регулирования положения стопорной системы промковша машины непрерывного литья заготовок / О.С. Волууева // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці: ЧНУ, 2012. – Том 3, випуск 2. – С.74-78.

5. **Волууева, О.С.** Комбинированная система управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ / О.С. Волууева // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – Донецьк, ДонІЗТ, 2013. – Випуск 34. – С. 186-192.

6. **Волууева, О.С.** Компенсация эффекта интегрального насыщения регулятора в системе управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ / О.С. Волууева // Наукові праці Донецького національного технічного

університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк, ДонНТУ, 2013. – Випуск 2 (25). – С. 13-20.

7. Волюева, О.С. Компенсация зарастания канала дозирования жидкого металла в системе управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ / **О.С. Волюева**, Н.Н. Чернышев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк, ДонНТУ, 2014. – Вип. 2(27) – С. 62-69.

8. Волюева, О.С. Оценка зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ / **О.С. Волюева**, Н.Н. Чернышев, В.Н. Ткаченко // Журнал "Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті" (Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте) - Informacijno-keruuci sistemi na zaliznicnomu transporti – 2014. – №2(105). – С. 43-47.

**- в других изданиях:**

9. Волюева, О.С. Разработка многоуровневой иерархической системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали / **О.С. Волюева**, В.Н. Ткаченко, А.А. Иванова // Академический вестник. – Кривой Рог: КрТО МАКНС, 2006. – №17-18. – С. 27-31.

10. Волюева, О.С. Координация взаимодействия локальных систем регулирования процесса непрерывной разливки стали [Электронный ресурс] / В. Н. Ткаченко, **О. С. Волюева** // Матеріали XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2006), 25-28 вересня 2006 року - Вінниця: "УНІВЕРСУМ-Вінниця", 2006. – С. 240.

11. Волюева, О.С. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания МНЛЗ / **О.С. Волюева**, Н.В. Жукова, В.Н. Ткаченко // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2011), 28-30 вересня 2011 року - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 204-205.

12. **Волюева, О.С.** Система автоматического управления скоростью вытягивания на прямолинейном участке МНЛЗ / О.С. Волюева // Автоматика. Automatics - 2012. XIV Міжнародна конференція з автоматичного управління, 26-28 вересня 2012 року: матеріали конференції / Відп. за вип. А.П. Ладанюк. - К.: НУХТ, 2012. - С. 170-171.

13. Волюева, О.С. Модернизированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ / **О.С. Волюева**, Н.Н. Чернышев // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці : матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Луганськ, 17 – 18 березня 2014 р.). – Луганськ: Вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2014. – С. 122-124.

14. Волюева, О.С. Математическая модель изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор» установки непрерывной разливки стали / **О.С. Волюева**, Н.Н. Чернышев // Сборник трудов конференции «Завалишинские чтения» 11-15 апреля 2016г. Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического

приборостроения: Изд-во Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, г. Санкт-Петербург, 2016. – С. 278-283.

**Личный вклад соискателя в публикациях:** [2,9,10] – рассмотрена структура и функции иерархической компьютерной системы управления процессом НРС; [3,11,12] – исследуется система управления уровнем металла в кристаллизаторе во взаимосвязи с работой тянуще-правильного устройства; [4,13] – разработана система подчиненного регулирования положения стопорной системы промковша МНЛЗ; [5,6] – разработана комбинированная система управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ с компенсацией возмущения по скорости вытягивания заготовки и влияния эффекта интегрального насыщения; [7,8] – проведены оценка и исследование изменения расходной характеристики дозирующего устройства промковша вследствие явления зарастания его внутренней поверхности; [1] – предложен алгоритм настройки регулятора с переменной структурой; [14] – представлена динамическая модель истечения жидкого металла из промковша на участке «стальковш-кристаллизатор» МНЛЗ.

## АННОТАЦИИ

**Волуева О.С. Модифицированная система автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2018.

В диссертационной работе дано теоретическое обоснование и новое решение научно-практической задачи модернизации системы автоматического управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ.

Для решения поставленной задачи предложено использовать принцип комбинированного управления на основе компенсации основных возмущений и обратной связи по регулируемой координате. Предложено использование регулятора с переменной структурой, параметры которого настроены методами численного моделирования с учетом ограничений на управление и показатели качества переходных процессов. Проведен синтез статических компенсаторов с постоянным и переменным коэффициентом компенсации в соответствии с принципом инвариантности. Разработана модификация метода и алгоритм оценки степени зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ в процессе разливки.

Для синтеза системы управления на основе законов массового баланса с учетом технологических ограничений разработана математическая модель процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор». Разработано программное обеспечение для моделирования,

позволяющее исследовать качественные характеристики замкнутой системы управления при различных входных и возмущающих параметрах, выполнять оперативную оценку и управление динамическими режимами работы объекта.

Разработана структура комплекса технических средств системы управления на базе современных промышленных технологий автоматизации.

**Ключевые слова:** непрерывная разливка стали, нестационарный режим литья, математическая модель, комбинированная система управления, регулятор, статический компенсатор, индекс зарастания.

## ABSTRACT

Volueva, O.S. **Modified control system for metal level stabilization in non-stationary continuous casting modes.**

Ph.D. (Candidate's) Thesis in Engineering Science by specialty 05.13.06 "Automation and control of technological processes and industries (by industry) (engineering science)". DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY, Donetsk, 2018.

Scientific and practical task of CCM mold level control system modification is considered in the thesis.

Feedforward/feedback control structure is suggested, including the controller with variable structure, is proposed, which parameters are adjusted by numerical simulation methods, based on control constraints and transient quality parameters. Synthesis of static compensators with a constant and variable compensation coefficient is provided in accordance with the invariance principle. Modified method and algorithm of the clogging index estimating are developed.

The mathematical model of the continuous casting of steel at the "ladle-mold" section, based on the mass balance and technological limitations, is provided. The software for simulation and study of the mold level stabilization control system in the CCM is developed.

The technical structure of distributed control system based on modern industrial automation technologies is developed.

**Key words:** continuous casting of steel, non-stationary casting mode, mathematical model, combined control system, regulator, static compensator, clogging index.