

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

На правах рукописи

УДК 681.5:621.74.04

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Чернышев Н. Н.

Идентичность всех экземпляров

ПОДТВЕРЖДАЮ

Ученый секретарь диссертационного

совета Д 01.024.04

к.т.н.

Т.В. Завадская

Донецк – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ.....	12
1.1 Краткое описание непрерывного литья стали	12
1.2 Анализ МНЛЗ как объекта управления.....	21
1.3 Обзор существующих решений.....	26
1.4 Постановка задачи диссертационного исследования.....	32
1.5 Выводы по разделу.....	33
РАЗДЕЛ 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА УЧАСТКЕ «СТАЛЬКОВШ- КРИСТАЛЛИЗАТОР».....	35
2.1 Декомпозиция объекта управления.....	35
2.2 Математическая модель истечения жидкого металла из стальковша.....	37
2.3 Математическая модель истечения жидкой стали из промковша	48
2.4 Математическая модель истечения жидкой стали из кристаллизатора	52
2.5 Математическая модель изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор».....	53
2.6 Линеаризация запирающих элементов системы.....	55
2.7 Выводы по разделу	59
РАЗДЕЛ 3 СИНТЕЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК	60
3.1 Обоснование структуры разрабатываемой системы управления	60

3.2 Синтез локальной системы регулирования уровня в проковше МНЛЗ.....	62
3.3 Синтез локальной системы регулирования уровня в кристаллизаторе МНЛЗ.....	67
3.4 Синтез статических компенсаторов.....	78
3.5 Выводы по разделу 3.....	87
РАЗДЕЛ 4 ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАРАСТАНИЯ КАНАЛА ДОЗИРОВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ.....	
4.1 Актуальность задачи.....	89
4.2 Алгоритм оценки изменения пропускной способности канала дозирования жидкой стали в кристаллизатор в процессе разливки	91
4.3 Выводы по разделу.....	102
РАЗДЕЛ 5 РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК	
5.1 Функциональная схема технических средств системы автоматического управления.....	103
5.2 Выбор и разработка технических средств систем автоматического управления.....	105
5.2.1 Выбор исполнительных механизмов и датчиков	105
5.2.2 Выбор программируемого логического контроллера.....	114
5.2.3 Выбор станции удаленной периферии	115
5.2.4 Выбор интерфейсного модуля.....	117
5.2.5 Выбор блока аналоговых входов.....	118
5.2.6 Выбор модуля аналогового вывода.....	119
5.2.7 Выбор модуля регистрации перемещений.....	121
5.2.8 Выбор коммутационного модуля.....	123
5.2.9 Выбор блоков питания.....	124
5.3 Разработка человеко-машинного интерфейса.....	125

5.4 Выводы по разделу 5.....	134
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ.....	135
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	138
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139
Приложение А – Технологически регламент изменения скорости вытягивания.....	151
Приложение Б – Программа задания исходных данных конфигурации МНЛЗ	153
Приложение В – Подпрограмма настройки параметров регулятора уровня металла в промковше	155
Приложение Г – Подпрограмма настройки параметров регуляторов уровня металла в кристаллизаторе	156
Приложение Д – Техническая реализация системы автоматического управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ	158
Приложение Е – Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.....	159

ВВЕДЕНИЕ

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 (МРС-регуляторы). В некоторых работах для оценки неизмеряемых параметров разлива 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 нестабильности, 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 автоматизации и телекоммуникаций ГОУ ВПО «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: 7 работ в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН Украины; 1 работа в изданиях, входящих в перечень специализированных научных изданий, утвержденный МОН ДНР; 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.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ
НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ

1.1 Краткое описание технологии непрерывного литья стали

Непрерывная разливка стали является важнейшим технологическим этапом в металлургическом производстве, поскольку она обеспечивает перевод стали из жидкого в твердое состояние с приданием ей требуемой геометрической формы. К настоящему времени на практике реализовано много высокоэффективных решений относительно конструкции МНЛЗ. Предложено большое количество разнообразных машин: вертикальные, горизонтальные, радиальные, наклонные, криволинейные и др. В зависимости от емкости сталеразливочного ковша существуют установки с различным количеством ручьев, на которых получают слитки различных профилей (круг, квадрат и др.) и размеров [41, 62].

Схема технологической цепочки процесса получения непрерывно-литой заготовки представлена на рисунке 1.1.

Вместе с совершенствованием технологии непрерывной разливки была выработана наиболее рациональная конструкция МНЛЗ, имеющая криволинейную зону с прогрессирующим разгибом. Это позволило уменьшить затраты на строительство МНЛЗ по сравнению с предыдущими установками. Кроме того, использование систем прогрессивного многоточечного загиба и разгиба заготовки способствует значительному уменьшению пораженности заготовки внутренними трещинами [57]. Общий вид криволинейной МНЛЗ приведен на рисунке 1.2.

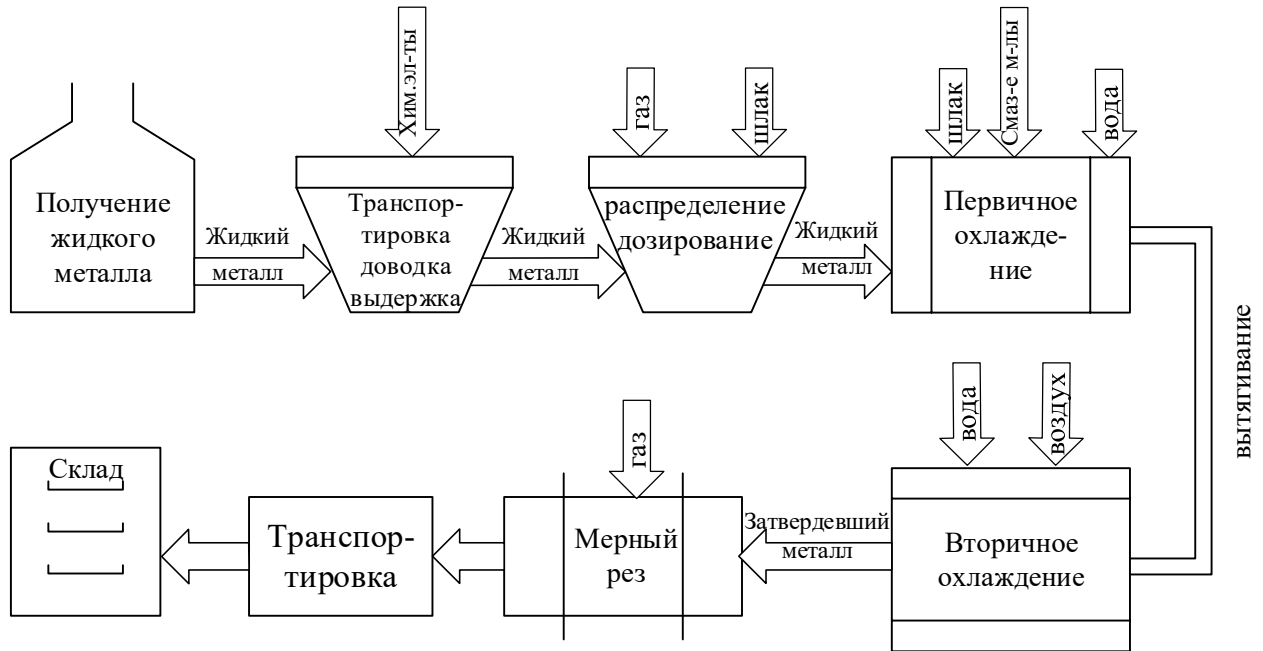


Рисунок 1.1 – Схема технологической цепочки процесса получения непрерывно-литой заготовки

На заводе полученную некоторым образом (мартеновским способом, в электропечах и т.д.) жидкую сталь подают на МНЛЗ. В стальковш поступает сталь определенного химического состава и температуры. Из стальковша она поступает в промежуточный ковш (промковш), а затем в медную интенсивно охлаждаемую водой форму - кристаллизатор. В кристаллизаторе происходит формирование твердой корочки заготовки. Затвердевшая по периметру заготовка вытягивается из нижней части кристаллизатора в зону вторичного охлаждения (ЗВО). В ЗВО продолжается его дальнейшее охлаждение путем орошения водо-воздушной смесью до окончательного затвердевания. По всей длине ЗВО расположены опорно-приводные ролики, которые также имеют внутренние каналы охлаждения. Затем полностью затвердевший, но еще достаточно горячий слиток, попадает в зону мерного реза, где его разрезают на мерные длины в соответствии с требованиями прокатного производства (обычно 5-12 м).

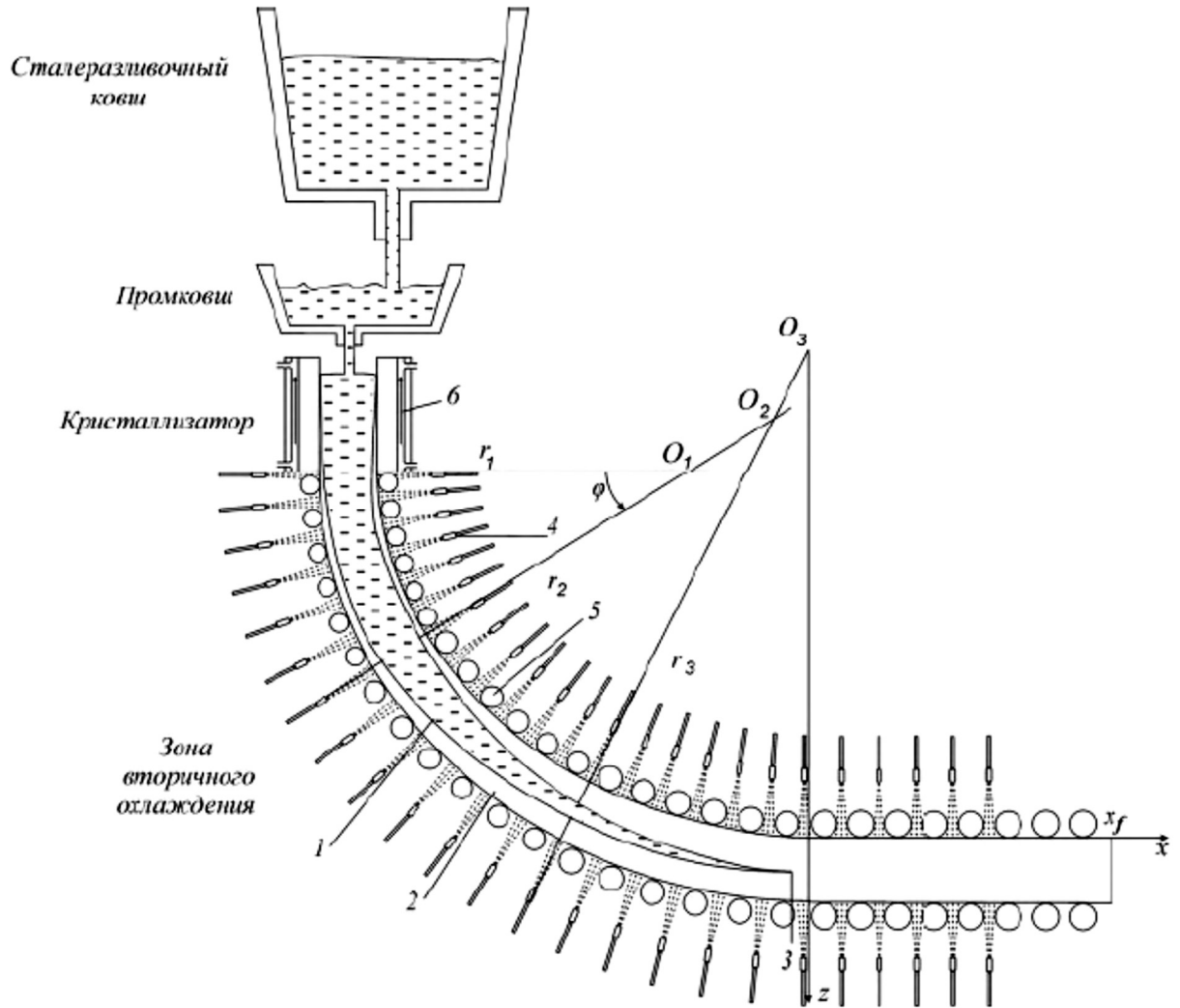


Рисунок 1.2 – Схема МНЛЗ: 1 – граница раздела фаз между жидким и твёрдым металлом, 2 – твёрдая корочка слитка, 3 – точка окончания затвердевания, 4 – форсунки, распыляющие водо-воздушную смесь, 5 – опорно-приводные ролики, 6 – каналы для охлаждающей воды внутри стенок кристаллизатора.

Общая характеристика стальной ковша.

Сталеразливочный ковш предназначен для приема металла и части шлака, выдержки металла и его разливки. Вместимость ковшей обычно равна массе одной плавки и может составлять от нескольких десятков тонн до 330-350 т жидкой стали. При этом длительность пребывания стали в ковше может составлять от 2 до 6 часов, что обуславливает высокие требования к надежности и стойкости рабочего слоя футеровки ковшей. Общий вид стальной ковша представлен на рисунке 1.3.

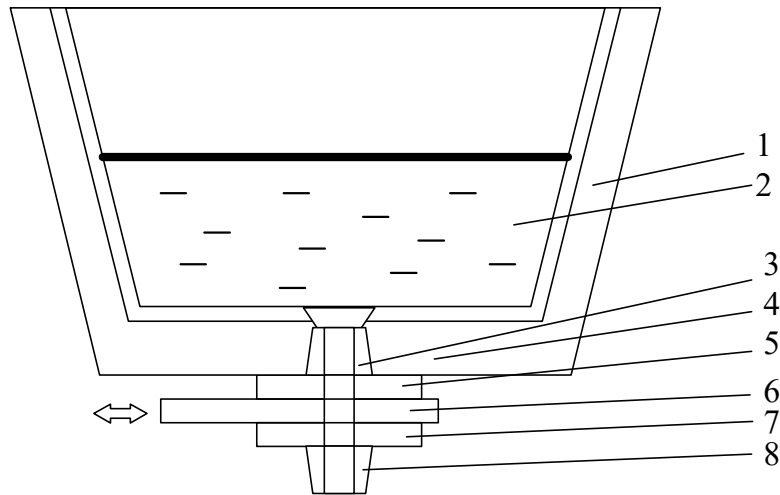


Рисунок 1.3 – Общий вид сталеразливочного ковша: 1 - рабочий слой стен ковша; 2 – жидкий металл; 3 - верхний стакан разливочного узла; 4 – днище стальной ковша; 5 – верхняя плита шиберного затвора; 6 – подвижная плита шиберного затвора; 7 – нижняя плита шиберного затвора; 8 – нижний стакан разливочного узла.

Функционально сталеразливочный ковш обеспечивает:

- транспортировку стали от сталеплавильного агрегата к МНЛЗ;
- комплексную доводку стали по химическому составу и температуре;
- временную выдержку;
- дозированный перелив стали в проковш.

Дозирование стали при переливе из сталеразливочного в промежуточный ковш осуществляется в большинстве установок через разливочный стакан посредством шиберного затвора. Шиберный затвор сталеразливочного ковша обеспечивает равномерную подачу стали в проковш в течение всего периода разливки. Кроме того, он обеспечивает перекрытие струи стали посредством смещения нижней огнеупорной плиты в случае возникновения аварийных ситуаций или замены защитной трубы.

Общая характеристика проковша.

Промежуточный ковш является буферной емкостью, так как с его помощью осуществляется согласование поступления металла из сталеразливочного ковша в кристаллизатор. При этом обеспечиваются усреднение поступающей порции металла и предотвращение попадания шлака в кристаллизатор. Общий вид проковша представлен на рисунке 1.4.

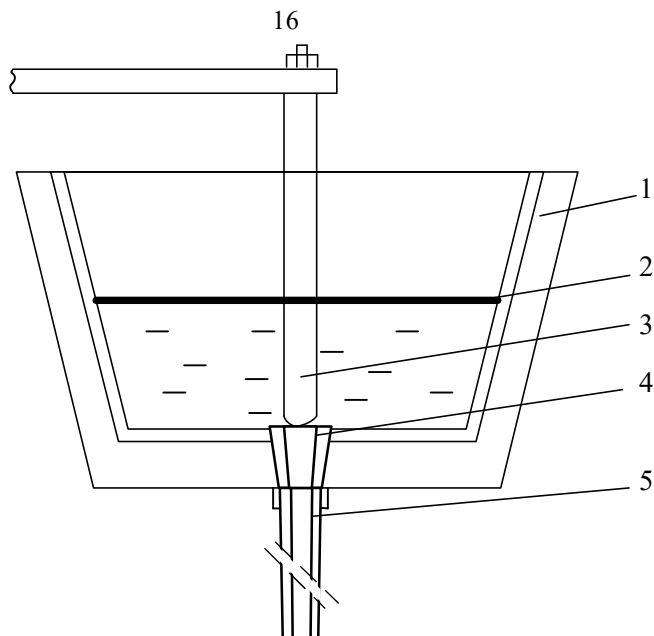


Рисунок 1.4 – Общий вид промежуточного ковша: 1 - рабочий слой стенок ковша; 2 – уровень жидкого металла; 3 – стопор-моноблок; 4 – стакан-дозатор; 5 – погружной стакан.

Конструкция и вместимость промежуточного ковша в значительной степени определяют стабильность процесса разливки стали, качество заготовки и показатели работы МНЛЗ. Необходимая вместимость промковша определяется сечением отливаемых заготовок, числом ручьев, скоростью разливки, серийностью разливки, требованиями к возможности всплытия неметаллических включений и ассимиляции их шлакообразующим покрытием и составляет в среднем 25-35 тонн. Но с целью обеспечения запаса металла, необходимого для замены сталеразливочного ковша, вместимость промковша увеличивается до 55-60 тонн, что обеспечивает возможность разливки металла с повышенными скоростями при достаточном времени для всплытия неметаллических включений, а также обеспечивает необходимую серийность разливки [66-67].

Промковш выполняет следующие функции:

- принимает сталь, выливающуюся из сталеразливочного ковша;
- накапливает металл в объемах, необходимых для стабильного процесса литья (высота налива $h = 700 \dots 1300$ мм) в течение всего период разливки;
- обеспечивает резерв металла для разливки в период замены сталеразливочного ковша;

- обеспечивает распределение и дозирование стали в кристаллизаторы МНЛЗ;
- усредняет сталь по температуре и по химическому составу в ходе разливки;
- обеспечивает рафинирование металла за счет всплытия неметаллических включений.

Таким образом, промковш обеспечивает поступление металла в кристаллизатор с определенным расходом и, обеспечивая хорошо организованную струю, позволяет разливать сталь в несколько кристаллизаторов одновременно и осуществлять серийную разливку методом плавка на плавку при смене сталеразливочных ковшей без прекращения и снижения скорости разливки.

Наиболее распространенным способом дозирования стали в процессе ее разливки является применение схемы «стакан-дозатор» - «стопор-моноблок». При этом расход металла регулируется положением головки стопора относительно стакана-дозатора при помощи гидравлического привода. Основными преимуществами данного способа дозирования являются:

- плавное и быстрое поднятие и опускание стопора;
- полное перекрытие струи;
- плотная, ровная, без перекосов вытекающая струя;
- регулировка расхода металла по каждому ручью;
- стабилизация процесса разливки металла и уровня металла в каждом кристаллизаторе.

Важнейшим функциональным элементом, обеспечивающим подвод металла из промковша в кристаллизатор, является погружной стакан, который стыкуется с нижним торцом стакана-дозатора. Погружной стакан защищает металл от вторичного окисления на участке «промковш–кристаллизатор», предотвращает загрязнение заготовки включениями шлакообразующей смеси, расположенной на зеркале металла в кристаллизаторе и обеспечивает подвод струи под уровень в кристаллизаторе, способствуя рациональной организации движения конвективных потоков в жидкой ванне..

Общая характеристика кристаллизатора.

Схематично кристаллизатор представлен на рисунке 1.5.

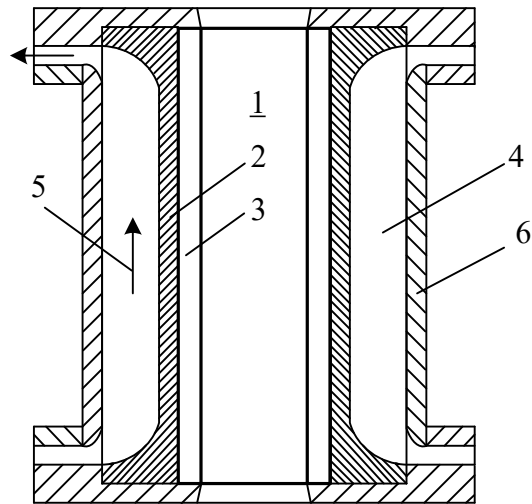


Рисунок 1.5 – Схематичное представление кристаллизатора: 1- формующая полость; 2 – основа для покрытия; 3 - рабочее покрытие; 4 – охлаждающие ребра; 5 – направление потока охлаждающей воды; 6 – рубашка кристаллизатора.

В зоне кристаллизатора отводится от 10% до 30% всего тепла, отводимого от стальной заготовки в МНЛЗ. Тепло от слитка через медные стенки передаётся охлаждающей воде. Охлаждающая вода под давлением движется по каналам внутри стенок кристаллизатора от нижнего коллектора к верхнему, омывая стенки кристаллизатора и отбирая тепло. Для исключения плёночного режима кипения и предупреждения засорения каналов накипью, вода движется с большой скоростью. Теплосъём в кристаллизаторе настолько велик, что на уровне мениска жидкий металл, коснувшись медной стенки, сразу же затвердевает.

Современная концепция МНЛЗ предполагает длину кристаллизатора 900-1000 мм, что увеличивает толщину твердой корочки заготовки на выходе из кристаллизатора при разливке на больших скоростях. При этом расстояние от верхней кромки кристаллизатора до уровня жидкой стали поддерживается в пределах 150–250 мм. Поддержание уровня металла в кристаллизаторе является очень важной и достаточно сложной задачей. Разрабатываемые в настоящее время системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ должны удерживать заданный уровень жидкого металла с точностью 1-5 мм, чтобы обеспечить необходимое качество продукции.

Для предотвращения прилипания слитка к стенкам кристаллизатора кристаллизатор совершает возвратно-поступательные колебания вдоль оси слитка.

Амплитуда колебаний современных кристаллизаторов составляет в среднем 2-4 мм [4, 5].

Тепловой режим кристаллизатора должен быть организован таким образом, чтобы при выходе из кристаллизатора толщина оболочки слитка была бы достаточна, чтобы исключить порыв металла. При этом распределение интенсивности теплоотвода по периметру и длине слитка должно быть таким, чтобы обеспечить отсутствие недопустимых напряжений, которые могли бы привести к появлению трещин. От теплообмена между заготовкой и кристаллизатором зависит скорость вытягивания слитка и качество поверхностных и подповерхностных слоёв заготовки [6, 27]. Дальнейшее охлаждение слитка происходит в зоне вторичного охлаждения (ЗВО), где он полностью затвердевает.

Общая характеристика зоны вторичного охлаждения ЗВО.

По количеству отводимого тепла ЗВО является одной из основных зон установки. Эта зона разбивается на несколько секций. Каждая секция оборудована опорно-приводными элементами (водоохлаждаемыми роликами), которые направляют движение заготовки вдоль технологической линии и предотвращают деформацию слитка от действия ферростатического давления. Между роликами с обеих сторон сляба установлены форсунки, разбрызгивающие охлаждающую водо-воздушную смесь. Принудительное охлаждение осуществляется при помощи опрыскивания поверхности слитка водо-воздушной смесью, а также за счёт отвода тепла к водоохлаждаемым роликам. Кроме того, имеют место конвективный и лучистый теплоотвод в окружающую среду с открытых участков поверхности слитка.

Важными факторами являются распределения расходов воды по секциям и общая длина ЗВО. Существует также ряд технологических требований к глубине жидкой лунки.

Интенсивность охлаждения в ЗВО существенно изменяется за счёт изменения режимов расхода воды по каждой секции [34, 38]. Форсуночно-роликовая система должна создавать условия мягкого и равномерного охлаждения застывающего слитка.

После зоны вторичного охлаждения расположена клеть тянущих роликов, которая регулирует скорость вытягивания слитка. Здесь продолжается отвод тепла.

Общая характеристика электропривода МНЛЗ.

Равномерность вытягивания непрерывнолитой заготовки является необходимым условием стабильности технологического процесса разлива. Электропривод криволинейной МНЛЗ представляет собой сложный многодвигательный комплекс, состоящий из криволинейного и прямолинейного участков, на которых слиток проходит через секции неприводных и приводных роликов тянуще-правильного устройства (ТПУ) [71]. Эти секции называют также роликовыми проводками. Неприводные роликовые проводки предназначены для поддержания формирующейся корочки сляба. Приводные предназначены для предупреждения выпучивания корочки слитка, перемещения слитка вдоль технологической оси машины и его выпрямления (правки). К приводной роликовой проводке предъявляются определенные требования, вытекающие из наличия жидкой фазы в слитке и условий работы машины. Правильный выбор приводов ТПУ и их режима работы весьма важен для обеспечения стабильной и надежной работы МНЛЗ [40, 43].

Общая характеристика гидроприводов МНЛЗ.

В целях удовлетворения все возрастающих требований к безопасности, производительности и функциональности современных МНЛЗ требуется точность в сочетании с простотой и гибкостью хода. Гидропривод позволяет осуществлять быстрое и точное возвратно-поступательное движение, в связи с чем широко применяется [26, 28]:

- 1) В механизмах качания кристаллизатора. Гидроприводы позволяют колебаниям кристаллизатора точно соответствовать криволинейному участку МНЛЗ.
- 2) Для перемещения подвижных частей запирающих элементов (стопоры, шиберы и т.д.).
- 3) Для перемещения манипуляторов (например, в устройствах быстрой замены погружных стаканов).
- 4) В механизмах перемещения и прижатия роликов, в том числе в сегментах «мягкого обжатия».
- 5) В устройствах перемещения затравки.
- 6) В механизмах поворота стенов для замены стальной.

7) Для перемещения подвижных балок в холодильных и т.д.

После ЗВО располагается зона мерного реза и доставки на участок готовой продукции.

Общая характеристика устройств мерного реза.

Процесс порезки заготовки осуществляется без остановки ее движения, что требует согласования скоростей движения заготовки и режущего устройства.

Известны термические (к ним относят газовую и плазменную резку), механические (импульсная резка и резка ножницами) и электрические методы резки заготовок.

На практике основным методом порезки заготовки является газовая резка, которая реализуется с помощью специальных машин. При этом резак должен выполнить полный рез за время, которое меньше времени продвижения заготовки на мерную длину. Для получения прямолинейного реза обеспечивается синхронизация движения слитка и резака путем их сцепления при помощи пневматических или гидравлических захватов, а также с применением специальных приводов перемещения оборудования резака [52].

После порезки заготовки передаются на холодильник, охлаждаются до температуры, обеспечивающей достаточную прочность для транспортировки крановым оборудованием, и передаются на склад готовой продукции.

1.2 Анализ участка «стальковш-кристаллизатор» как объекта управления в нестационарных режимах работы МНЛЗ

Анализ показал, что качество непрерывно-литого слитка в первую очередь определяется процессами, происходящими в кристаллизаторе МНЛЗ [2, 100, 103]. Однако, рассматривать кристаллизатор нецелесообразно без учета его взаимосвязи с предыдущими технологическими агрегатами, а именно сталеразливочным ковшом и промковшом. Участок «стальковш-кристаллизатор» представлен на рисунке 1.6.

Конструкция МНЛЗ и технология непрерывного литья постоянно совершенствуется в направлении повышения качества отливаемых слитков и

производительности машин. Следующим шагом к достижению высококачественной продукции является совершенствование систем управления МНЛЗ.

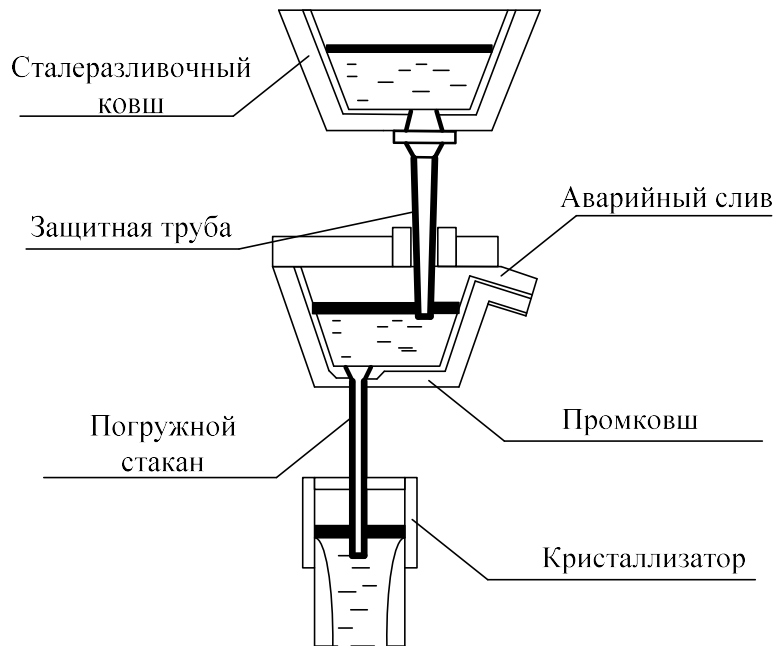


Рисунок 1.6 – Схематичное представление участка «стальковш-кристаллизатор» МНЛЗ

Анализ факторов, влияющих на качество заготовки позволил разделить их на группы [3, 37, 92]:

- 1) Факторы, мало влияющие на процесс и изменяющиеся незначительно (температура охлаждающей воды, теплопроводность материала и т.п.).
- 2) Факторы, не меняющиеся или почти не меняющиеся во время одной разливки, но способные меняться от разливки к разливке (состав и количество стали, состояние кристаллизатора и т.д.)
- 3) Факторы, изменяющиеся при наладке установки (центровка кристаллизатора, выбор места подвода металла и т.д.)
- 4) Факторы, изменяющиеся во время разливки и существенно влияющие на ее ход (скорость вытягивания слитка, уровень, температура, вязкость, гидродинамические характеристики движения жидкого металла, незапланированное изменение пропускной способности дозирующих устройств и т.д.)

Первые три группы факторов во время одной разливки могут быть учтены соответствующими постоянными.

Четвертая же группа факторов должна учитываться непрерывно. Эта задача возлагается на системы управления МНЛЗ.

Обеспечение современных требований к качеству заготовок требует максимального учета всех значимых для качества факторов, обеспечения взаимодействия и обратной связи всех составляющих управляющего комплекса с фактическими параметрами, характеризующими технологический процесс и непрерывно изменяющимися во время разливки [106].

Как объект управления установка непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор» представлена на рисунке 1.7.

В результате анализа свойств объекта определено, что на стабильность уровня металла в кристаллизаторе наибольшее влияние оказывают следующие параметры:

- скорость вытягивания;
- подача металла из промковша.

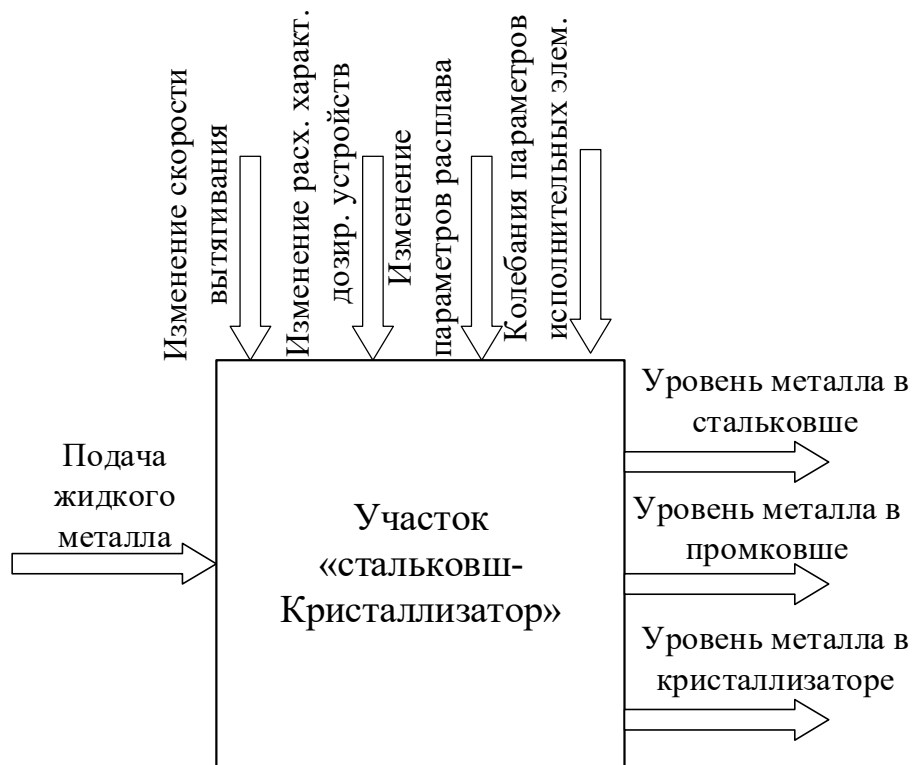


Рисунок 1.7 – Установка непрерывной разливки стали как объект управления

В стационарном режиме разливки подача металла из промковша и скорость вытягивания поддерживаются постоянными с целью обеспечения максимальной

стабильности литья. Но существуют регламентные изменения скорости вытягивания заготовки, которые зависят от следующих режимов [61]:

- 1) режимы пуска/останова;
- 2) режим замены сталеразливочного ковша («перековшовка»);
- 3) режимы замены технологических узлов: погружного стакана, промковша и т.д.

Кроме того, существуют изменения скорости вытягивания, вызванные отклонениями в работе различных узлов и участков МНЛЗ в процессе ее функционирования. Так, например, изменение скорости вытягивания является необходимым при проблемах в работе ЗВО.

В режимах замены таких узлов, как промковш или погружной стакан, потерь в качестве заготовки избежать невозможно. Эти замены производят на мерной длине, затем соответствующие части заготовки маркируются и впоследствии вырезаются. Однако, в режиме краткосрочного регламентного разгона/снижения скорости существует возможность скомпенсировать данные изменения за счет дополнительных поправок к закону изменения управляющей величины таким образом, чтобы отклонение выходной величины – уровня металла в кристаллизаторе – не превышало допустимых границ [12].

Кроме скорости вытягивания, подача металла в кристаллизатор определяется также стабильностью уровня налива металла в промковше и постоянным расходом из него через дозирующее устройство. Стабилизация уровня налива металла в промковше осуществляется за счет регулирования подачи из стальковша. Недопустимым является снижение уровня в промковше ниже определенного, при котором обеспечивается требуемый расход в кристаллизатор и всплытие неметаллических включений [93, 104]. Очевидно, что режим замены стальковша при серийной разливке представляет собой еще одним нестационарным режимом в работе МНЛЗ, поскольку в процессе его замены возникает необходимость в снижении скорости вытягивания заготовки, чтобы избежать критического падения уровня металла в промковше.

Примеры регламента изменения скорости в нестационарных режимах работы МНЛЗ представлены на рисунках 1.8-1.9 (обозначения приведены в приложении Б).

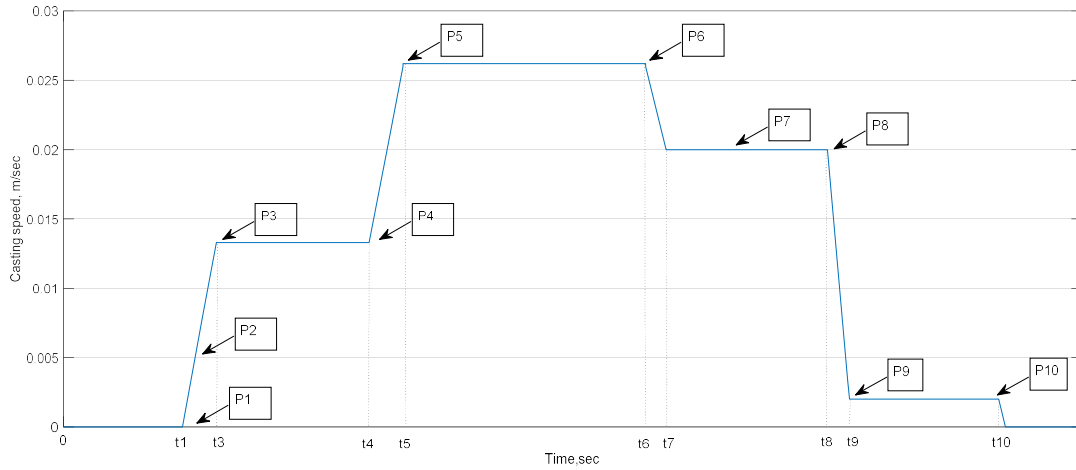


Рисунок 1.8 – Типовой регламент изменения скорости вытягивания заготовки во время работы МНЛЗ

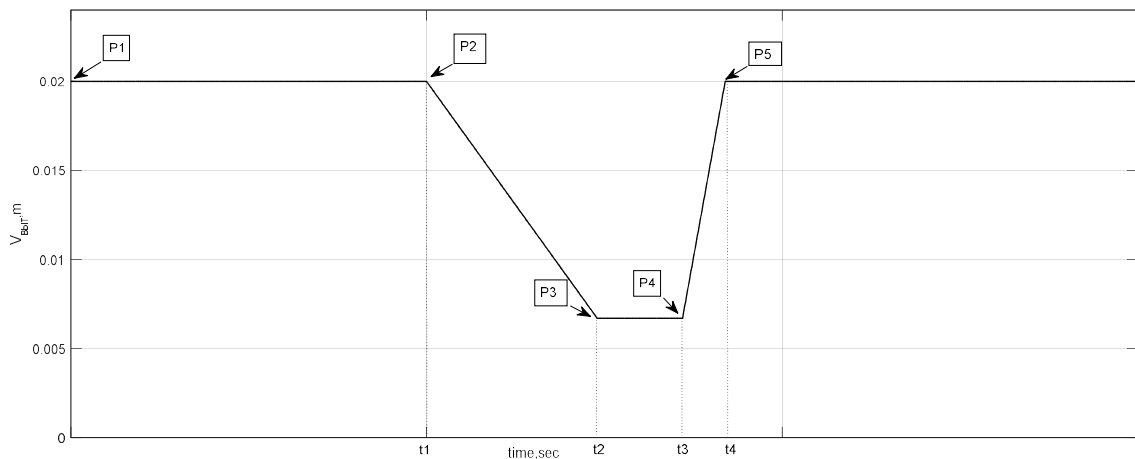


Рисунок 1.9– График изменения скорости вытягивания заготовки при замене стальной ковша

Известно, что пропускная способность дозирующих устройств является величиной ограниченной. При выборе дозирующих устройств, их проходное сечение выбирается из расчета на максимальную скорость разливки для соответствующего сечения заготовки. Однако, в процессе функционирования возникает так называемое «зарастание» дозирующих устройств различного рода отложениями. В результате, в какой-то момент поднятие стопора уже не может обеспечить требуемый расход металла в кристаллизатор. При отсутствии прочих возмущений, изменение скорости вытягивания может стать необходимой мерой для временной компенсации явления зарастания. Однако, это приводит к снижению производительности.

Другой способ решения проблемы – замена погружного стакана. В настоящее время широко распространены системы автоматической замены погружных стаканов, которые позволяют выполнить замену за очень малый промежуток времени, практически не нарушая тем самым процесс литья. Но из-за высокой стоимости стаканов актуальным является вопрос определения степени зарастания и момента замены, во избежание повышения эксплуатационных расходов.

Таким образом, определены 2 класса актуальных проблем, которые требуют особого внимания при проектировании системы автоматического управления:

1) проблемы, связанные с нестабильностью подачи металла в кристаллизатор: нестабильность уровня металла в промковше и изменение пропускной способности дозирующих устройств;

2) проблемы, связанные с изменениями скорости вытягивания в различных режимах работы.

Решение этих проблем позволит повысить стабильность поддержания уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ и в результате повысить качество непрерывно-литой заготовки.

1.3 Обзор существующих решений

Проблеме автоматизации технологического процесса непрерывной разливки стали уделяется большое внимание. На основе анализа публикаций существующие решения можно разделить на четыре группы.

1) Разработки на базе промышленных контроллеров (П, ПИ, ПИД, контроллеры с переменной структурой):

а) Компанией «Техноап» была разработана система «Уровень» как часть комплекса КРИСТАЛЛИЗАТОР, которая предназначена для автоматического регулирования и контроля заданного значения уровня расплавленного металла в кристаллизаторе машины непрерывного литья заготовок [64]. Главным результатом работы комплекса КРИСТАЛЛИЗАТОР является объективная и оперативная информация о ходе процесса разливки, о возникших отклонениях, позволяющая своевременно принять необходимые корректирующие воздействия и не допустить

появления брака. Информация, характеризующая с одной стороны процесс производства, а с другой - качество продукта, производимого машиной непрерывной разливки - заготовок, продающихся другому подразделению комбината или стороннему заказчику.

б) Компания Siemens-VAI представляет несколько программно-технических пакетов для управления различными локальными подпроцессами SIMETALCIS.

SIMETALCIS LevCon - высокоэффективная система, сочетающая в себе современную систему регулирования уровня металла в кристаллизаторе с дополнительными функциями, позволяющими, например, ослабить эффекты закупоривания выпускных отверстий, износа погружного стакана и т.д.

SIMETALCIS DriveCon – модульная система, которая управляет приводами механизма вытягивания и нажимным механизмом тянущих роликов. Она поставляется в полностью скомпонованном виде, что позволяет сократить до минимума время ввода в эксплуатацию и обеспечить надежность работы с разливки самой первой плавки [99].

в) В качестве характерного примера можно рассмотреть разработку научно-производственного объединения «Доникс» - систему автоматического управления стопорным механизмом сортовой МНЛЗ, обеспечивающую поддержание заданного уровня металла в кристаллизаторе сортовой МНЛЗ (Рисунок 1.10). НПО «Доникс» (Донецк) разработаны система уровнем металла в кристаллизаторе. Система состоит из двух контуров регулирования: внутреннего контура регулирования положения стопора и контура регулирования уровня металла в кристаллизаторе. Информация о положении стопора снимается с датчика линейного перемещения штока цилиндра, а сигнал об уровне металла в кристаллизаторе поступает от изотопного датчика [72].

г) Различные системы и подсистемы для АСУ ТП непрерывной разливки производят российские фирмы НТЦ "Приводная техника" (Челябинск) и ВолгоПромАвтоматика, немецкие компании SMSDemag и VAI-Siemens, итальянская фирма Danielli.

Достоинствами этой группы разработок являются хорошее качество регулирования, надежность, простота реализации и настройки, качественный интерфейс визуализации.

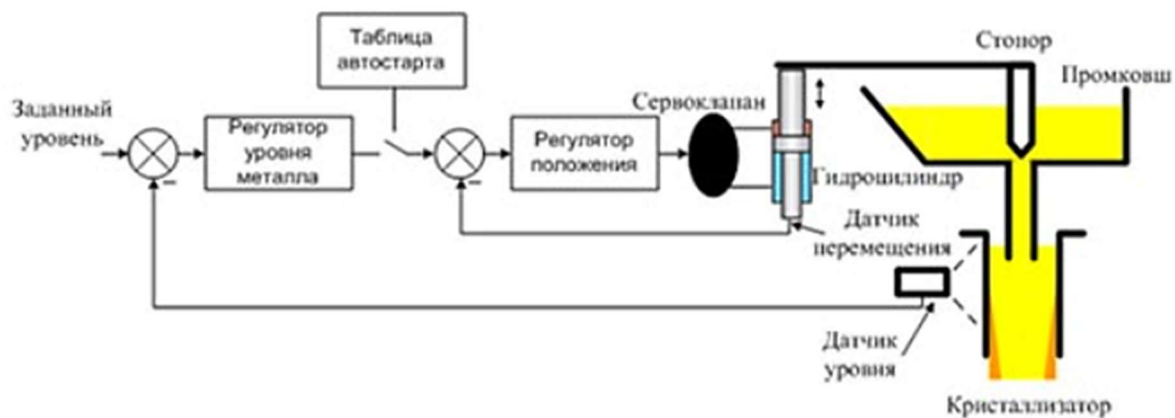


Рисунок 1.10 – Функциональная схема системы управления.

2) Решения с использованием наблюдателей состояния:

а) Компания SMS Siemag представляет комплексную систему управления уровнем металла в кристаллизаторе с использованием принципов управления на основе прямой (feed-forward control) и обратной связи (closed-loop control), реализующую также функции с использованием наблюдателей, например, для предсказания прорывов [85, 87-62].

б) Разработана методика повышения точности оценок уровней металла в сталковше и промковше с использованием нелинейного наблюдателя состояния (А.С.Митин и В.А.Кривоносов) [36, 48-49].

в) Karim Jabri, Bertrand Bele, Alain Mouchette (Measurement Control Engineering Department, ArcelorMittal Research, Maizières-Lès-Metz, France), Emmanuel Godoy, Didier Dimur (Department of Automatic Control, Supélec, Gif sur Yvette, France) используют наблюдатели для оценки переменного выпучивания заготовки [89-90, 95].

Достоинством этих разработок является возможность оценки неизмеряемых параметров. Недостатком – сложность математического описания и одновременно необходимость его линеаризации для применения методики синтеза в пространстве состояний.

3. Решения с использованием fuzzy-логики и Model Predictive Control:

а) Michel Dussud, Sylvie Galichet, and Laurent P. Foulloy демонстрируют хорошие результаты при использовании fuzzy-регулятора как для поддержания уровня

металла, так и для компенсации зарастания и отрыва неметаллических отложений в сталевыпускном канале промковша [83];

б) Minsung Kim, SungWoong Moon, Changheum Na, Dukman Lee, Yeongsub Kueon, Jin S. Lee (Korea) используют адаптивный fuzzy-регулятор с опережением по фазе (PLAFC) для компенсации возмущений уровня металла в кристаллизаторе [84, 91].

Достоинствами этой группы разработок является то, что данный тип управления позволяет справиться с большим количеством нелинейностей и ограничений объекта, а также возможность применения в нестационарных режимах работы (пуск, останов и т.д.). Недостатком – меньшая по сравнению с другими разработками точность регулирования, сложность и трудоемкость составления массивов правил [30]. Примеры структуры системы управления и списка правил представлены на рисунке 1.11.

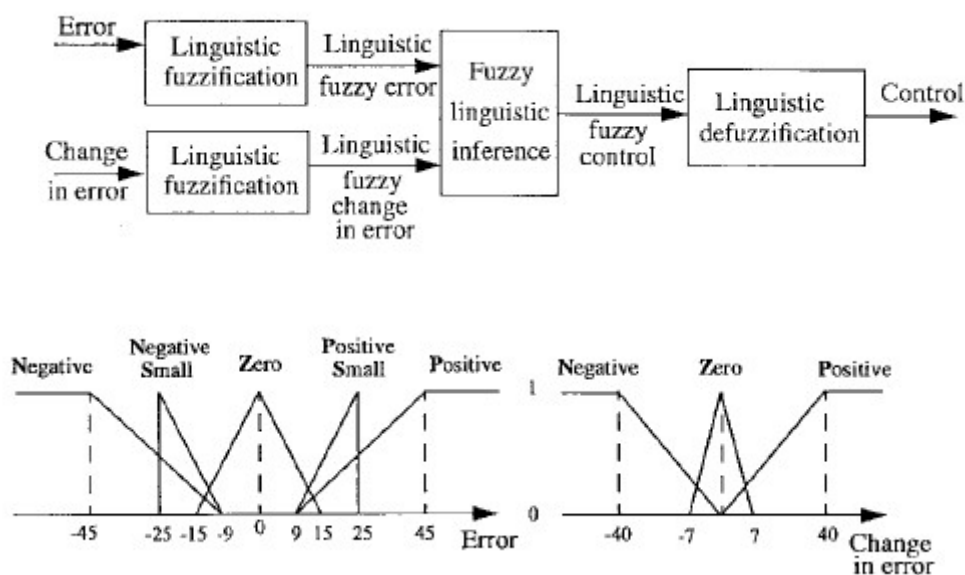


Рисунок 1.11 – Пример структуры системы управления с fuzzy-регулятором

4) Решения с использованием нейро-регуляторов и оптимизаторов (также в основном используется в зарубежных разработках.

На основе нейросетей реализуются алгоритмы идентификации некоторых параметров разливки, которые затем используются при синтезе управления. Например, японские авторы Toshihiko Watanabe, Kayako Omura, Masami Konishi, Shozo Watanabe, Kazuhiro Furukawa предлагают использование регулятора уровня

металла в кристаллизаторе за счет изменения скорости вытягивания, на основе анализа временных данных с помощью нейросети (Рисунок 1.12) [81, 98].

Основной проблемой использования нейросетей является получение качественных данных для их обучения, поскольку на работу измерительных систем воздействует огромное количества возмущающих факторов и перекрестные воздействия локальных систем управления.

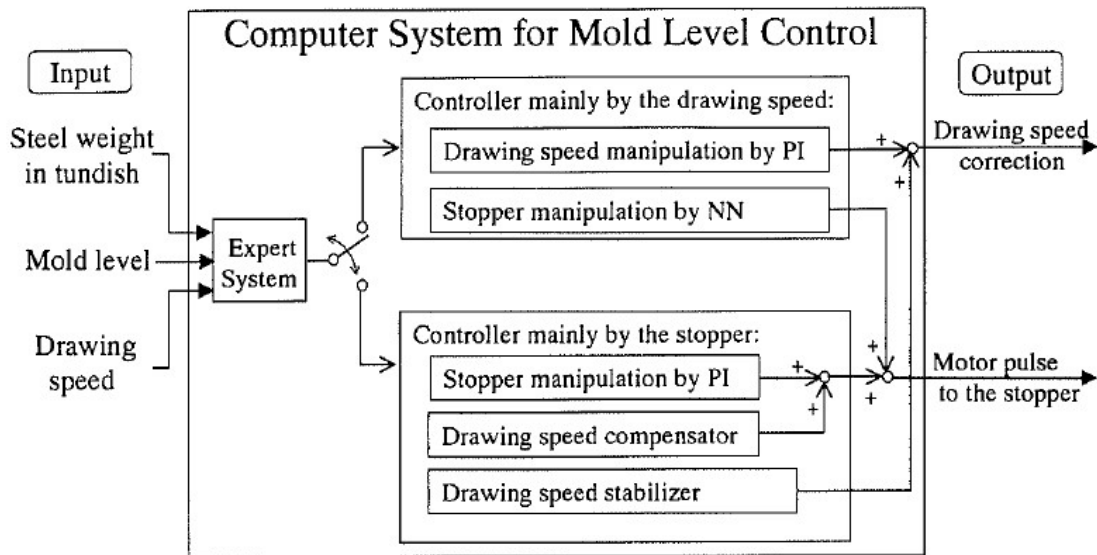


Рисунок 1.12 – Пример системы управления уровнем металла в кристаллизаторе на основе нейро-регулятора

На основе анализа существующих систем управления определены следующие взаимосвязанные процессы, которые необходимо учитывать при разработке системы управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ в нестационарных режимах:

- процессы, происходящие при истечении стали из стальной ковша;
- процессы, происходящие при истечении стали из промковша;
- процессы, происходящие при вытягивании слитка.

При этом все указанные процессы распределены в пространстве, но происходят в рамках одного рабочего тела – отливаемой заготовки, что позволяет рассматривать МНЛЗ как единый, но многосвязный и многомерный объект с распределенными параметрами.

Система управления должна выполнять функции управления на уровне системы в целом, функции подсистем управления всех subprocesses, входящих в

технологический процесс, и функции сбора информации о параметрах всего технологического процесса [10, 11, 69].

В рамки системы управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ должны быть включены следующие технологические процессы [1, 35]:

а) управление режимами:

- пусковые и остановочные режимы МНЛЗ;
- режимы замены технологических узлов МНЛЗ без остановки разливки;
- оптимальный режим окончания разливки с целью уменьшения отходов.

б) управление величинами:

- уровнем металла в промежуточном ковше;
- уровнем металла в кристаллизаторе;
- перемещением регулирующих расход элементов.

Для управления установкой необходима информация о состоянии объекта:

- температура жидкой стали в сталеразливочном ковше;
- температура жидкой стали в промежуточном ковше;
- масса стали в промежуточном ковше;
- масса стали в сталеразливочном ковше;
- уровень металла в кристаллизаторе;
- усилие вытягивания слитка из кристаллизатора;
- скорость вытягивания слитка;
- расход технологической смазки на кристаллизаторе;
- положение подвижных элементов дозирующих устройств;
- состояние проходных каналов дозирующих устройств.

На основе анализа технологического процесса можно выделить основные функции компьютерной системы автоматического управления процессом непрерывной разливки стали: информационные функции, а также функции контроля, регулирования и управления локальными объектами. Соответственно подсистемы, выполняющие эти функции, можно разделить на подсистемы контроля, регулирования и управления.

К функциям регулирования и управления необходимо отнести [21, 45]:

- воздействие на механизмы приводов тянущей клетки с целью регулирования скорости разливки;
- управление уровнем металла в промежуточном ковше;
- управление уровнем металла в кристаллизаторе;
- управление скоростью вытягивания.

Подсистемы регулирования и управления обеспечивают выполнение всех указанных функций.

1.4 Постановка задачи диссертационного исследования

Анализ технологических схем, режимов работы, средств и систем автоматизации установок непрерывной разливки стали позволяет определить основную цель исследований - 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 поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи исследования:

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.

1.5 Выводы по разделу 1

1. Проведен анализ особенностей технологического процесса непрерывной разливки стали в нестационарных режимах работы. На основе системного подхода технологический процесс непрерывной разливки стали представлен как сложный многомерный многосвязный объект, что не учтено существующей системой автоматического управления по отклонению. Определены основные переменные, влияющие на ход процесса, а также выявлена взаимосвязь между аппаратами технологической схемы как объектами управления с помощью декомпозиции процесса непрерывной разливки стали на ряд технологических участков.

2. Анализ существующих алгоритмов и методов построения систем управления процессом непрерывной разливки стали показал, что существует ряд нерешенных проблем:

- отсутствует динамическая математическая модель технологического процесса как объекта управления, позволяющая формализовать в комплексе процессы анализа и синтеза системы управления;

- неудовлетворительное качество функционирования установки при действии некомпенсированных возмущений и параметрической неопределенности объекта управления;

- параметры регуляторов настроены примерно для статических режимов и дают часто неудовлетворительное качество переходных процессов в динамических режимах работы;

- устаревшее оборудование систем контроля и управления не позволяет добиться улучшения качества ведения технологического процесса, обеспечить возможности дальнейшего совершенствования, расширения и повышения надежности системы управления.

3. Проведенный анализ современных методов построения систем управления позволил выявить основные тенденции и направления построения системы управления технологическим процессом непрерывной разливки стали с возможностью интеграции в единое информационное пространство предприятия.

4. На основании выявленных нерешенных задач на теоретическом и практическом уровне синтеза системы автоматического управления процессом непрерывной разливки стали сформулирована цель и задачи диссертационного исследования.

РАЗДЕЛ 2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ НА
УЧАСТКЕ «СТАЛЬКОВШ-КРИСТАЛЛИЗАТОР»

2.1 Декомпозиция объекта управления

В результате анализа объекта и существующих решений в области автоматизации непрерывной разливки стали выявлено, что для управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ необходимо комплексно рассматривать весь процесс транспортировки жидкого металла от сталеразливочного ковша (стальковша) до кристаллизатора. Исследуемый участок МНЛЗ «стальковш-кристаллизатор» приведен на рисунке 2.1.

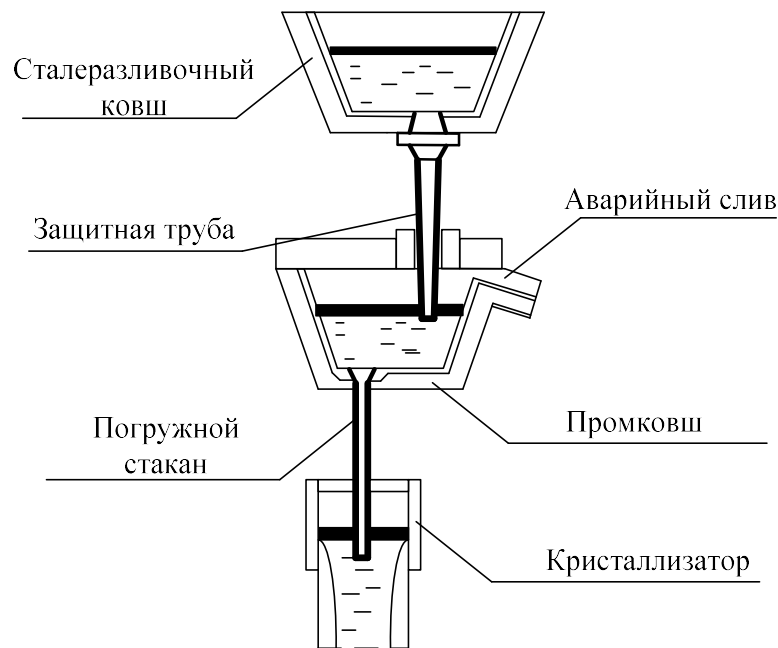


Рисунок 2.1 – Устройство МНЛЗ на участке «стальковш-кристаллизатор»

На основе системного подхода проведена декомпозиция технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор» [22-24]. Определены основные переменные, влияющие на ход процесса, а также выявлена взаимосвязь между объектами технологической схемы как объектами управления (Рисунок 2.2).

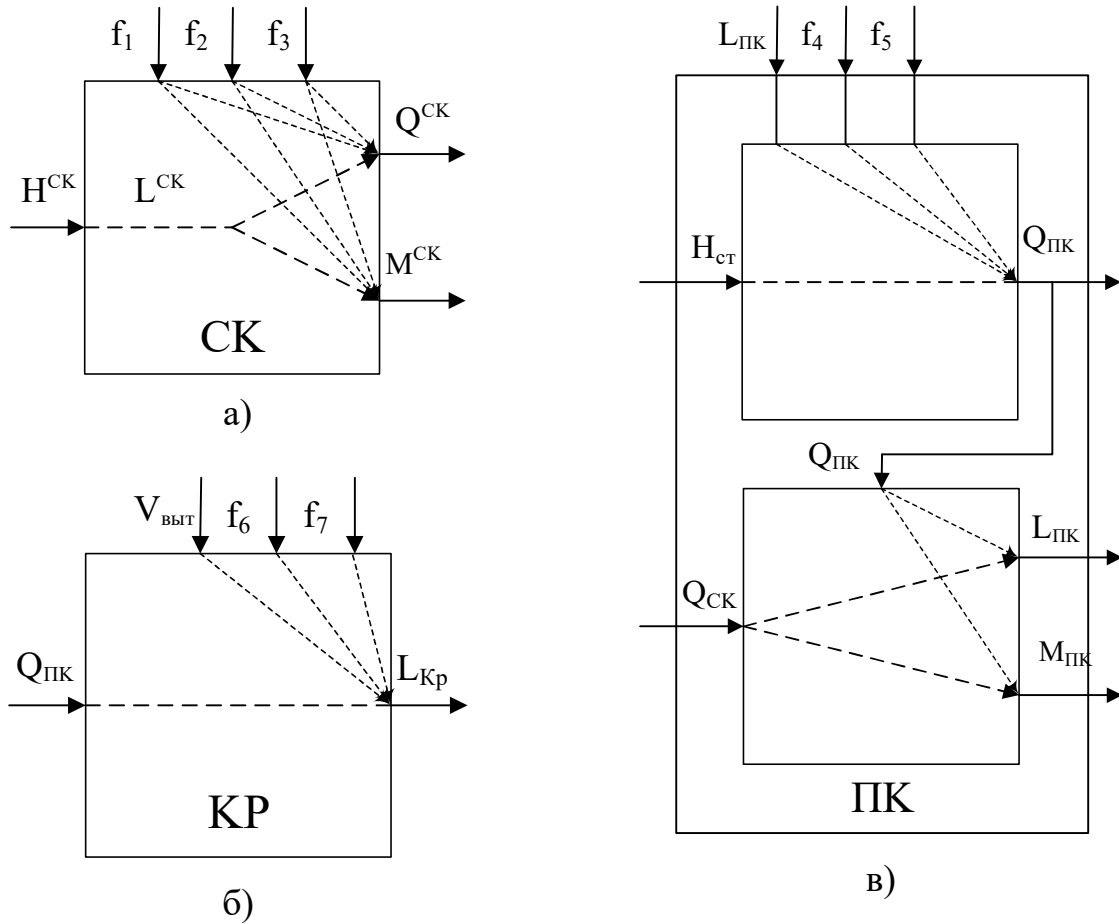


Рисунок 2.2 – Декомпозиция объекта управления: а) - стальковш (СК); б) - кристаллизатор (КР); в) - промковш (ПК).

На рисунке 2.2 приняты следующие обозначения.

Управляющие переменные:

СК: $H_{СК}$ - положение шиберного затвора;

ПК: $Q_{СК}$ – расход жидкого металла из стальковша;

$H_{ст}$ - высота поднятия стопора;

КР: $Q_{ПК}$ – расход жидкого металла из промковша.

Регулируемые (выходные) переменные:

СК: $Q_{СК}$ – расход жидкого металла из стальковша;

ПК: $L_{ПК}$ - уровень жидкого металла в промковше;

КР: $L_{Кр}$ - уровень жидкого металла в кристаллизаторе.

Контролируемые переменные:

СК: $M_{СК}$ - вес металла в стальковше (для косвенного определения уровня металла);

ПК: $M_{ПК}$ - вес металла в проковше (для косвенного определения уровня металла);

$H_{СТ}$ - высота поднятия стопора;

КР: $L_{Кр}$ - уровень жидкого металла в кристаллизаторе.

Возмущающие переменные:

СК: 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.

ПК: f_4 – изменение параметров сталевыпускного канала (заращение стакана-дозатора, погружного стакана, размытие стопора и стакана-дозатора);

f_5 – колебания деталей привода (люфты, изменения, связанные с высокой температурой и т.д.);

КР: f_6 – волнообразование на поверхности металла в результате качания, переменного выпучивания, неравномерного распределения потока стали);

f_7 – люфты механизмов;

$V_{выт}$ – скорость вытягивания заготовки.

2.2 Математическая модель истечения жидкого металла из стальковша

Наибольшее применение в силу различных технологических особенностей получили сталеразливочные ковши, имеющие форму усеченного конуса [94].

Расчетная схема такого ковша представлена на рисунке 2.3.

Основные геометрические параметры ковша:

H_{\max}^c – высота ковша;

R_{\max}^c – верхний радиус ковша;

R_{\min}^c – радиус днища ковша;

r_0^c – радиус выпускного отверстия в днище ковша.

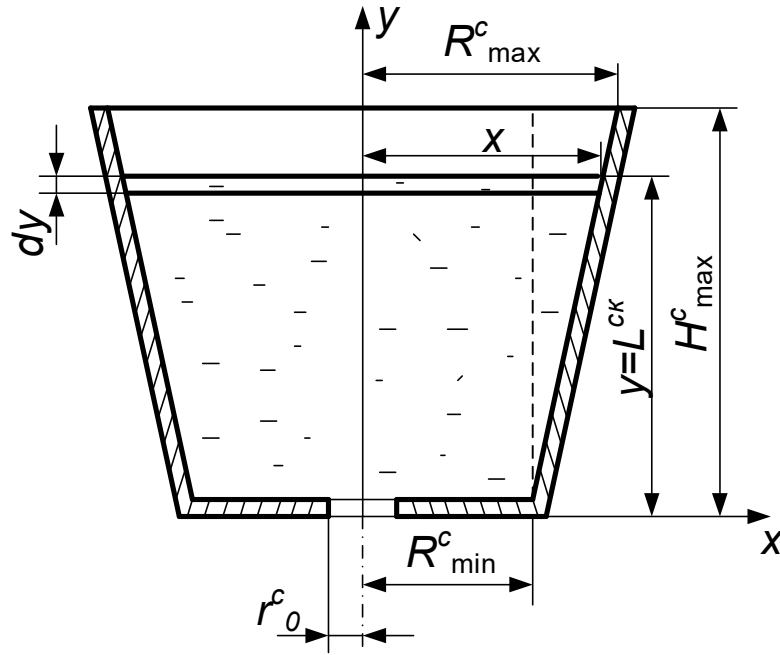


Рисунок 2.3 – Расчетная схема сталеразливочного ковша

Для определения закона изменения уровня стали в сталеразливочном ковше в зависимости от времени ее истечения предварительно необходимо составить уравнение образующей усеченного конуса. Его можно получить, воспользовавшись теоремой подобия треугольников:

$$\frac{H_{\max}^c}{R_{\max}^c - R_{\min}^c} = \frac{y}{x - r_0^c}, \quad (2.1)$$

отсюда

$$x = \frac{R_{\max}^c - R_{\min}^c}{H_{\max}^c} y + r_0^c, \quad x = ky + r_0^c, \quad (2.2)$$

где $k = \frac{R_{\max}^c - R_{\min}^c}{H_{\max}^c}$ – угловой коэффициент уравнения прямой (образующей усеченного конуса).

Примем, что в произвольный момент времени t , когда уровень металла равнялся величине y , за время dt он понизился на величину dy . Ввиду малости величин объем вытекшей стали можно считать равным

$$dV^c = \pi x^2 dy, \quad (2.3)$$

где x – радиус круглого верхнего поперечного сечения жидкого столба стали в ковше в момент t .

Принимая скорость вытекания стали через нижнее отверстие площадью $S_0^c = \pi r_0^2$ равной $v^c = \mu \sqrt{2gy}$, получаем объем вытекшей стали за время dt :

$$dV^c = -S_0^c \mu \sqrt{2gy} dt, \quad (2.4)$$

где μ - коэффициент истечения металла из отверстия, учитывающий трение и скорость струи (для сталей разных марок $\mu = 0,83 \dots 0,97$).

Из (2.3) и (2.4) следует дифференциальное уравнение

$$\pi x^2 dy = -S_0^c \mu \sqrt{2gy} dt, \quad (2.5)$$

Подставив в это уравнение значение x из уравнения образующей конуса, получим уравнение описывающие изменение уровня жидкого в стальковше

$$\pi x^2 dy = -S_0^c \mu \sqrt{2gy} dt, \quad (2.6)$$

$$\frac{dL^{CK}}{dt} = \frac{-S_0^c \mu}{\pi(kL^{CK} + r_0^c)^2} \sqrt{2gL^{CK}}. \quad (2.7)$$

В выражении (2.7) параметр S_0^c - площадь выпускного отверстия стальковша - является переменным и изменяется в зависимости от применяемого типа запирающего элемента. На практике применяется 2 типа запирающих элементов:

- шиберный затвор, устанавливаемый на днище ковша. Дозирование стали при этом осуществляется за счет перемещения средней плиты;
- стопорный затвор – с применением стопора-моноблока, который может перемещаться относительно стакана-дозатора и изменять тем самым расход вытекающего металла в широких пределах

Схема шиберного затвора приведена на рисунке 2.4. Принятые обозначения: 1 - неподвижная плита, 2 - подвижная плита.

Для данного типа запирающего элемента площадь проходного сечения зависит от линейного перемещения подвижной плиты шиберного затвора. Схема для расчета площади выпускного стальковша отверстия представлена на рисунке 2.5.

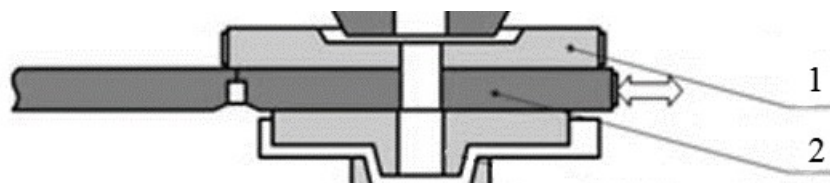


Рисунок 2.4 – Схематическое представление шиберного затвора

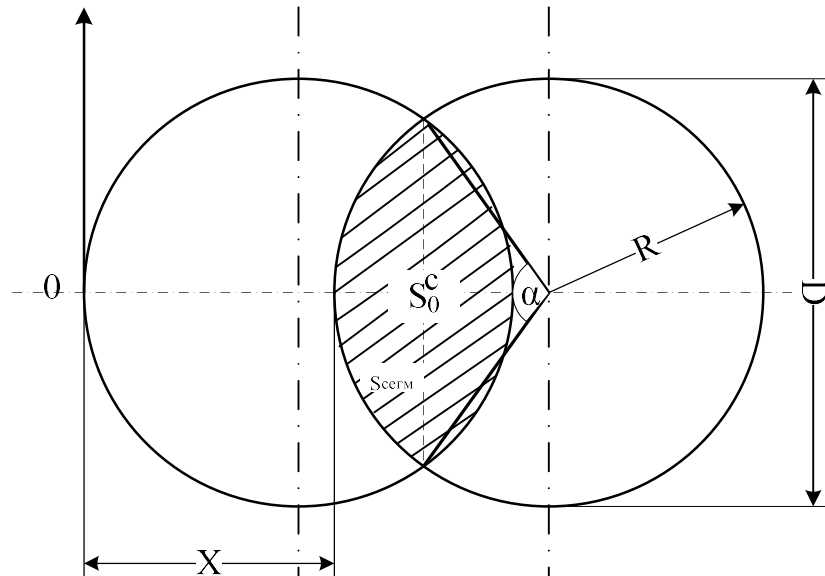


Рисунок 2.5 – Схема для расчета площади выпускного отверстия шиберного затвора стальнойковша

Из схемы расчета (Рисунок 2.5) определено, что пропускная площадь шиберного затвора стальнойковша представляет собой удвоенную площадь сегмента круга, отсекаемого хордой в основании угла α [42]:

$$S_0^c = 2S_{сегм} = R^2(\alpha - \sin \alpha), \quad (2.8)$$

где $\alpha = \arccos \frac{X}{2R}$, [рад];

X – линейное перемещение подвижной плиты, [м].

График зависимости пропускной площади шиберного затвора от линейного перемещения подвижной плиты приведен на рисунке 2.6.

Схема стопорного затвора приведена на рисунке 2.7, а пример стопорной пары (стопор-моноблок и стакан-дозатор) – на рисунке 2.8. Для данного типа запирающего элемента площадь проходного сечения и, следовательно, расход жидкого металла, являются функциями высоты поднятия стопора. Реальная зависимость является нелинейной, зависит от конкретного исполнения стопорной пары и режима, поэтому точно описать ее с математической точки зрения не представляется возможным (Рисунок 2.9 –а).

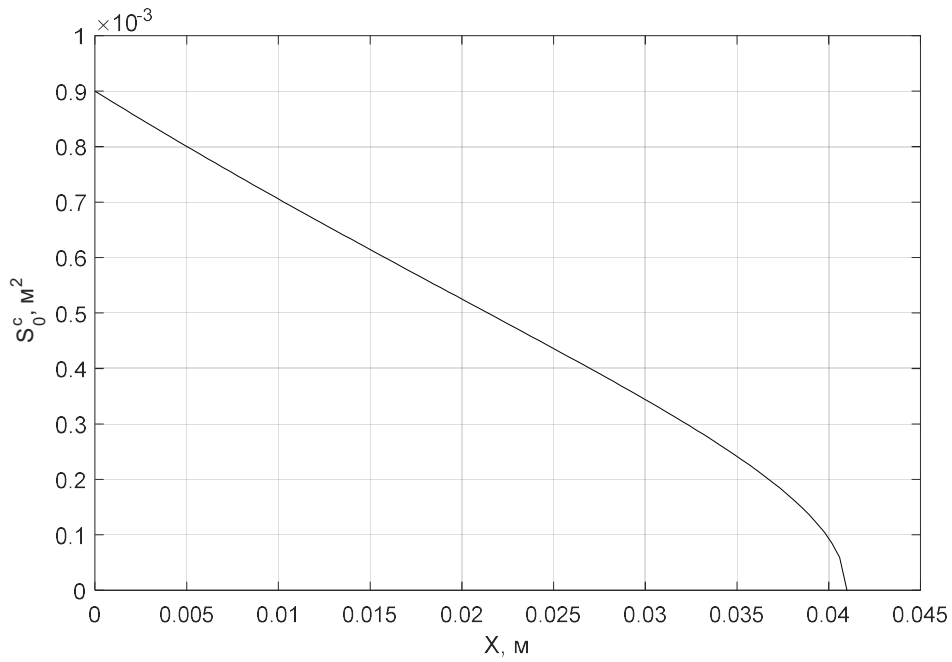


Рисунок 2.6 – График зависимости пропускной площади шиберного затвора от линейного перемещения подвижной плиты

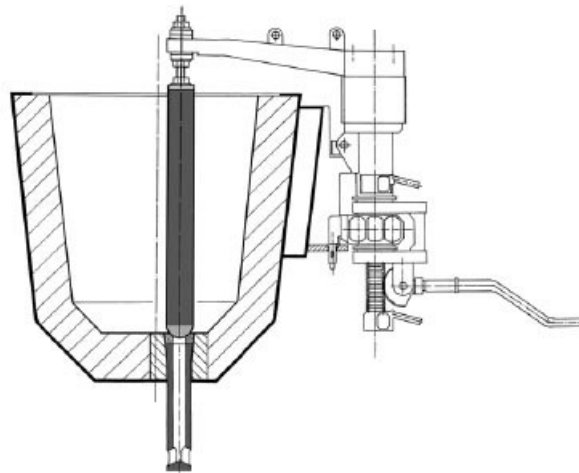


Рисунок 2.7 – Схематическое представление стопорного затвора

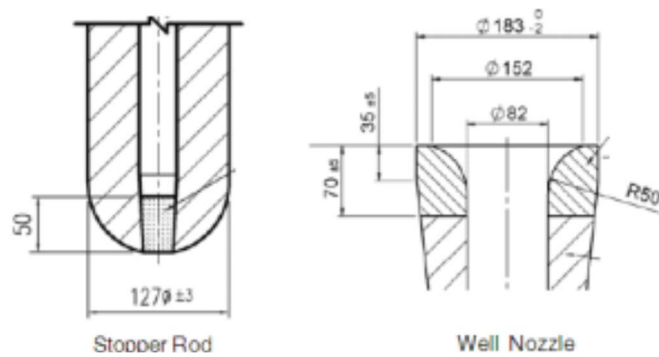


Рисунок 2.8 – Пример стопорной пары

Однако на рабочем участке зависимость площади проходного сечения от высоты поднятия стопора принято аппроксимировать в соответствии с формулой, предложенной Болгером (Bolger, [78]):

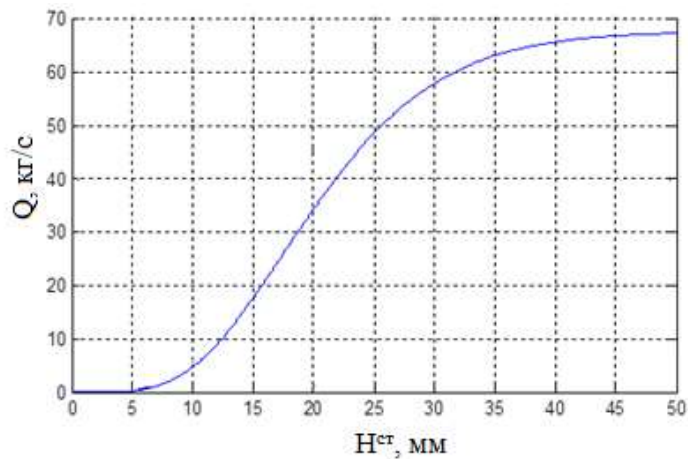
$$S(H^{cm}) = \pi H^{cm} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \left(H^{cm} \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) + D_b + R_s (1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)) \right), \quad (2.9)$$

где α – угол конуса головной части стопора, [рад];

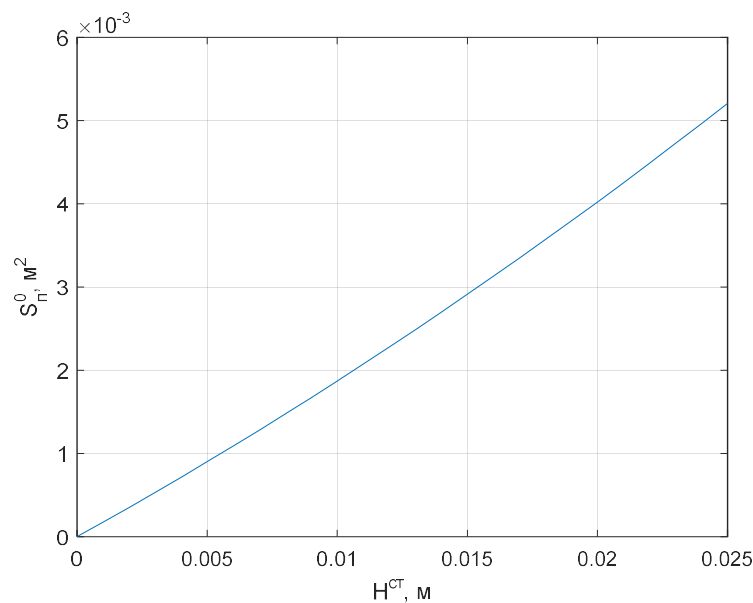
D_b – диаметр отверстия погружного стакана, [м];

R_s – радиус седла стакана-дозатора, [м]; H^{cm} – высота поднятия стопора, [м];

Тогда для рабочего линейного участка график зависимости $S_c^0(H^{cm})$ будет иметь вид, представленный на рисунке 2.9-б.



а)



б)

Рисунок 2.9 – Пример расходной характеристики (а) и рабочего участка зависимости площади проходного сечения от высоты поднятия стопора для стопорного затвора

Для перемещения подвижных элементов затворов используется жестко связанный с ними гидравлический привод (реже электро-механический), кинематическая схема которого показана на рисунке 2.10 [60].

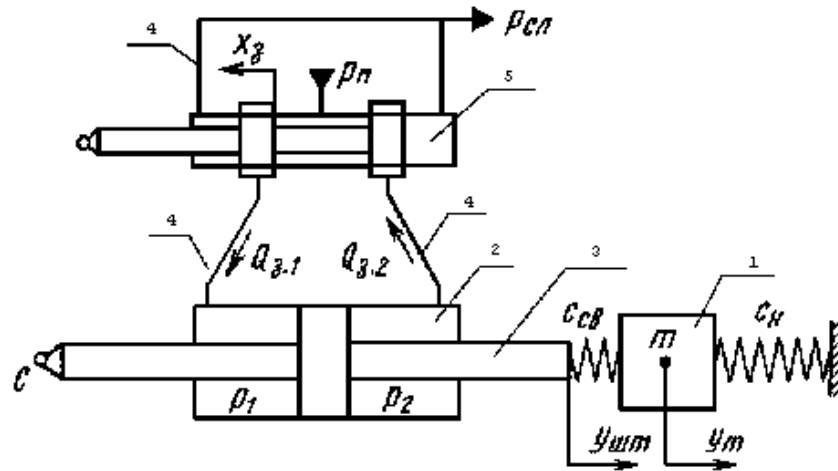


Рисунок 2.10 – Кинематическая схема гидропривода

В гидропривод входят следующие основные механические элементы: нагрузка (стопор) - 1, гидроцилиндр - 2, поршень - 3, линии передачи - 4, золотниковый распределитель - 5. Золотник может занимать 3 позиции. В нейтральном положении каналы распределителя заперты и жидкость не поступает от насоса ни в одну из полостей гидроцилиндра при этом шток остаётся в покое. При смещении золотника влево рабочая жидкость (масло) по каналам в корпусе распределителя и по трубопроводам поступает в левую полость гидроцилиндра, и шток выдвигается. Если же золотник сместить вправо от нейтрального положения, то рабочая жидкость будет поступать уже в правую полость гидроцилиндра, а из левой полости пойдёт на слив в гидробак. В этом положении золотника шток сдвигается вправо. При этом перемещение штока в ту или иную сторону будет осуществляться до тех пор, пока золотник не вернется в нейтральное положение. При остановках стопора гидрролинии остаются запертыми.

Для описания динамических характеристик гидропривода воспользуемся дифференциальным уравнением [19, 74]:

$$T_{гц} \frac{dh_{шток}}{dt} + h_{шток}(t) = k_{гц} h_{зол}(t), \quad (2.10)$$

где $h_{шток}$ – перемещение штока, [мм];

$h_{зол}$ – перемещение золотника, [мм];

$k_{гц}$ – скорость перемещения штока, [мм/с];

$T_{гц}$ – постоянная времени гидроцилиндра, [с].

Высота подъема стопорного механизма однозначно определяется перемещением штока гидроцилиндра, поэтому

$$T_{ст} \frac{dh_{стопор}}{dt} + h_{стопор}(t) = k_{ст} h_{шток}(t), \quad (2.11)$$

где $h_{стопор}$ – перемещение стопора, [мм];

$k_{ст}$ – коэффициент передачи стопора;

$T_{ст} = T_{гц}$ – постоянная времени стопора, [с].

Однако, учитывая жесткую механическую связь и высокое быстродействие элементов гидропривода, можно упростить математическую модель и аппроксимировать этот элемент коэффициентом передачи $k_{гц} \cdot k_{ст}$.

Кроме того, необходимо учесть ограничения на предельные значения скорости и высоты перемещения стопора.

Таким образом, модель на примере стопорного исполнительного механизма может быть представлена на рисунке 2.11.

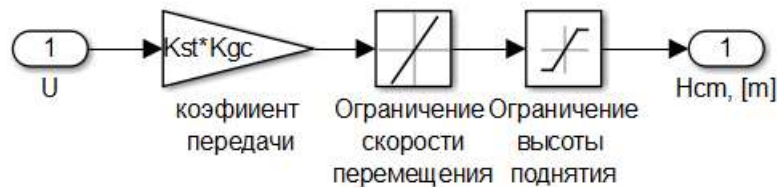


Рисунок 2.11 – Модель исполнительного механизма - стопора

Аналогичным образом, в соответствии с выражениям (2.10)-(2.11) и рисунком 2.11 может быть получена математическая модель исполнительного механизма – шибера.

На практике для регулирования истечения стали из стальнойковша наиболее распространены трехплитные шиберные затворы, поэтому при построении модели стальнойковша для описания площади проходного сечения используется выражение (2.8).

В настоящее время для решения различных инженерных и исследовательских задач получили распространение такие пакеты математических программ как MathCAD, Mathematica, MATLAB и др.

Для исследования закона изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор» установки непрерывной разливки стали принято решение использовать пакет прикладных программ MATLAB совместно с интерактивным инструментом для моделирования динамических систем Simulink [50, 55, 73].

Для определения закона истечения жидкой стали из стальковша в промежуточный ковш необходимо найти численное решение полученного дифференциального уравнения (2.7). Для этого в MATLAB&Simulink была собрана структурная схема, приведенная на рисунке 2.12.

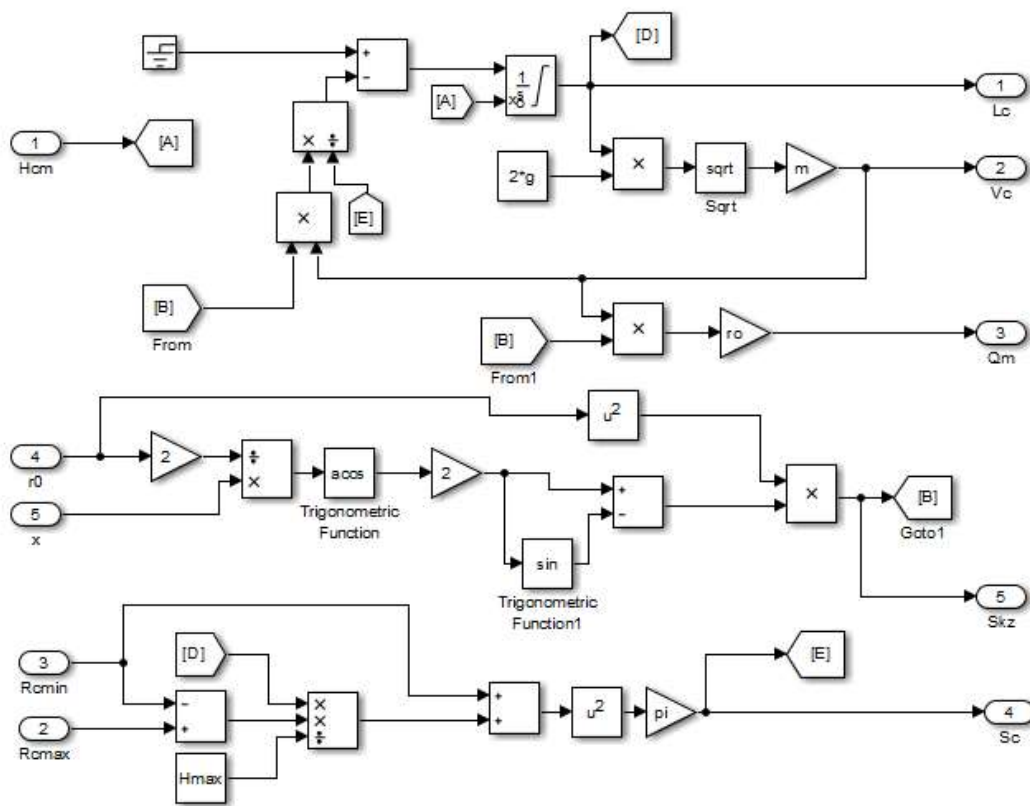
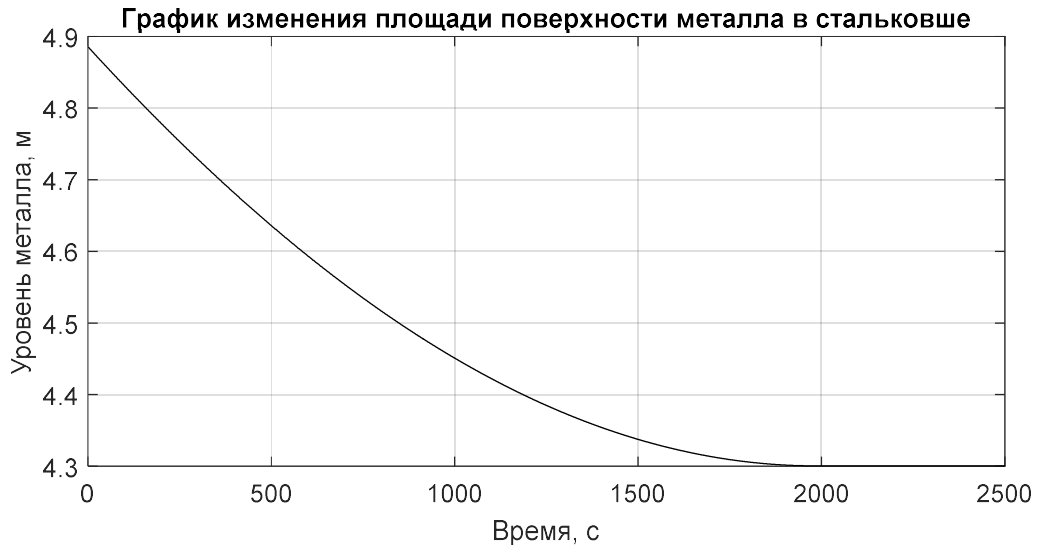
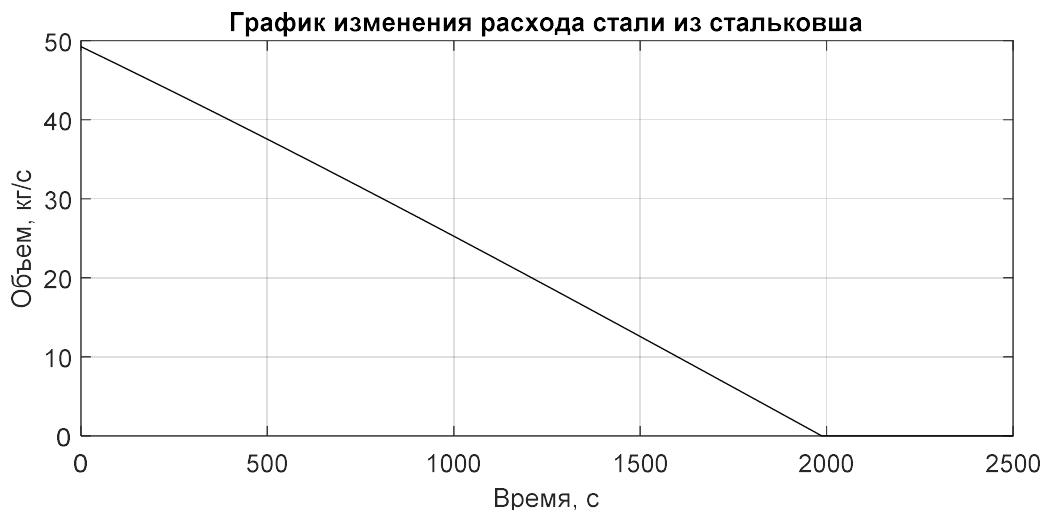


Рисунок 2.12 – Структурная схема решения дифференциального уравнения для определения закона истечения жидкой стали из стальковша

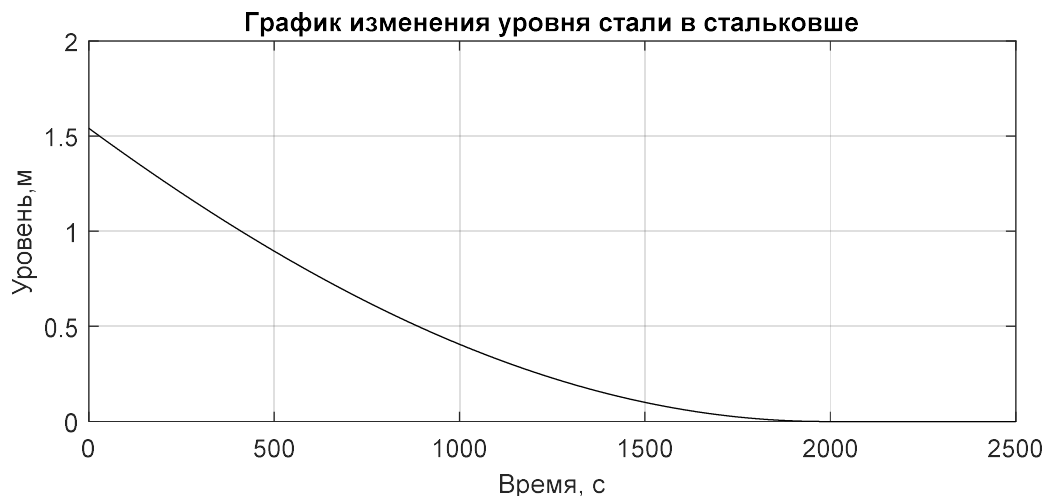
В результате задания геометрических размеров стальковша для массы жидкого металла 50 тонн, получены зависимости, приведенные на рисунке 2.13.



а)



б)



в)

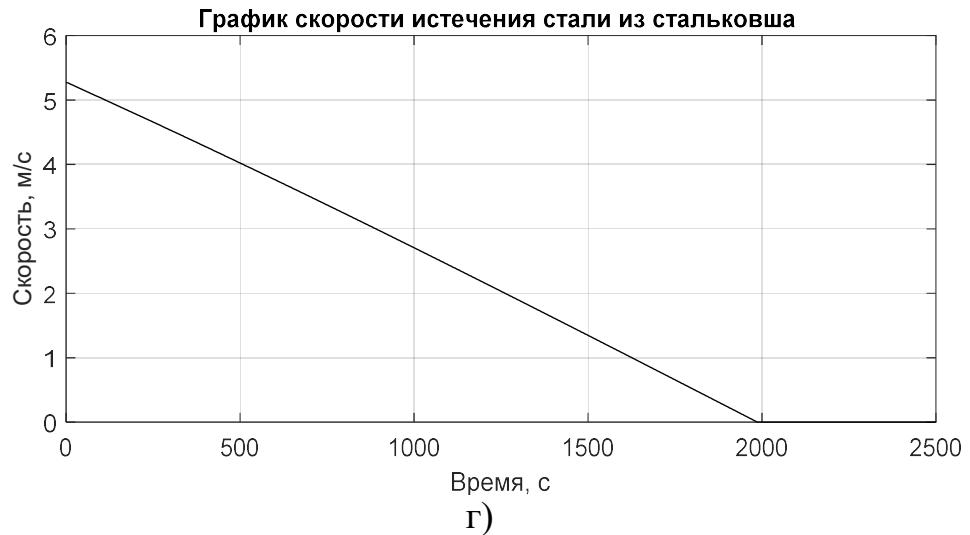
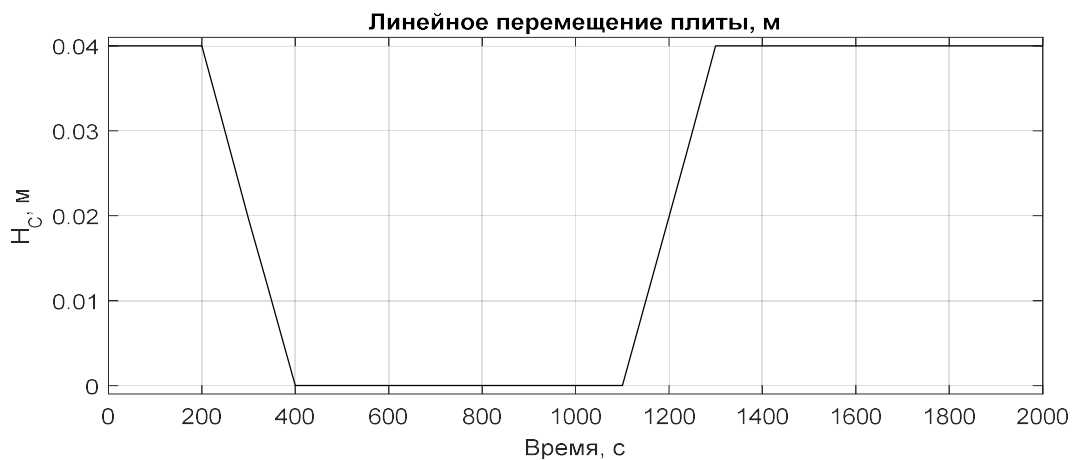
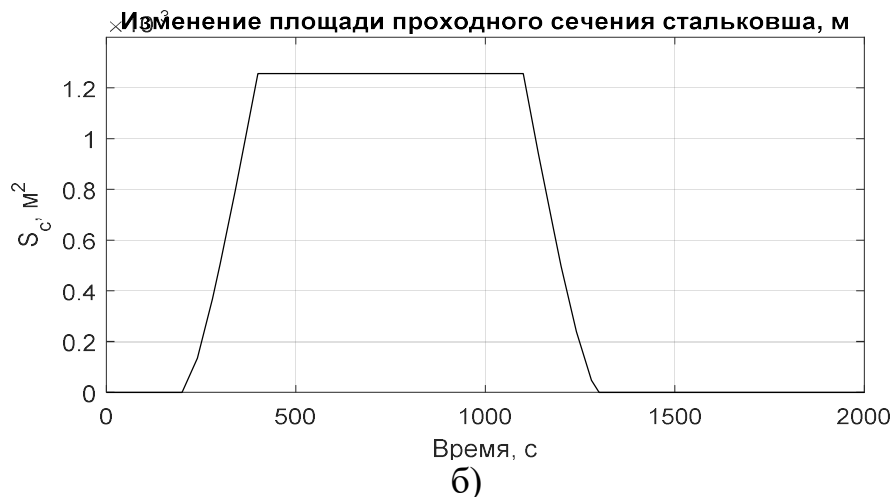


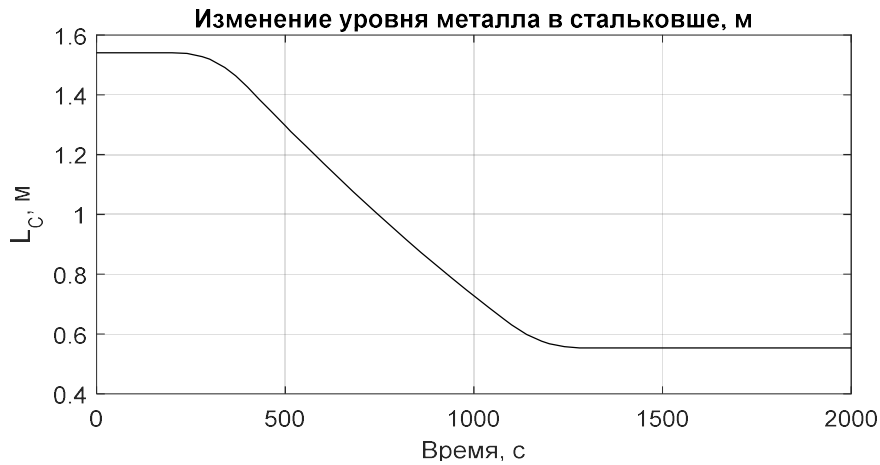
Рисунок 2.13 – Графики переходных процессов в стальной ковше при свободном истечении 50 т стали: а) изменение площади поверхности металла; б) изменение расхода стали; в) уровень жидкого металла; г) скорость истечения.

Результаты моделирования процесса вытекания металла из стальной ковша с учетом изменения линейного перемещения подвижной плиты шиберного затвора приведены на рисунке 2.14.



а)





в)

Рисунок 2.14 – Графики переходных процессов в стальковше при свободном истечении 50 т стали с учетом линейного перемещения подвижной плиты шибера затвора: а) линейное перемещение плиты; б) изменение площади проходного сечения; в) изменения уровня металла в стальковше.

2.3 Математическая модель истечения жидкого металла из промковша

Известно, что на практике геометрическая форма промковша выбирается по возможности наиболее простой и приближенной к параллелепипеду [97, 102]. Это упрощает процесс изготовления футеровки и обслуживания (например, извлечения остатка металла после разливки). Для удобства эксплуатации также выполняются технологические уклоны стенок (сужение) промковша сверху вниз. На основании этого можно представить геометрическую форму промковша усеченной пирамидой с прямоугольным основанием, расчетная схема приведена на рисунке 2.15.

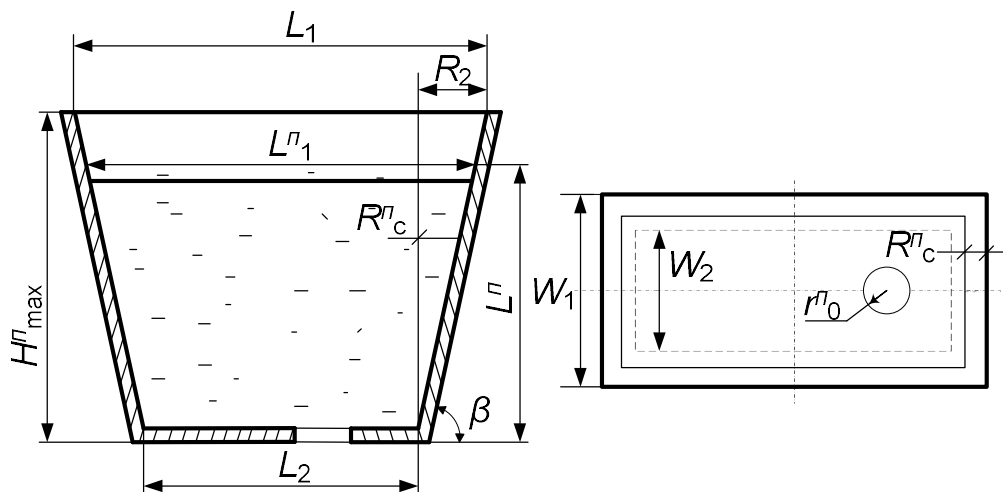


Рисунок 2.15 – Расчетная схема промковша

Основные геометрические параметры ковша: L_1, W_1 - длина и ширина большого основания (верхней грани); L_2, W_2 - длина и ширина меньшего основания (нижней грани); H_{\max}^n - высота промковша; r_0^n - радиус выпускного отверстия в днище промковша.

На основании теоремы подобия треугольников можно записать:

$$\frac{R_2}{H_{\max}^n} = \frac{R_c^n}{L^{ПК}}, \quad R_c^n = \frac{R_2 L^{ПК}}{H_{\max}^n}, \quad (2.12)$$

где $L^{ПК}$ - текущий уровень металла в промковше;

$R_c^n = L_1^n - L_2$ - разность между длиной основания ковша и длиной верхнего сечения на текущем уровне;

$R_2 = L_1 - L_2 = W_1 - W_2 = H_{\max}^n \operatorname{tg}(\beta - \pi/2)$ - параметр, зависящий от наклона стенок ковша.

Тогда площадь зеркала жидкого металла в промковше на уровне L^n :

$$S^n(L^{ПК}) = (L_2 + 2R_c^n)(W_2 + 2R_c^n). \quad (2.13)$$

Изменение уровня жидкого металла в промковше:

$$dV^{ПК} = (Q^{СК} - Q^{ПК})dt, \\ \frac{dL^n}{dt} = \frac{1}{S^n(L^{ПК})} (Q^{СК} - Q^{ПК}), \quad (2.14)$$

где S_o^n - площадь проходного сечения выпускного отверстия промковша;

$Q^{СК}$ - количество металла, поступающего из стальной ковша;

количество металла, истекающего из промковша:

$$Q^{ПК} = \pi r_0^n \mu \sqrt{2gL^{ПК}} = S_o^n \mu \sqrt{2gL^{ПК}}; \quad (2.15)$$

Таким образом, в выражении (2.15) параметр $Q^{ПК}$ является функцией двух переменных параметров: S_o^n и $L^{ПК}$. Первый параметр S_o^n зависит от применяемого типа запирающего элемента. На практике в большинстве случаев применяется стопорный затвор, аналогично представленному на рисунке 2.8. Следовательно, для расчета значения параметра S_o^n может быть использована формула (2.9). Вторым параметром $L^{ПК}$ может изменяться в ходе разлива под влиянием множества факторов. Изменяя $L^{ПК}$ в диапазоне $[0.5 \div 1.5]$ м, который соответствует возможному изменению

уровня металла в промковше в процессе разливки, получено семейство статических характеристик, график представлен на рисунке 2.16.

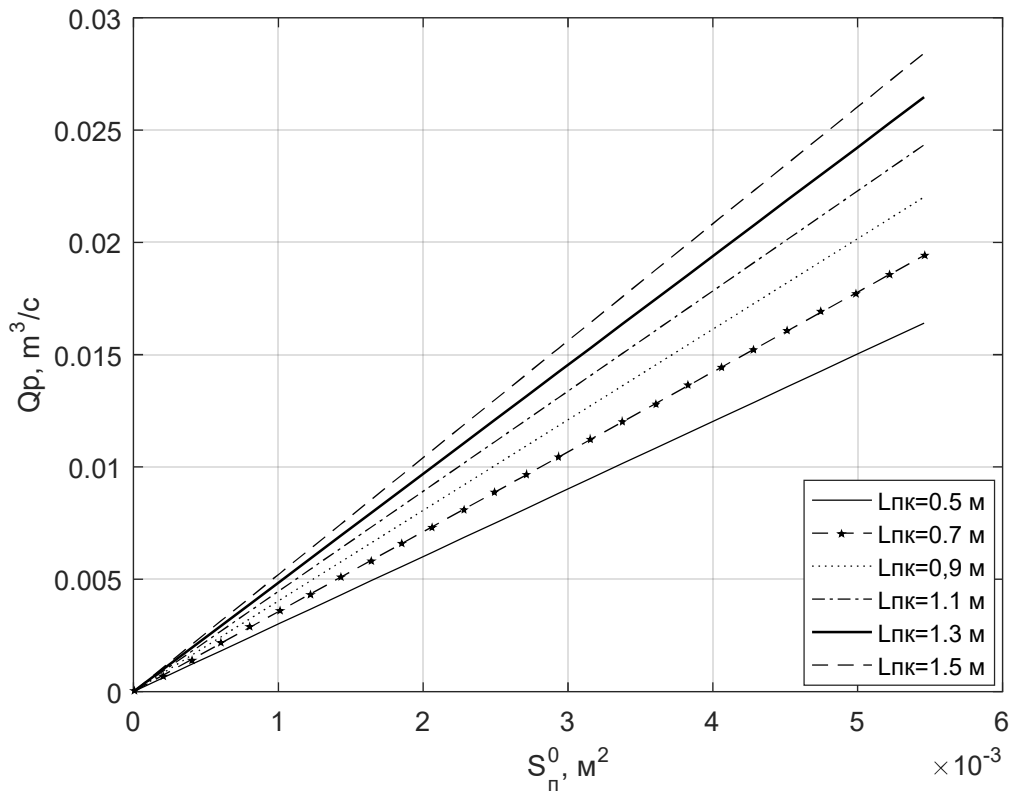


Рисунок 2.16 – Графики зависимости расхода металла из промковша от площади проходного сечения и уровня металла

Закон изменения уровня металла в промковше можно представить следующим выражением:

$$\frac{dL^{пк}(t)}{dt} = \frac{Q^{СК} - S_0^n \mu \sqrt{2gL^{пк}(t)}}{(L_2 + 2R_c^n)(W_2 + 2R_c^n)}. \quad (2.16)$$

Для определения закона истечения жидкой стали из промковша в промежуточный ковш необходимо найти численное решение дифференциального уравнения (2.16). Для этого в MATLAB&Simulink разработана структурная схема, приведенная на рисунке 2.17.

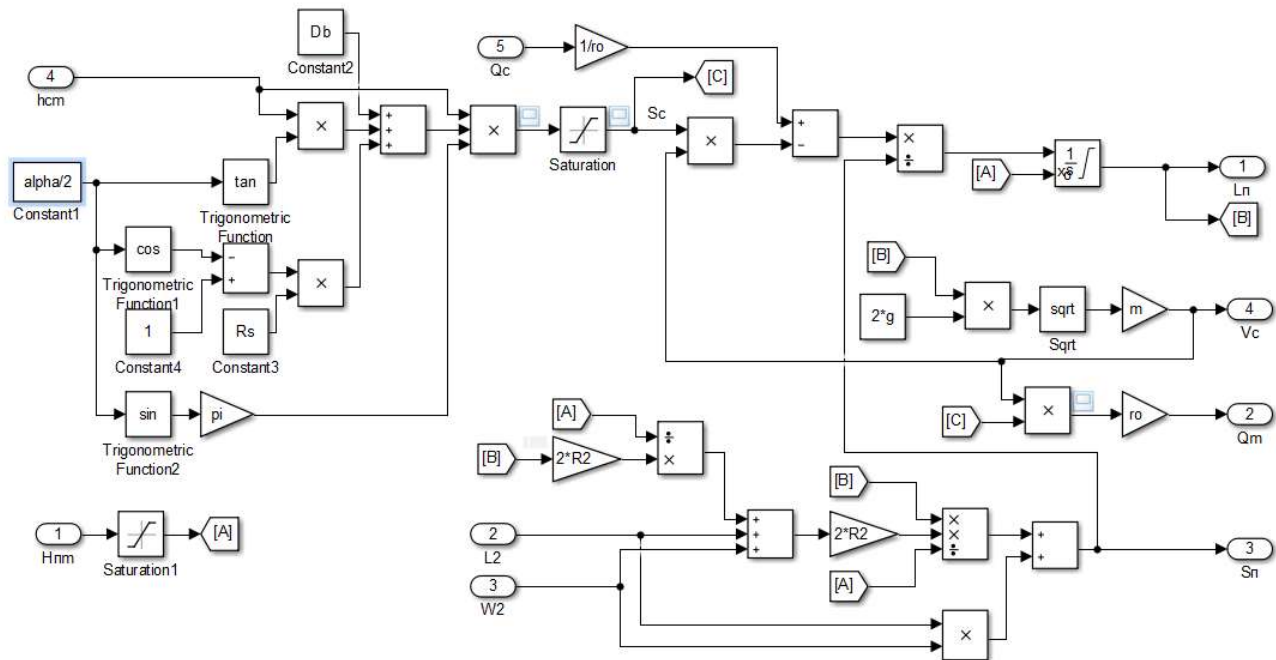


Рисунок 2.17 – Структурная схема решения дифференциального уравнения для определения закона истечения жидкой стали из промковша

В результате моделирования получены зависимости, приведенные на рисунке 2.18.

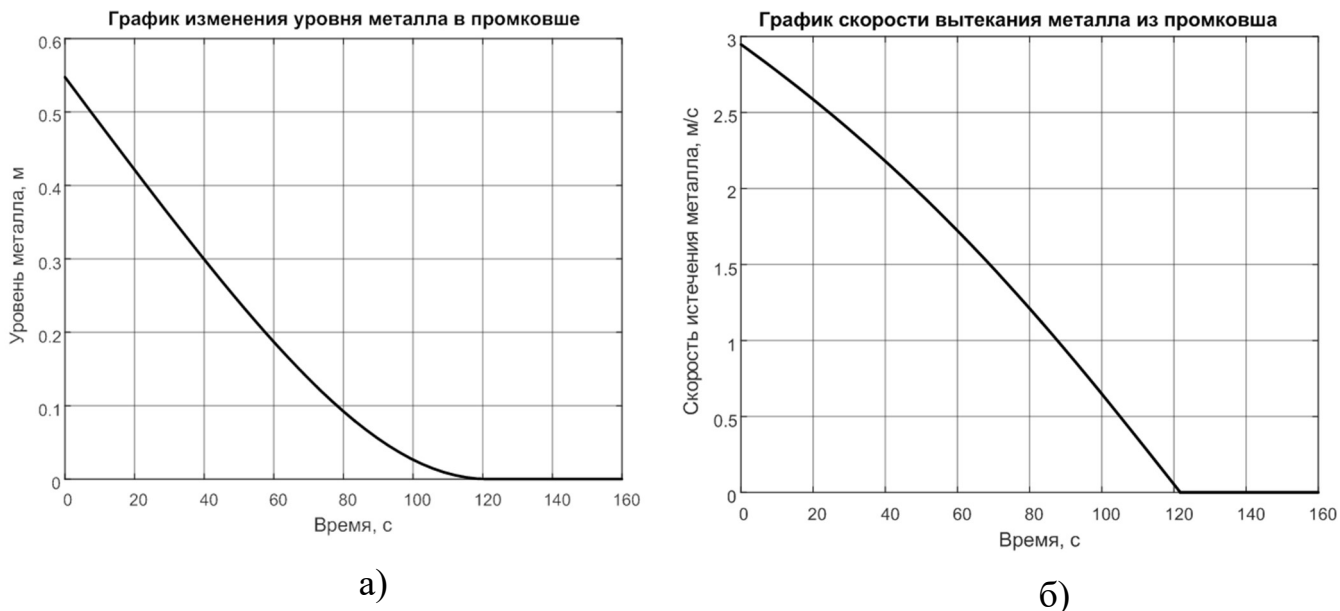


Рисунок 2.18 – Графики переходных процессов в промковше: а) - уровень жидкого металла; б) - скорость истечения.

2.4 Математическая модель истечения жидкого металла из кристаллизатора

Для расчетов примем, что кристаллизатор имеет поперечное сечение в форме прямоугольника (Рисунок 2.19).

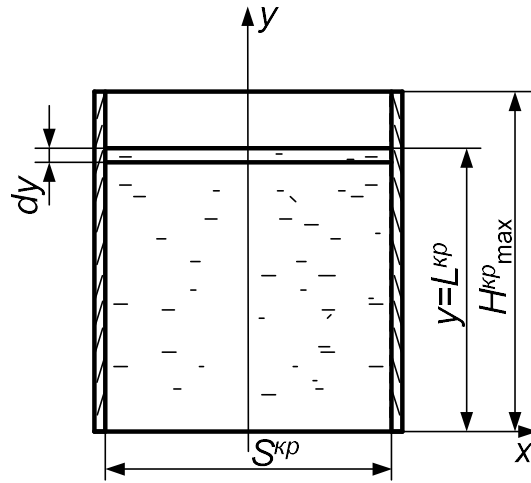


Рисунок 2.19 – Расчетная схема кристаллизатора

Основные геометрические параметры кристаллизатора:

$H^{кр}_{max}$ - высота кристаллизатора;

$S^{кр}$ - сечение отливаемой заготовки.

Уровень жидкого металла в кристаллизаторе определяется уравнением:

$$dV^{кр} = S^{кр} dL^{кр} = (Q^{ПК} - Q^{кр}) dt,$$

$$\frac{dL^{кр}}{dt} = \frac{1}{S^{кр}} (Q^{ПК} - Q^{кр}), \quad (2.17)$$

где $Q^{ПК}$ – количество металла, поступающего в кристаллизатор из промковша;
 $Q^{кр}$ – количество металла, выходящего из кристаллизатора, линейно зависит от скорости вытягивания заготовки $Q^{кр} = V_{выт} S^{кр}$.

Для определения закона истечения жидкой стали из кристаллизатора необходимо найти численное решение дифференциального уравнения (2.17). Для этого в MATLAB&Simulink была разработана структурная схема, приведенная на рисунке 2.20. Результаты моделирования приведены на рисунке 2.21.

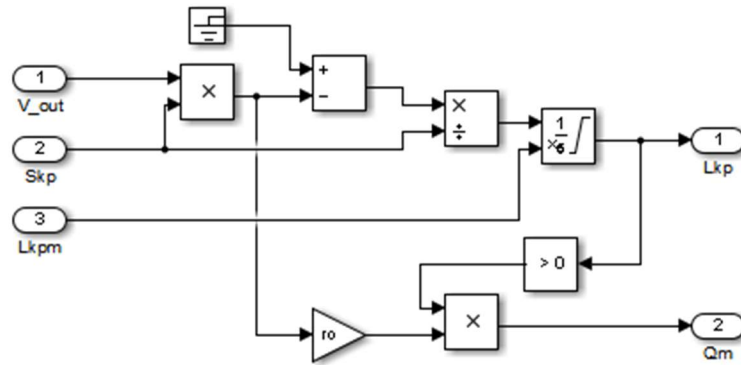


Рисунок 2.20 – Структурная схема решения дифференциального уравнения для определения закона истечения жидкой стали из кристаллизатора

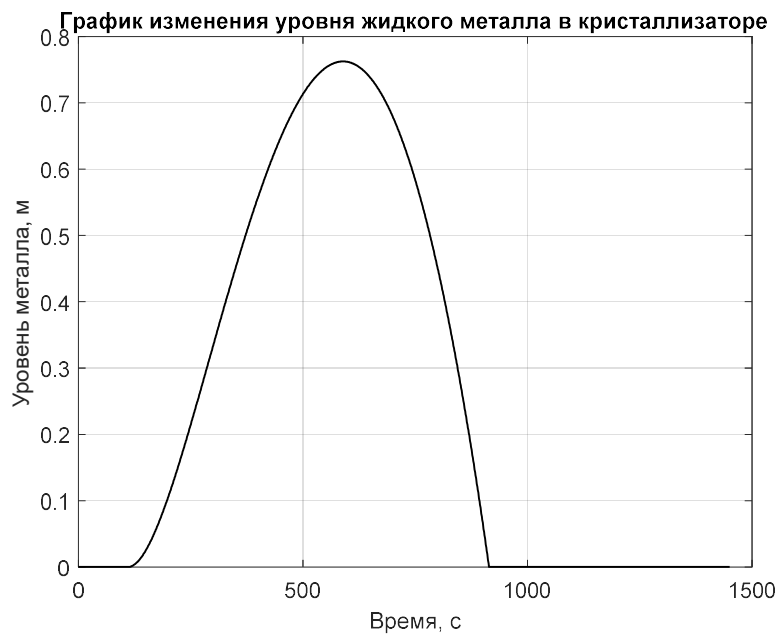


Рисунок 2.21 – График переходного процесса в кристаллизаторе при свободном истечении 50 т стали

2.5 Математическая модель изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор»

На основе разработанных математических моделей отдельных технологических аппаратов канала перемещения жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор», составлена обобщенная математическая модель перемещения жидкого металла, приведенная на рисунке 2.22.

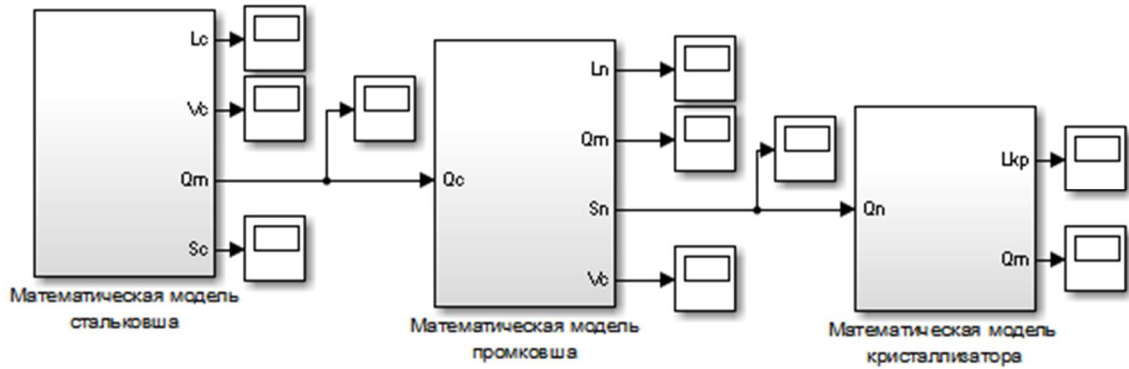


Рисунок 2.22. – Структурная схема исследования закона изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор»

В результате моделирования процесса свободного перемещения 50 т металла из стальковша через промковш в кристаллизатор получены следующие зависимости (Рисунок 2.23).

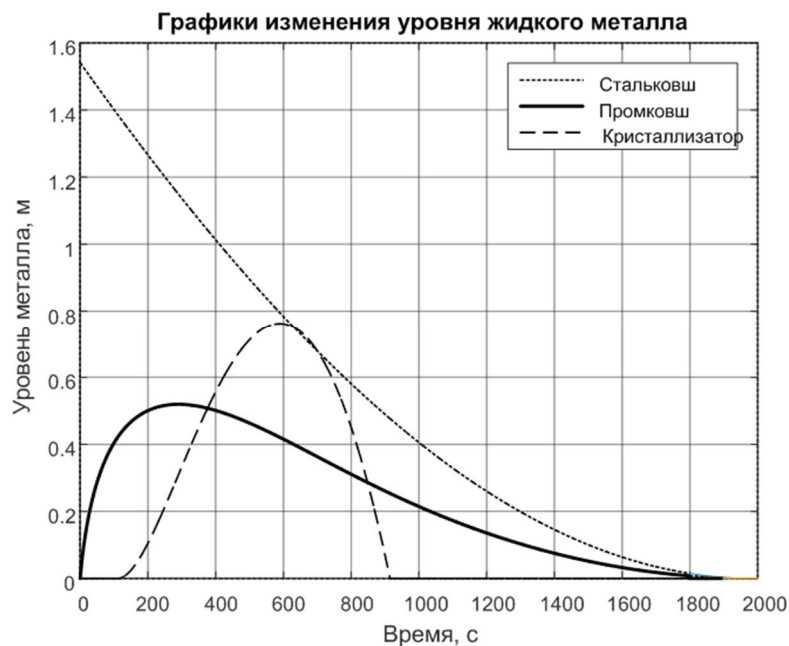


Рисунок 2.23 – Графики переходных процессов изменения уровней при свободном истечении 50 т жидкого металла из стальковша в кристаллизатор

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 непрерывной разливки стали адекватно отображает динамические процессы, протекающие на участке «стальковш-кристаллизатор» МНЛЗ [9].

2.6 Линеаризация статических характеристик запирающих элементов системы

При анализе зависимостей площади проходного сечения шиберного затвора (Рисунок 2.6), а также площади проходного сечения (Рисунок 2.9) и расходной характеристики стопорного затвора (Рисунок 2.16), можно отметить, что в рабочей области они достаточно близки к линейным. Применим метод наименьших квадратов (МНК) для нахождения коэффициентов линейных аналитических зависимостей [39, 68].

Задача состоит в следующем: по имеющимся выборочным данным нелинейной модели y (а именно: площадь проходного сечения шиберного $S_0^c(X)$ и стопорного $S_0^n(H^{cm})$ затворов, а также расхода металла из промковша $Q^{ПК}(H^{cm})$), с известным шагом дискретизации по перемещению соответствующих запирающих элементов x (а именно: шибера X и стопора H^{cm}) требуется оценить значения указанных параметров линейной модели y_M , обеспечивающих минимум величины функционала невязки:

$$J = e^T e = \sum_{j=1}^N e^2(j), \quad (2.18)$$

где величина

$$e(j) = y(j) - y_M(j), \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (2.19)$$

представляет невязку, определённую как разность между выходом исследуемого нелинейного объекта y и значением, вычисленным по линейной математической модели объекта y_M .

Оценки по МНК β^* вектора параметров, минимизирующих критерий (2.18), находятся из условия существования минимума функционала:

$$J = \min_{\beta} J = J|_{\beta = \beta^*}. \quad (2.20)$$

Важным свойством оценок по МНК является существование только одного локального минимума, совпадающего с глобальным. Поэтому оценка β^* является единственной.

Исходными данными для рассматриваемой задачи являются конечный ряд значений входной величины модели объекта x_i и соответствующие значения

выходной переменной y_j . Математическая модель функциональной связи между входом и выходом задается в виде уравнения:

$$y_M = a_0 + a_1 x. \quad (2.21)$$

Задача аппроксимации состоит в нахождении таких оценок неизвестных параметров a_0 и a_1 , при которых заданная уравнением (2.21) аналитическая зависимость будет наилучшим образом аппроксимировать экспериментальные данные. Критерий минимума среднеквадратичной ошибки в данном случае имеет вид:

$$\min_{a_i} J(a_i) = \min_{a_0, a_1} \sum_{j=1}^N [y_j - (a_0 + a_1 x_j)]^2. \quad (2.22)$$

Для нахождения коэффициентов регрессии составляются уравнения наличия экстремума по каждому параметру a_i :

$$\frac{\partial J}{\partial a_i} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, n. \quad (2.23)$$

Система уравнений для нахождения коэффициентов a_i в соответствии с (2.22)-(2.23) принимает вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial a_0} = -2 \sum_{j=1}^N (y_j - a_0 - a_1 x_j) = 0; & a_0 N + a_1 \sum_{j=1}^N x_j = \sum_{j=1}^N y_j; \\ \frac{\partial J}{\partial a_1} = -2 \sum_{j=1}^N (y_j - a_0 - a_1 x_j) x_j = 0; & a_0 \sum_{j=1}^N x_j + a_1 \sum_{j=1}^N x_j^2 = \sum_{j=1}^N y_j x_j. \end{cases} \quad (2.24)$$

Преобразовывая (2.24), получены следующие соотношения:

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{j=1}^N x_j \\ \sum_{j=1}^N x_j & \sum_{j=1}^N x_j^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^N y_j \\ \sum_{j=1}^N y_j x_j \end{bmatrix}, \quad U\beta = Y. \quad (2.25)$$

Решением системы (2.25) являются искомые выражения для коэффициентов уравнения регрессии a_i :

$$\beta = U^{-1} Y.$$

После применения алгоритма МНК к выражению (2.8) получены значения $a_0 = 0.00009032$, $a_1 = -0.019194$. Сравнительная характеристика исходной зависимости и линеаризованной приведена на рисунке 2.24.

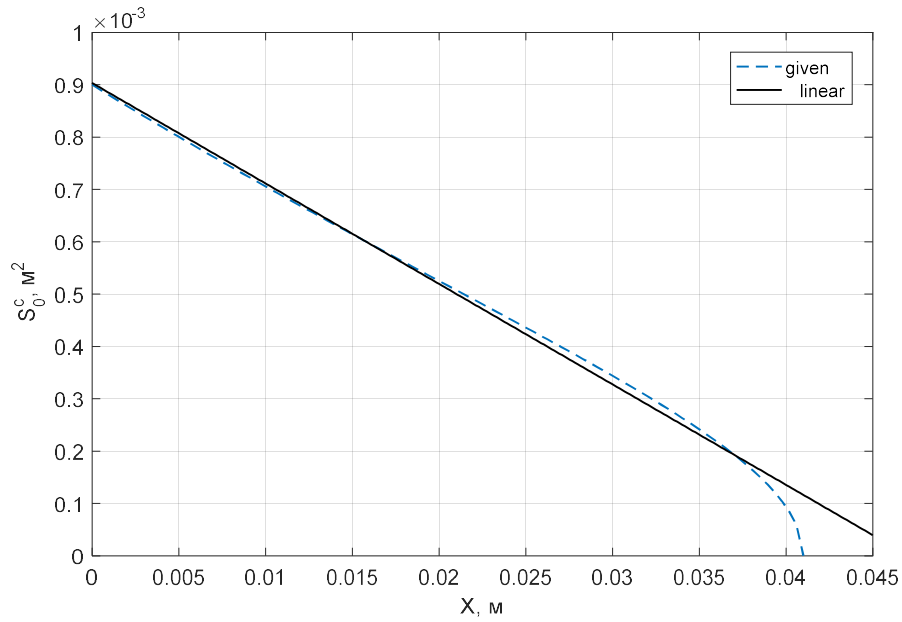


Рисунок 2.24 – Сравнительная характеристика исходной и линейризованной зависимости $S_0^c(X)$

После применения алгоритма МНК к выражению (2.9), были получены значения коэффициентов $a_0=-0.00001$, $a_1=0.21137$. Сравнительная характеристика исходной зависимости и линейризованной приведена на рисунке 2.25.

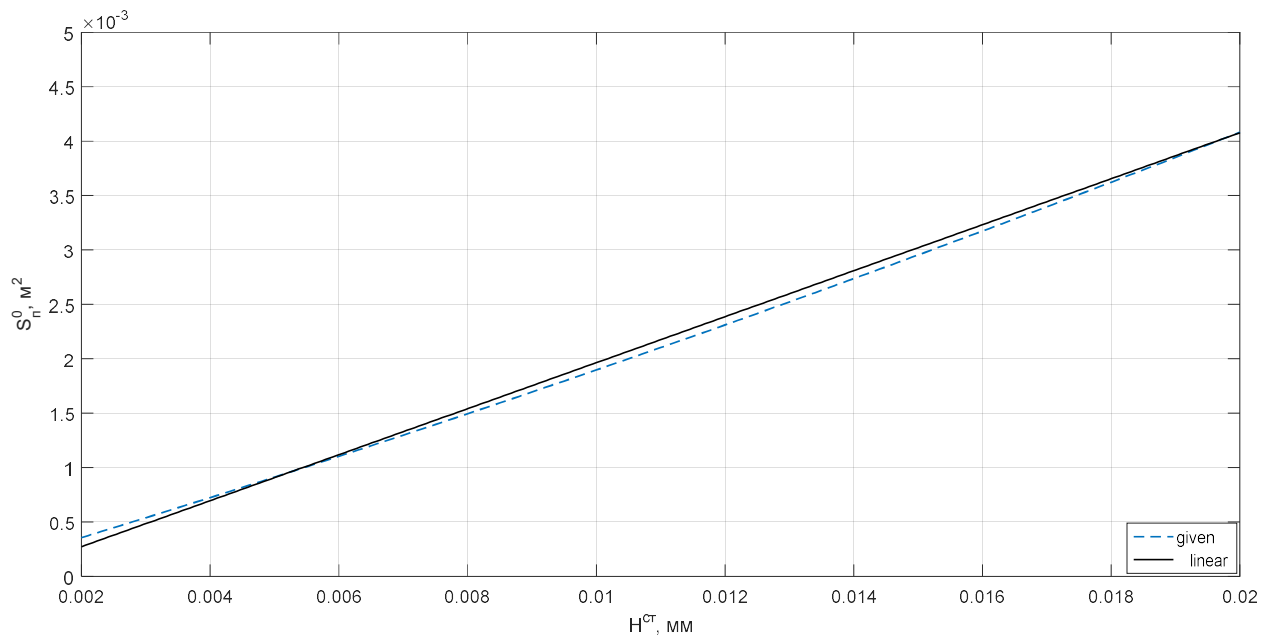


Рисунок 2.25 – Сравнительная характеристика исходной и линейризованной зависимости $S_0^n(H^{cm})$

После применения алгоритма МНК к выражению (2.15), были получены значения коэффициентов $a_0=1.2688e-18 \approx 0$, $a_1=4.8475$. На рисунке 2.26 приведена

сравнительная характеристика исходной и линеаризованной зависимостей $Q^n(S_0^n, L^n)$ при $L^{ПК}=1.3$ м (поскольку именно это значение является заданным в соответствии с технологическим регламентом).

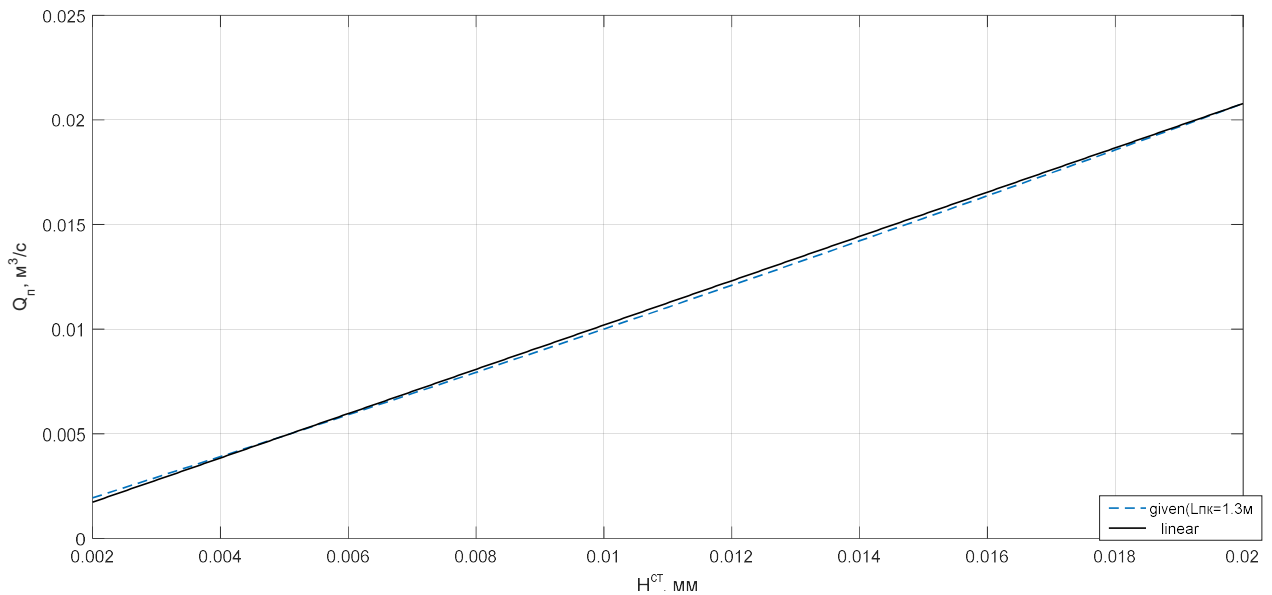


Рисунок 2.26 – Сравнительная характеристика исходной и линеаризованной зависимости $Q^n(H^{cm}), L^{ПК} = 1.3$

Линеаризация выполнена для всего семейства характеристик, полученных при значениях $L^{ПК}=0.5:0.1:1.5$. Результаты приведены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1. – Значения коэффициента наклона статической характеристики a_1 в зависимости от уровня металла в промковше.

N	L^n	a_1
1	0.5000	3.0063
2	0.6000	3.2932
3	0.7000	3.5571
4	0.8000	3.8027
5	0.9000	4.0334
6	1.0000	4.2515
7	1.1000	4.4591
8	1.2000	4.6573
9	1.3000	4.8475
10	1.4000	5.0305
11	1.5000	5.2071

2.7 Выводы по разделу 2

1. С использованием системного подхода технологический процесс непрерывной разливки стали представлен как сложный многосвязный объект. Декомпозиция процесса непрерывной разливки стали на ряд технологических участков (аппаратов) позволила определить основные переменные, влияющие на ход процесса, а также выявить взаимосвязь между участками технологической схемы как объектами управления.

2. Разработана динамическая математическая модель технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор», основанная на рассмотрении материального баланса 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. Анализ результатов моделирования подтверждает соответствие качественного поведения модели основным характеристикам исследуемого технологического процесса, а также результатам, приведенным в литературных источниках.

3. Разработано программное обеспечение, позволяющее моделировать динамические режимы работы МНЛЗ на участке «стальковш-кристаллизатор» в нестационарных режимах работы.

4. Найдены коэффициенты линейных аналитических зависимостей площади проходного сечения шиберного и стопорного затворов от положения соответствующих запирающих элементов, а также расходной характеристики стопора в рабочей области с помощью метода наименьших квадратов, с целью дальнейшего использования при синтезе системы управления.

РАЗДЕЛ 3

СИНТЕЗ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ
РЕЖИМАХ ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК

3.1 Обоснование структуры разрабатываемой системы управления

На основе анализа современных методов синтеза систем управления процессом непрерывной разливки стали выяснено, что эффективное управление исследуемым процессом возможно только в результате сочетания определенных свойств системы управления, обеспечивающей работу в области допустимых режимов и, в то же время, восприимчивой к управляющим воздействиям и робастной по отношению к изменению параметров технологических элементов процесса и режимов разливки стали в заготовки [54, 56, 63].

Аппараты технологического процесса непрерывной разливки – стальковш, промковш и кристаллизатор – соединены последовательно, поэтому значительные колебания количества поступающего металла в одном из них приводит к нарушению режимов работы остальных. Выход каждого аппарата является управляющим и/или возмущающим воздействием для следующего, следовательно, для построения системы управления уровнем металла применение принципа разомкнутого управления невозможно [8]. Поскольку некоторые возмущающие воздействия (например, скорость вытягивания заготовки) могут быть измерены или оценены, что позволит корректировать управляющие воздействия в соответствии с их изменениями и компенсировать вызываемые отклонения регулируемой переменной, то целесообразно применить принцип управления по возмущению.

Однако, при управлении по возмущению производится компенсация влияния только измеряемого возмущения. Остальные неконтролируемые возмущения (например, люфты исполнительных механизмов, температура стали и т.д.) приводят к отклонениям, которые не компенсируются, вследствие чего на выходе системы наблюдается ошибка. Более эффективным является комбинированное управление на основании компенсации и обратной связи по регулируемой координате, что позволит

объединить достоинства обоих принципов: быстроту реакции на возмущение и точность регулирования независимо от природы возмущений [31, 33].

Анализ существующих систем управления процессом непрерывной разливки показал их низкую эффективность при изменении скорости вытягивания. И, поскольку это возмущение может быть измерено, то использование комбинированной структуры системы управления с компенсацией по каналу «скорость вытягивания – уровень металла в кристаллизаторе» является рациональным [13].

На основании сказанного обобщенная структурная схема модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ представлена на рисунке 3.1. Задачи управления отдельными взятыми величинами решаются соответствующими локальными системами управления [14].

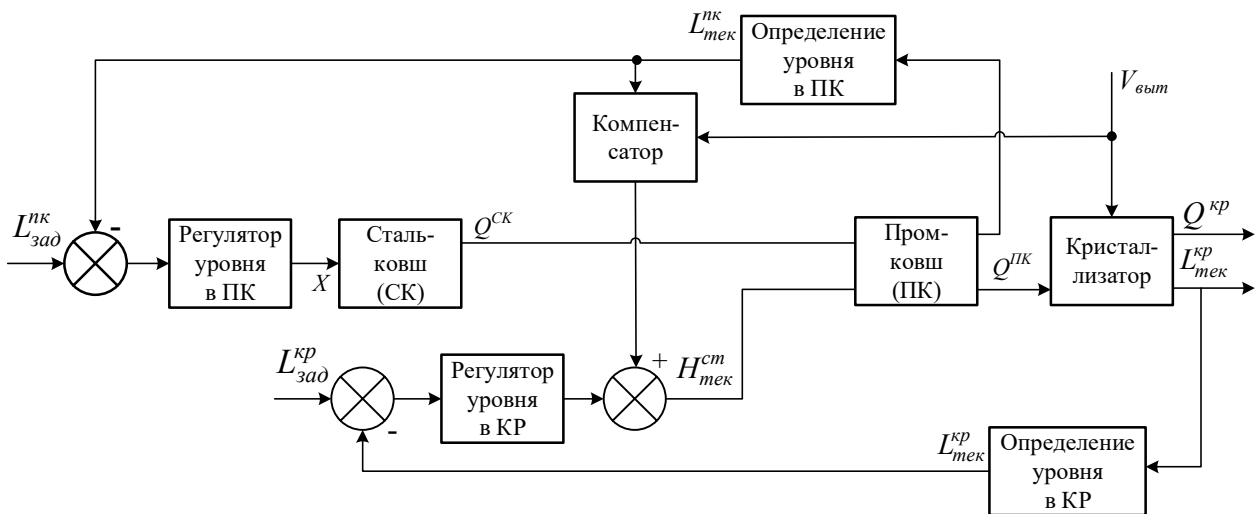


Рисунок 3.1 – Функциональная схема модифицированной системы управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ

Таким образом, задача синтеза модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ заключается в нахождении структуры и параметров регуляторов уровня металла в промковше и кристаллизаторе, а также компенсаторов по каналу возмущения «скорость вытягивания – уровень металла в кристаллизаторе».

3.2 Синтез локальной системы регулирования уровня металла в проковше МНЛЗ

Управление уровнем металла в проковше МНЛЗ осуществляется за счет регулирования изменения расхода металла из стальнойковша. Наибольшее распространение получил метод дозирования стали из стальнойковша при помощи шиберного затвора. Подвижная плита перемещается горизонтально, вследствие чего изменяется площадь проходного сечения и, следовательно, расход поступающего в проковш металла.

Функциональная схема системы управления уровнем металла в проковше на основе принципа управления по отклонению приведена на рисунке 3.2.

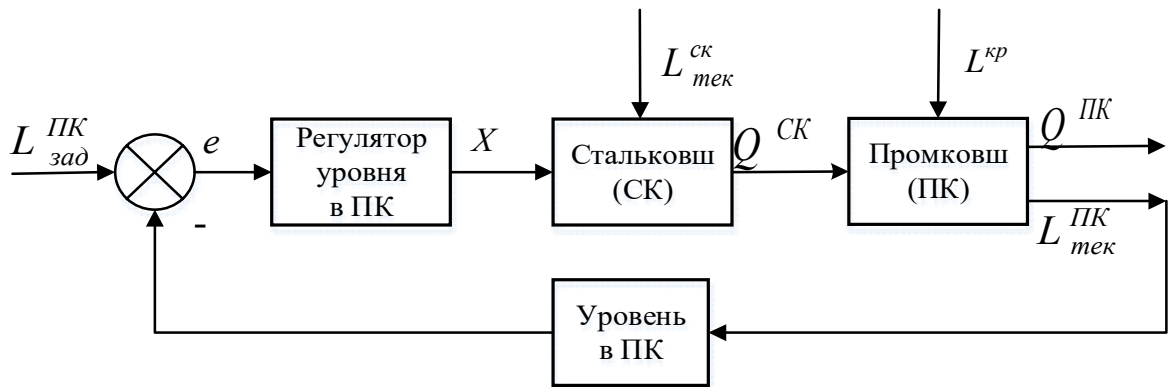


Рисунок 3.2 – Функциональная схема системы управления уровнем металла в проковше

Поскольку проковш является объектом без самовыравнивания (обладает астатизмом первого порядка), то при выборе регулятора можно отказаться от использования И-составляющей (во избежание возникновения структурной неустойчивости) и ограничиться П-регулятором с функцией управления вида

$$U(t) = k_p e(t) \quad (3.1)$$

На основе функциональной схемы (Рисунок 3.2) и предложенного закона управления (3.1), а также учитывая технологически обусловленные ограничения исполнительного механизма (на максимальное перемещение и скорость подвижной плиты шиберного затвора), построена модель системы регулирования уровня металла в проковше, представленная на рисунке 3.3.

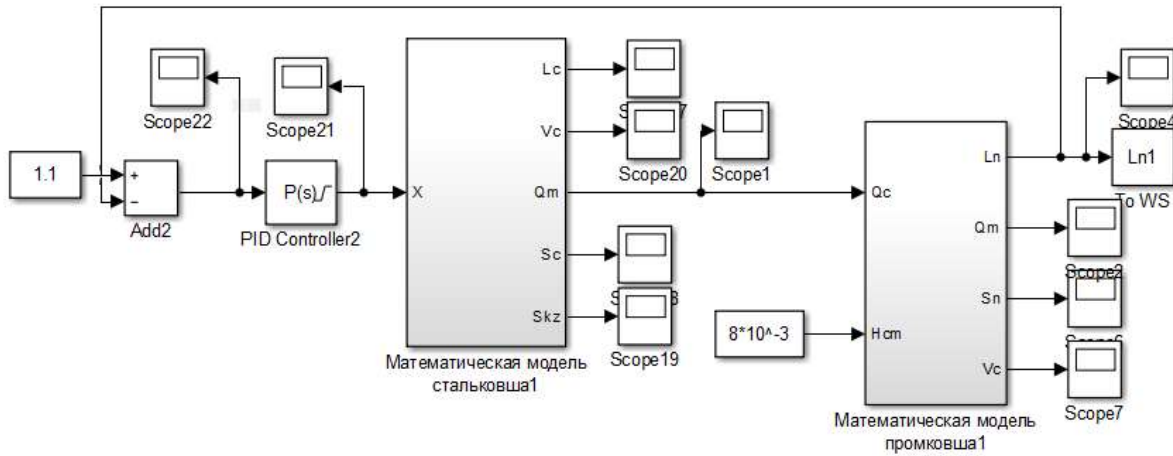


Рисунок 3.3 – Структурная схема моделирования системы управления уровнем металла в промковше

Так как рассматриваемый контур управления является вспомогательным для решения основной задачи управления уровнем металла в кристаллизаторе, то допустимыми границами отклонения уровня металла в промковше от заданного положим $\pm 5\%$. Причем, главной задачей управления в данном случае является поддержание постоянного уровня металла в промковше в стационарном режиме разливки. На основе анализа свойств объекта и исследований методом математического моделирования было определено, что объект неустойчив и содержит большое количество элементов, которые описываются нелинейными функциями. Вследствие этого настройку регулятора на практике невозможно произвести классическими методами [25, 76]. Поэтому принято решение использовать алгоритм поиска настроек параметров регулятора с учетом ограничений и прямых показателей качества (время переходного процесса, величина перерегулирования, колебательности и ошибки) на основании численного моделирования с фиксированным шагом по параметру регулятора k_p .

Для этого предложен следующий алгоритм [20]:

1. Задаются граничные значения коэффициента регулятора k_p^{\min} , а так же шаг его изменения dk_p . На первом шаге принимается

$$k_p^1 = k_p^{\min}.$$

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

$$L^{nk \min} \leq L^{nk} \leq L^{nk \max}, \quad (3.2)$$

тогда выполняется переход к шагу 6.

3. Вычисляется величина управляющего воздействия $u(t)$, формируемого регулятором. Если она не удовлетворяет условию $0 \leq u(t) \leq u^{\max}$ (или в данном случае $0 \leq S_0^c \leq S_0^{c \max}$), тогда выполняется переход к шагу 6.

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

5. Запоминается параметр k_p^i как допустимый.

6. Изменяются настройки регулятора

$$k_p^{i+1} = k_p^i + dk_p$$

и проверяется выполнение условия достижения граничного значения k_p^{\max} . При достижении граничного значения вычислительный процесс завершается, в противном случае вычислительный алгоритм повторяется с шага 2.

Первоначальная область значений параметров регулятора может быть определена, исходя из анализа свойств объекта, закона управления (3.1) и ограничений на управление, а также ограничений на выходную величину (3.2). Методика выбора шага dk_p изменения параметра регулятора заключается в оценке его влияния на величину показателей качества [29].

В результате найдена область допустимых значений параметров регулятора (при исследовании также учитывался режим работы исполнительного устройства), при которых переходные процессы в замкнутой системе управления обладают требуемыми показателями качества (листинг программы приведен в приложении В). Результаты исследования приведены на рисунке 3.4

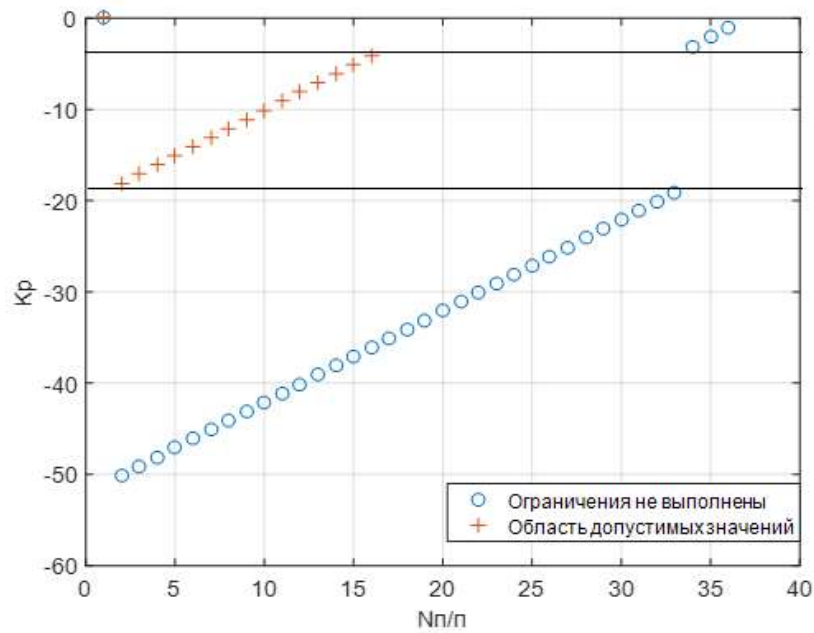
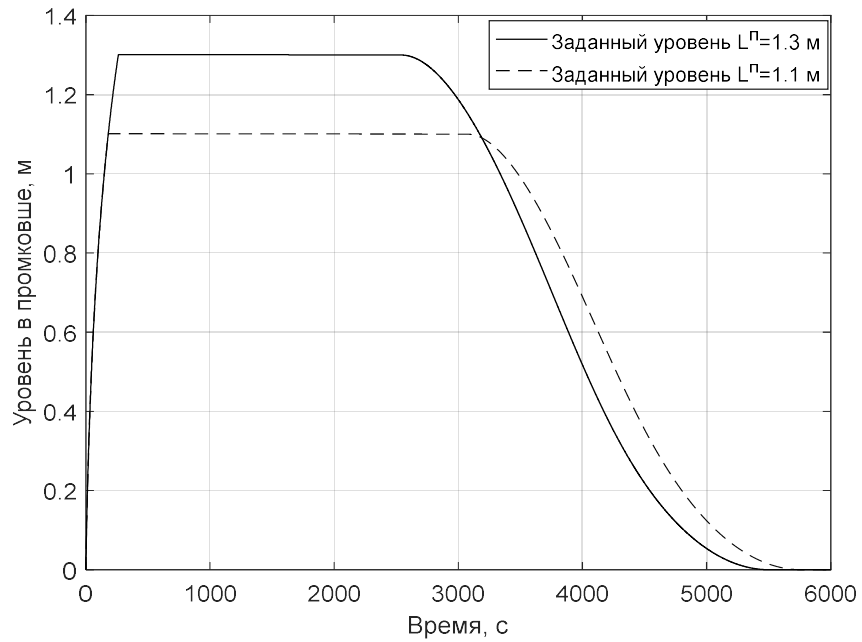


Рисунок 3.4 – Настройка регулятора уровня металла в промковше

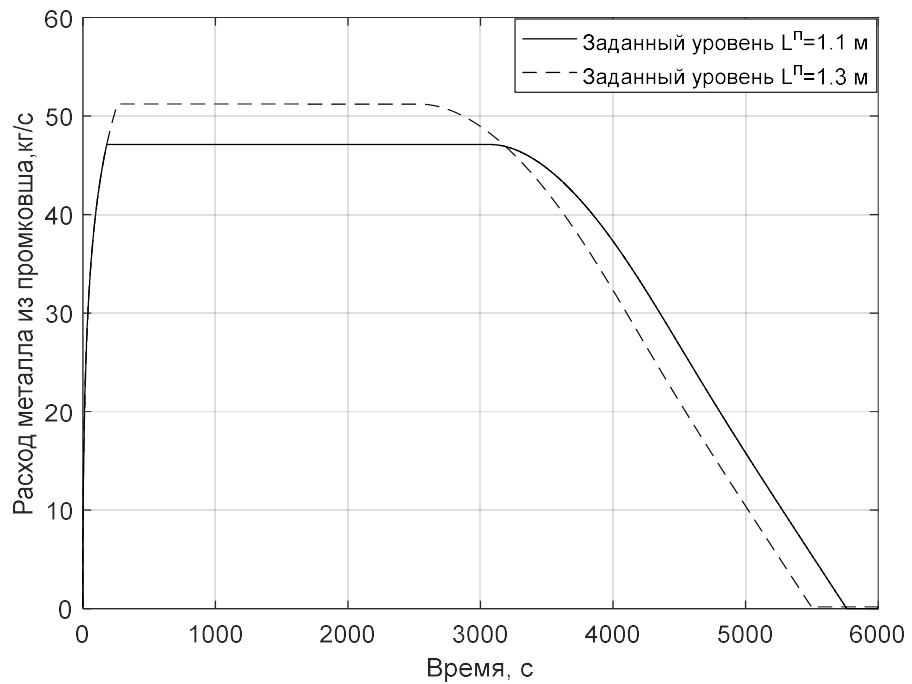
После определения первоначальной области допустимых значений (Рисунок 3.4), диапазона и шага перебора, эти параметры могут быть уменьшены для уточнения коэффициента k_p и получения области наилучших значений П-регулятора. Для рассматриваемого контура первоначальная область определена на интервале $[-4 \div -19]$ при использовании следующих значений показателей качества переходного процесса: время регулирования $t_{\text{уп}} = 100$ с, перерегулирование $\delta = 5\%$, статическая ошибка $S = 10$ мм. Затем, в результате постановки более жестких требований к качеству переходного процесса до $t_{\text{уп}} = 50$ с, $\delta = 3\%$, $S = 1$ мм, количество колебаний не более 2 и отсутствие достижения исполнительного устройства предельного значения, сокращен до интервала $[-9 \div -11]$. Для обеспечения запаса устойчивости в случае изменения параметров объекта и системы управления в процессе функционирования, в качестве рабочего значения k_p рекомендуется выбирать значение из центральной части допустимой области.

Графики переходных процессов в замкнутой системе управления уровнем металла в промковше в процессе разлива одного стальной ковша массой 220 т представлены на рисунке 3.5. В качестве примера использованы два значения уровня: $L^{\text{ПК}} = 1,1$ м и $L^{\text{ПК}} = 1,3$ м.

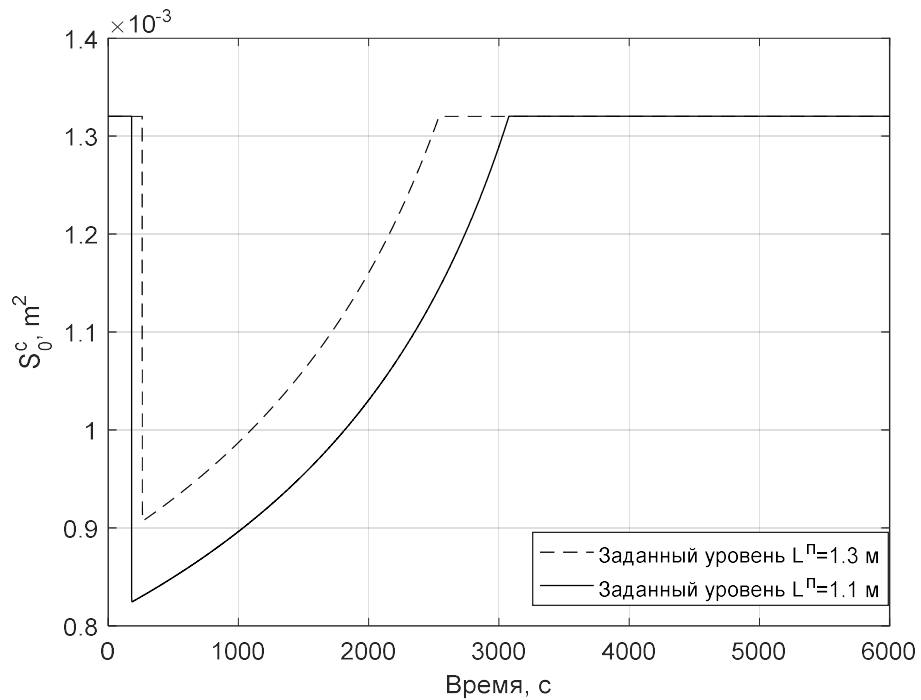
Таким образом, за счет управления положением подвижной плиты шиберного затвора представленная система обеспечивает заданный уровень металла в промковше, и тем самым равномерный расход в кристаллизатор.



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 – Результаты моделирования системы поддержания уровня металла в промковше при разливке стали из одного стальной ковша: а) – изменения уровня жидкого металла в промковше; б) – массовый расход жидкого металла из промковша; в) – график изменения площади проходного сечения шибера затвора.

3.3 Синтез локальной системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ

Управление уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ осуществляется за счет изменения расхода металла из промковша. Наибольшее распространение в используемых в настоящее время МНЛЗ получил метод дозирования стали из промковша в кристаллизатор при помощи стопорного механизма. Стопор перемещается вертикально относительно стакана-дозатора, вследствие чего изменяется площадь проходного сечения и, следовательно, расход поступающего из промежуточного ковша в кристаллизатор металла (Рисунок 3.6).

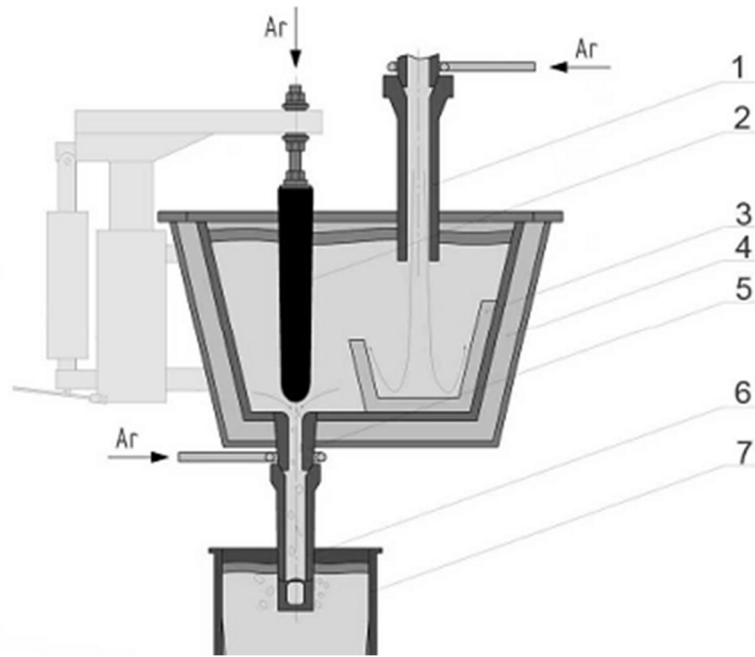


Рисунок 3.6 – Схема движения стали из промковша в кристаллизатор: 1 – защитная труба; 2 – стопор; 3 – металлоприемник; 4 – промежуточный ковш; 5 – стакан-дозатор; 6 – погружной стакан; 7 – кристаллизатор.

На рисунке 3.7 приведена наиболее распространенная схема системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе [18].

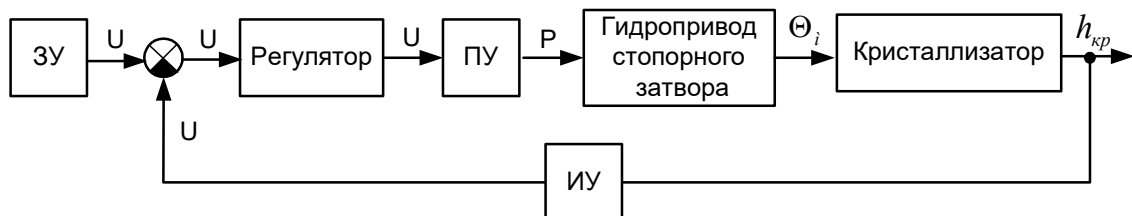


Рисунок 3.7 – Функциональная схема системы регулирования уровнем металла в кристаллизаторе: ЗУ - задающее устройство, ПУ – преобразовательное устройство, ИУ – измерительное устройство (датчик).

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

- изменение скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора;
- размывание или разрушение головки стопора;
- зарастание внутренней полости стакана-дозатора;

- люфты в приводе и стопорном механизме.

Функциональная схема системы управления уровнем металла в кристаллизаторе на основе динамики проковша и кристаллизатора приведена на рисунке 3.8.

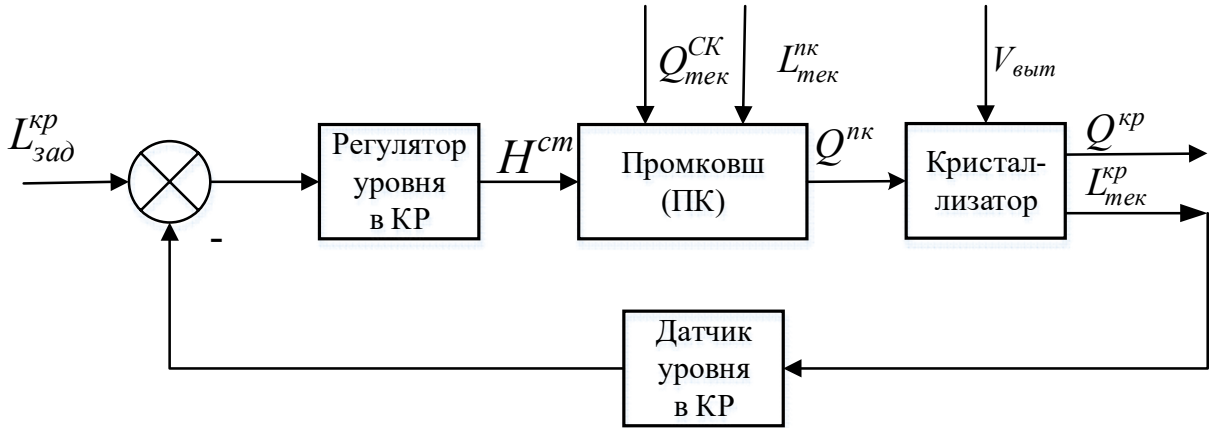


Рисунок 3.8 – Функциональная схема системы управления уровнем металла в кристаллизаторе

Модели элементов данной системы описываются следующими соотношениями. Динамические характеристики кристаллизатора описываются уравнениями (2.13). Уровень металла в кристаллизаторе $L^{кр}$ однозначно связан с величиной расхода стали из проковша и расходом стали из кристаллизатора. Расход разливаемого металла из проковша определяется площадью сечения отверстия дозатора (2.9) и уровнем стали в проковше (2.15).

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 пропускной способности дозирующего канала при постоянном уровне металла в промежуточном ковше.

На основе анализа свойств объекта и исследований методом математического моделирования было определено, что поскольку на поведение уровня металла в кристаллизаторе большое влияние оказывает регламент изменения скорости вытягивания, то закон изменения управляющей величины должен отличаться в различных режимах работы МНЛЗ. Пример регламентного изменения скорости вытягивания для слябовой МНЛЗ во время разливки представлен на рисунке 3.8

(обозначения и описание этапов P_i, принятых на рис. 3.8, приведены в приложении Б.)

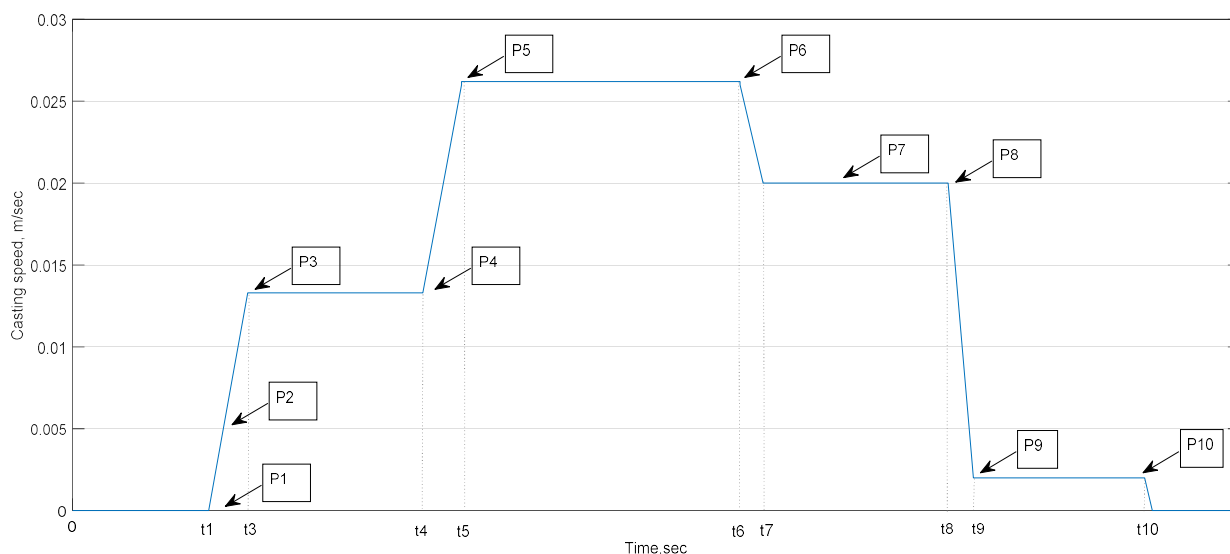


Рисунок 3.8 – Регламент изменения скорости вытягивания заготовки

Основной задачей модифицированной системы управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ является обеспечение быстрой реакции на изменение задания и точная стабилизация уровня в стационарном режиме, а также максимальное ослабление воздействия внешних возмущений в нестационарных режимах литья заготовок.

Таким образом, на участках набора скорости с целью максимально быстрой отработки задания принято решение использовать П-регулятор с функцией управления (3.1).

В стационарном же режиме разливки, когда необходимы высокое быстродействие при отработке возмущений, и высокая точность поддержания заданного значения регулируемой переменной, отсутствие статической ошибки необходимо использовать ПИ-закон управления:

$$U_{\text{пер}}(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (3.3)$$

На основе структурной схемы (рисунок 3.8), выражений (2.7), (2.11), (2.15), (2.17) и предложенных законов управления (3.1), (3.3), а также учитывая существующие технические особенности исполнительных устройств, построена модель системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе, представленная на

рисунке 3.9. При моделировании учтены ограничения на максимальное перемещение и скорость штока гидроцилиндра.

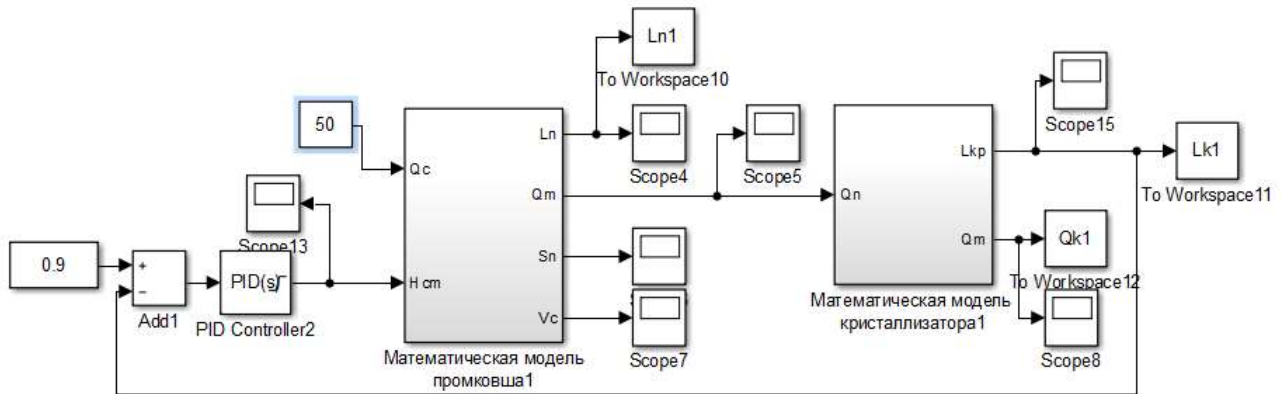


Рисунок 3.9 – Структурная схема моделирования исследуемого контура системы управления уровнем металла в кристаллизаторе

Поиск настроек параметров П-регулятора с учетом ограничений и прямых показателей качества (время регулирования, величина перерегулирования и ошибки) выполнен на основании численного моделирования с фиксированным шагом по параметру регулятора k_p в соответствии с алгоритмом, предложенным в п. 3.2. В результате найдена область допустимых значений параметров регулятора уровня металла в кристаллизаторе, при которых переходные процессы в замкнутой системе управления обладают необходимыми показателями качества переходного процесса: время регулирования $t_{\text{уп}} < 50$ с, перерегулирование $\delta = 2,5\%$, количество колебаний выходной величины не более 2 и отсутствие статической ошибки и достижения исполнительным устройством предельного значения.

На рисунке 3.10, представлены результаты, полученные в процессе настройки П-регулятора для участков набора скорости P2-P3, P4-P5.

На рисунке 3.11 представлены переходные процессы в системе управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе при использовании регулятора с полученными параметрами при изменении скорости вытягивания в нестационарном режиме работы.

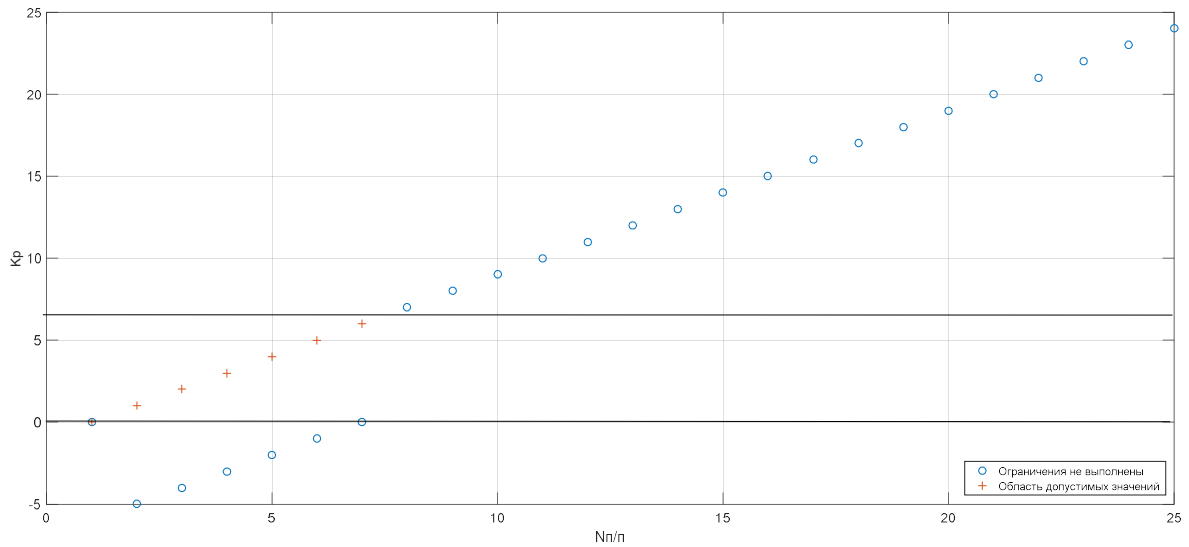


Рисунок 3.10 – Область допустимых значений параметра k_p , полученная в результате настройки регулятора уровня металла в кристаллизаторе

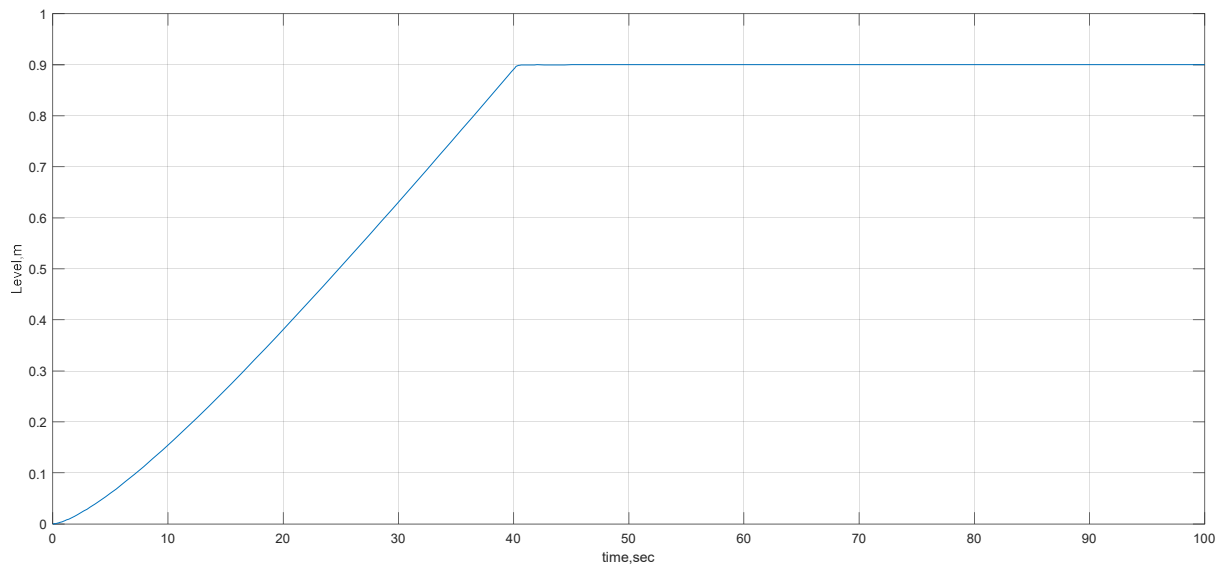


Рисунок 3.11 – Переходные процессы в системе управления стабилизацией уровня металла с предложенным П-регулятором

Алгоритм настройки параметров ПИ-регулятора в соответствии с режимами функционирования МНЛЗ и требуемого качества стабилизации уровня металла в кристаллизаторе на основании численного моделирования с фиксированным шагом по параметрам регулятора аналогичен рассмотренному ранее, но включает в себя прямой перебор по двум параметрам: k_p и k_i .

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

$$k_p^l = k_p^{min}, k_i^l = k_i^{min}.$$

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

$$L^{kp min} \leq L \leq L^{kp max}, \quad (3.4)$$

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, тогда выполняется переход к шагу 6.

5. Запоминаются параметры k_p^i и k_i^i как допустимые.

6. Изменяются настройки регулятора

$$k_p^{i+1} = k_p^i + dk_p \text{ и } k_i^{i+1} = k_i^i + dk_i,$$

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.

На рисунке 3.12 представлены результаты моделирования в виде области допустимых значений параметров, полученных в процессе настройки ПИ-регулятора для участков с постоянной скоростью Р3-Р4, Р6-Р6, Р7-Р8, при которых переходные процессы в замкнутой системе управления обладают лучшими показателями качества, по сравнению с допустимыми: время регулирования $t_{уп} < 1$ с, перерегулирование $\delta = 0,25\%$, количество периодов колебаний выходной величины не более 2 и отсутствие статической ошибки. При проведении исследования установленная область допустимых значений параметров регулятора, при которых выполняются технические ограничения, значительно сужается. Поэтому при последующих вычислениях нет необходимости задания широкого диапазона изменения коэффициентов, что позволяет сократить время, затраченное на решение поставленной задачи.

Переходные процессы в системе при действии ограниченного возмущения по скорости вытягивания в момент времени 20 с приведены на рисунке 3.13.

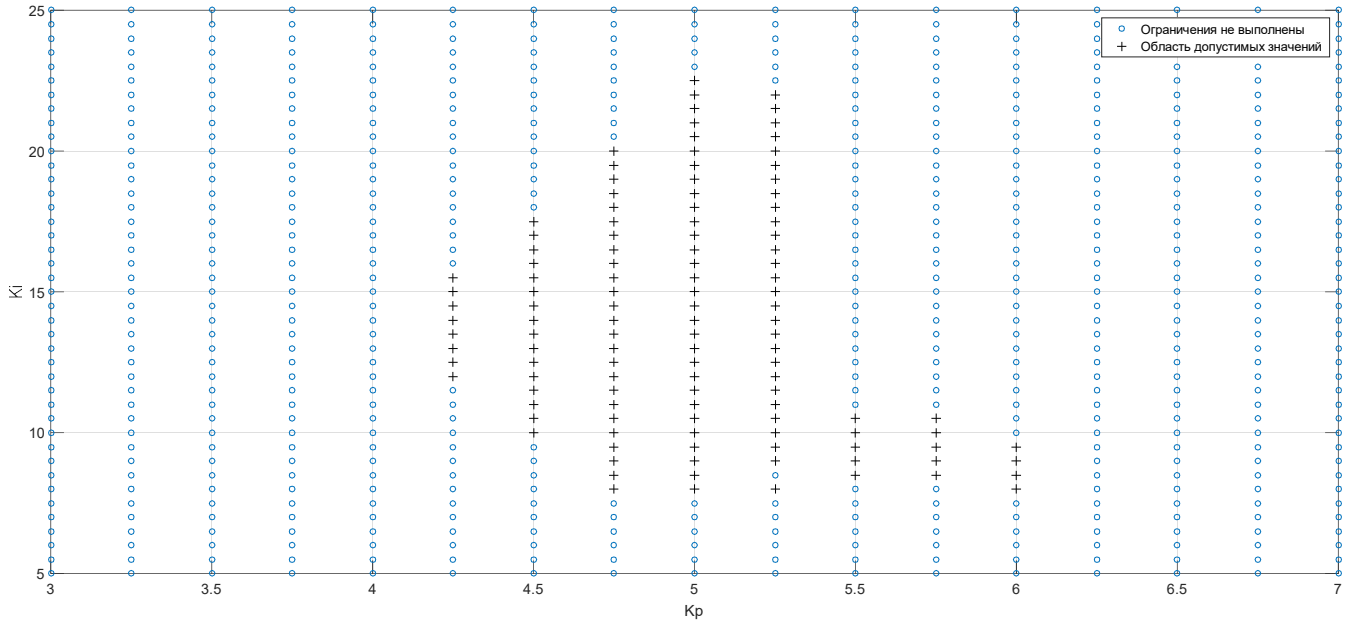
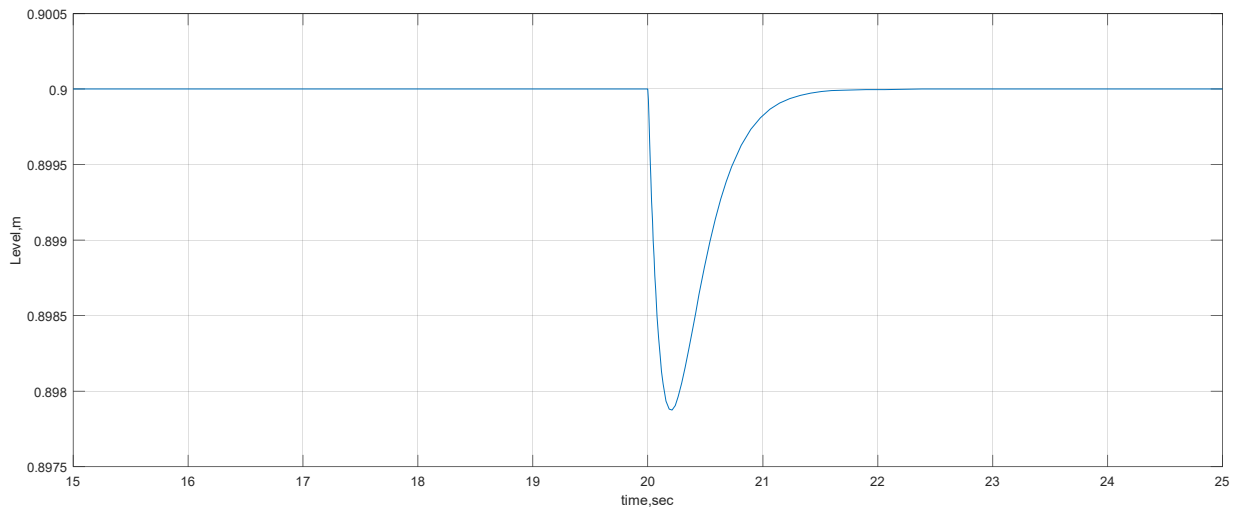


Рисунок 3.12 – Область допустимых значений параметров k_p и k_i , полученная в результате настройки регулятора уровня металла в кристаллизаторе



б)

Рисунок 3.13 – Переходные процессы в системе управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе

Поскольку в разработанной модели учитываются технические ограничения исполнительных механизмов, то при резких изменениях возмущающего воздействия возникает необходимость учесть такой фактор, как интегральное насыщение ПИ-регулятора.

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 [46].

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 рисунке 3.14. 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 выходе ограничительного блока E_s . Эта разница умножается на некоторый коэффициент и суммируется с интегральной частью ПИ-регулятора.

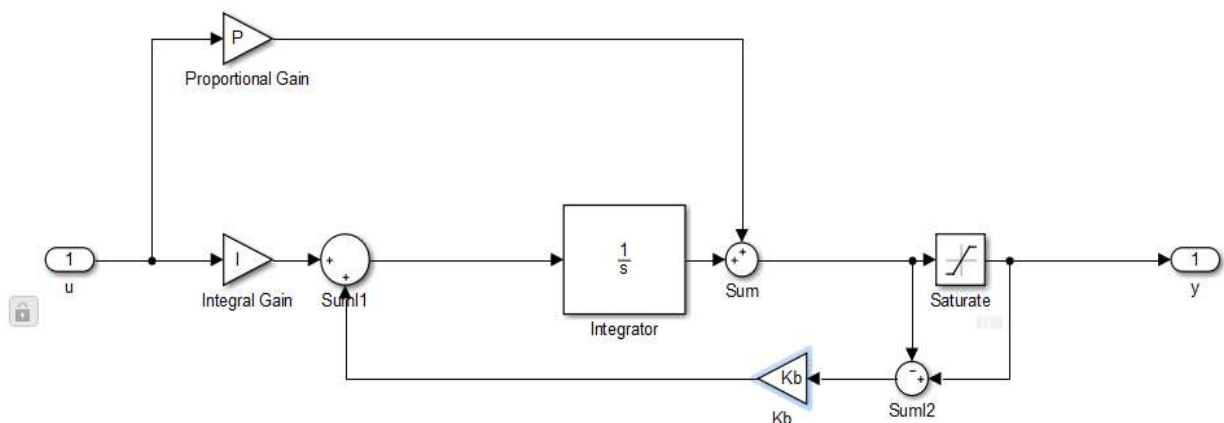


Рисунок 3.14 – Структурная схема подсистемы компенсации эффекта интегрального насыщения

В качестве возмущения использовался сигнал изменения скорости разливки (согласно регламенту), аналогичный представленному на рисунке 3.8. Поскольку регламент изменения скорости имеет несколько переходных участков, на которых происходят существенные изменения, то влияние интегрального насыщения будет ощутимо именно на таких участках.

Для разрабатываемой системы графики изменения уровня металла в кристаллизаторе с ПИ-регулятором и ПИ-регулятором с компенсацией накопления интегральной составляющей приведены на рисунке 3.15.

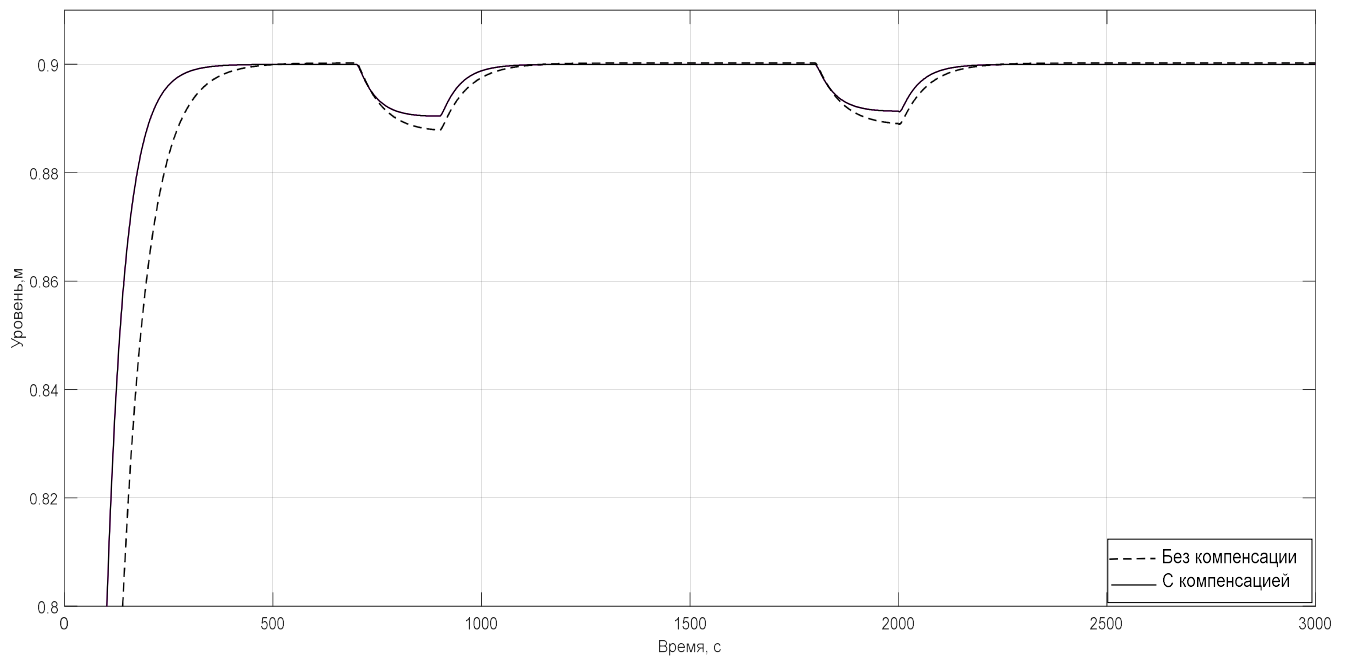


Рисунок 3.15 – Временные зависимости уровня металла в кристаллизаторе с компенсацией интегральной ошибки и без нее.

На рисунке 3.16 представлены графики зависимости уровня металла в кристаллизаторе при исследовании влияния значения коэффициента компенсации интегральной ошибки $Kb=1/T_c$, где значение T_c изменялось в пределах $[0.1\div 100]$. В результате было определено рациональное для данной системы значение ($K4$ на рисунке 3.16). Дальнейшее изменение не привело к существенным положительным изменениям в качестве переходных процессов [15].

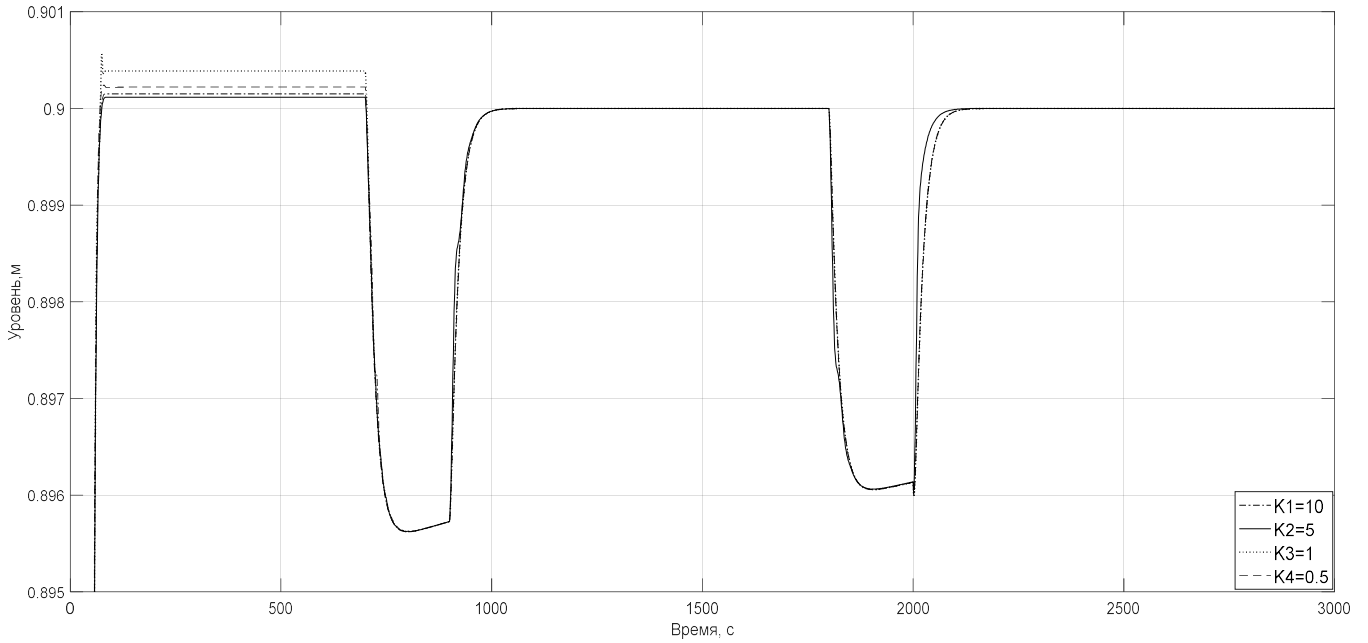


Рисунок 3.16 – Временные зависимости уровня металла в кристаллизаторе с компенсацией интегральной ошибки при различных значениях $K=1/T_c$

Графики изменения уровня металла в кристаллизаторе в системе управления с синтезированными регуляторами и компенсацией эффекта интегрального насыщения при постоянной скорости вытягивания и при изменении скорости по графику рисунков 3.8 приведены на рисунке 3.17.

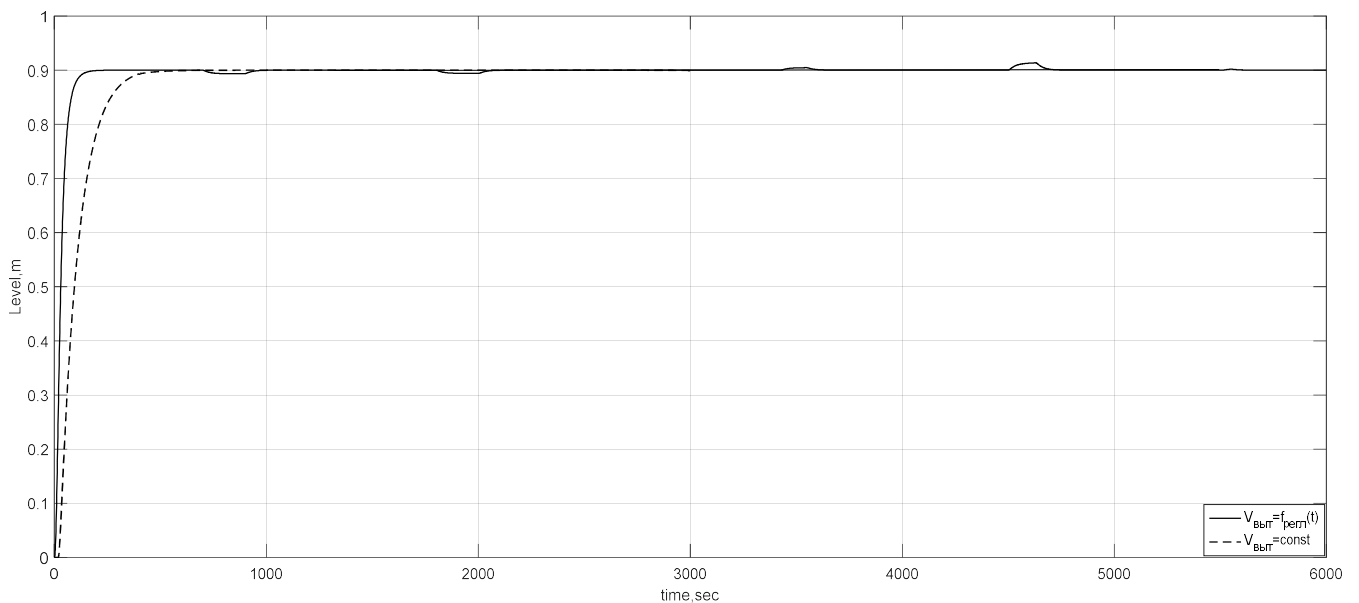


Рисунок 3.17 – Графики переходных процессов в системе управления уровнем металла в кристаллизаторе

Рассматривая в комплексе такие показатели качества (Рисунок 3.17), как время переходного процесса и перерегулирование (с учетом переходных участков) можно сделать вывод, что переходные процессы в модифицированной системе управления стабилизацией уровня металла обладают лучшими показателями качества (на 30-40%) по сравнению с показателями, получаемыми в применяющихся в настоящее время системах.

3.4 Синтез статических компенсаторов

Наиболее существенным возмущением, оказывающим влияние на изменение уровня металла в кристаллизаторе, является скорость вытягивания заготовки тянущей клетью, которая располагается в зоне, где заготовка уже практически полностью затвердела. Скорость вытягивания в основном изменяется в процессе разливки по известному закону, а значит, ее влияние на регулируемый параметр может быть заранее скомпенсировано. С этой целью использована структура комбинированного управления, приведенная на рисунке 3.18.

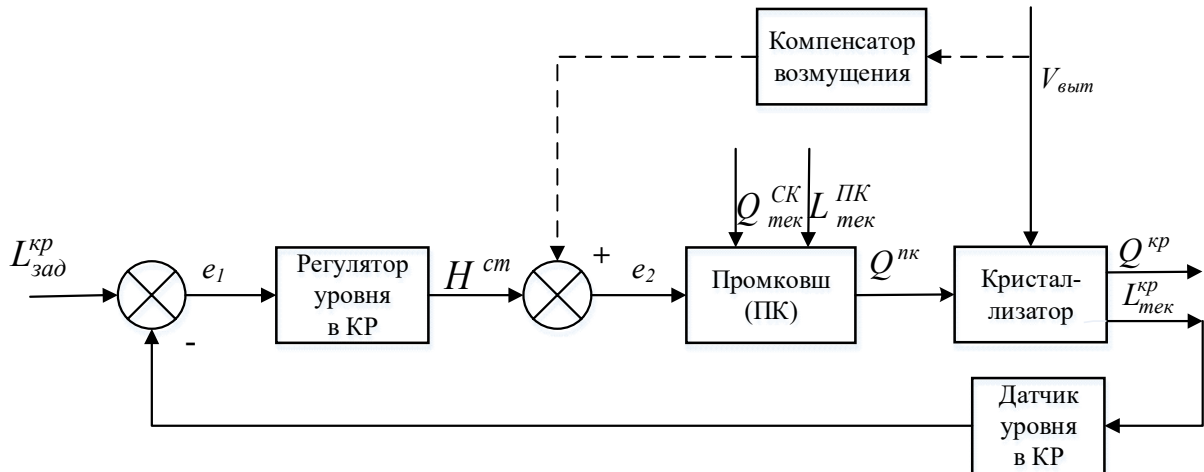


Рисунок 3.18 – Функциональная схема комбинированной системы регулирования уровня металла в кристаллизаторе

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 [53].

Уменьшить влияние внешних возмущений возможно 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 [51].

Компенсация неконтролируемых возмущений по-прежнему реализуется при помощи обратной связи по регулируемой переменной – уровень металла в кристаллизаторе.

Для нахождения структуры и параметров компенсатора используется структура, представленная на рисунке 3.19.

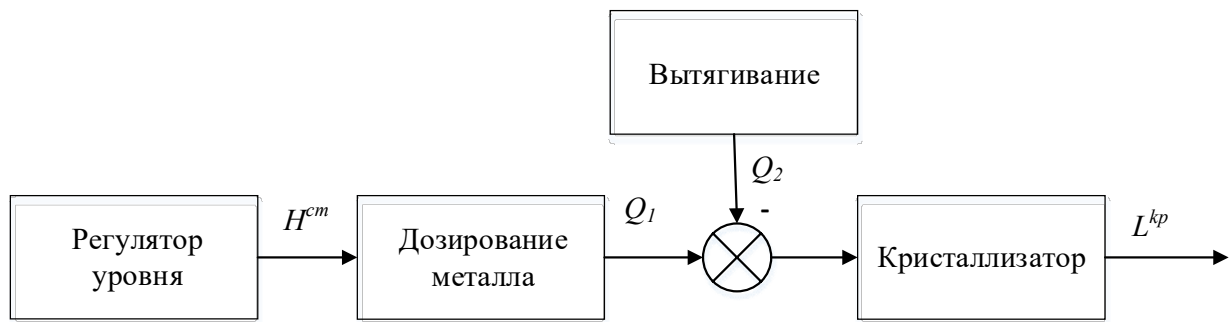


Рисунок 3.19 – Структурная схема для определения параметров компенсатора

Передаточная функция компенсатора в соответствии с принципом инвариантности находится по формуле:

$$W_k(s) = -\frac{W_{\text{воз}}(s)}{W_{\text{упр}}(s)}, \quad (3.5)$$

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.

Рассмотрим структурную схему рис.3.20 для определения передаточной функции по управлению $W_{\text{упр}}(s)$

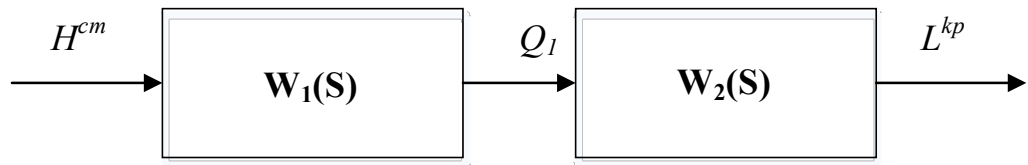


Рисунок 3.20 – Структурная схема для определения передаточной функции по управлению

$$W_{\text{упр}} = W_1(s) \cdot W_2(s), \quad (3.6)$$

где $W_1(s) = \frac{Q_1(s)}{H^{cm}(s)} = \frac{K_{cm}}{s}$, K_{cm} – коэффициент передачи стопорного затвора;

$$W_2(s) = \frac{L^{kp}(s)}{Q_1(s)} = \frac{1/S_{kp}}{s}. \quad (3.7)$$

Таким образом

$$W_{\text{упр}}(s) = \frac{K_{cm}}{s} \cdot \frac{1/S_{kp}}{s} = \frac{K_{\text{упр}}}{s^2}, \quad K_{\text{упр}}(s) = \frac{K_{cm}}{S_{kp}} \quad (3.8)$$

$$W_{\text{воз}}(s) = \frac{L^{kp}(s)}{V_{\text{выт}}(s)} = -\frac{1}{s}, \quad K_{\text{воз}} = -1. \quad (3.9)$$

Тогда в общем виде передаточная функция компенсатора будет иметь следующий вид:

$$W_k(s) = -\frac{W_{\text{воз}}(s)}{W_{\text{упр}}(s)} = -\frac{-1/s}{K_{\text{упр}}/s^2} = \frac{s}{K_{\text{упр}}}. \quad (3.10)$$

Таким образом, динамический компенсатор является физически нереализуемым. Поэтому в работе принято решение ограничиться статическим компенсатором с коэффициентом передачи

$$K_k = -\frac{K_{\text{воз}}}{K_{\text{упр}}}. \quad (3.11)$$

Для нахождения коэффициента K_{yup} воспользуемся линеаризованными зависимостями $S_C(H^{cm})$ с коэффициентом наклона K_1 (Рисунок 2.23) и $Q(S_C)$ (Рисунок 2.24) с коэффициентом наклона K_2 :

$$K_{yup} = \frac{K_1 \cdot K_2}{S_{kp}}. \quad (3.12)$$

В общем случае коэффициент K_2 зависит от уровня металла в промковше, то есть

$$K_{yup}(L^{ПК}) = \frac{K_1 \cdot K_2(L^{ПК})}{S_{kp}}, \quad K_k(L^{ПК}) = -\frac{K_{\text{воз}}}{K_{yup}(L^{ПК})} \quad (3.13)$$

Структурная схема подсистемы моделирования компенсации возмущения приведена на рисунке 3.21. Входами подсистемы являются значение уровня металла в промковше, скорость вытягивания и порядковый номер типа компенсатора $N_{\text{комп}}$: 1- $K_k = \text{var}$, 2- $K_k = \text{const}$, 3 - $K_k = 0$. Выходом является дополнительное перемещение, которое необходимо передать стопору ΔH^{cm} .

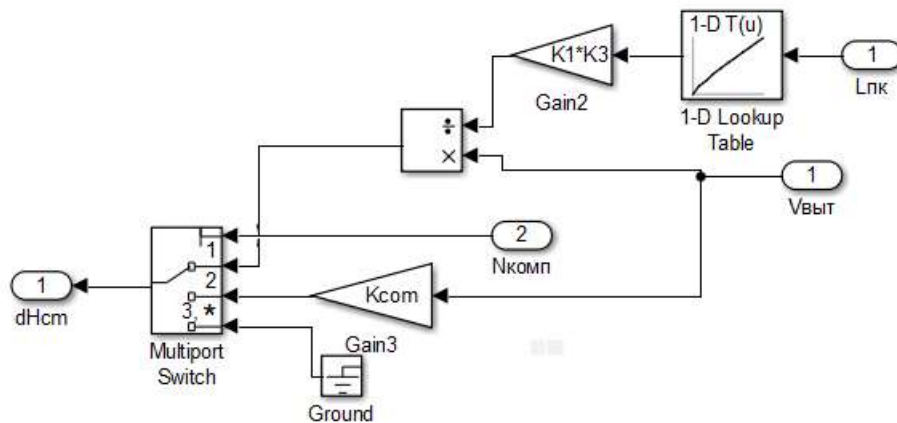


Рисунок 3.21 – Структурная схема моделирования подсистемы компенсации возмущения

Структурная схема моделирования системы управления уровнем металла в кристаллизаторе с учетом подсистемы компенсации возмущения представлена на рисунке 3.22.

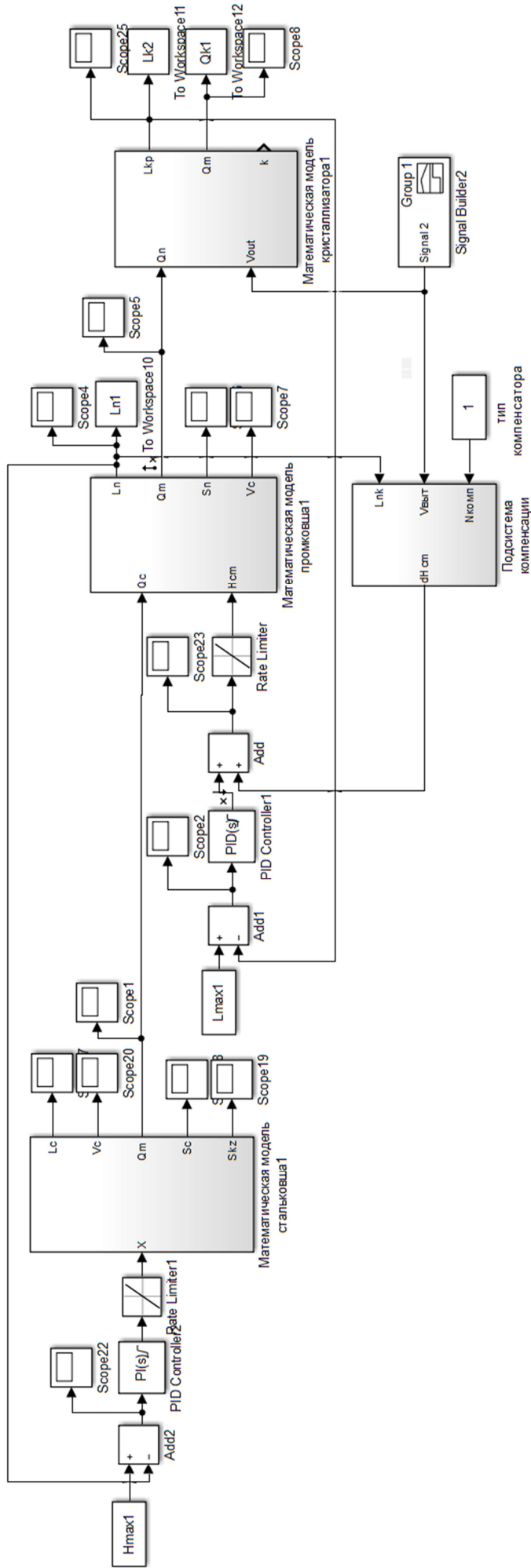


Рисунок 3.22 – Структурная схема моделирования комбинированной системы уровня металла в кристаллизаторе со статическими компенсаторами

Сравнительная характеристика переходных процессов со статическим компенсатором при различных значениях коэффициента компенсации K_k с учетом действия возмущения по скорости вытягивания представлены на рисунке 3.23. В процессе исследования скорость вытягивания заготовки изменялась по графику, представленному на рисунке 3.8.

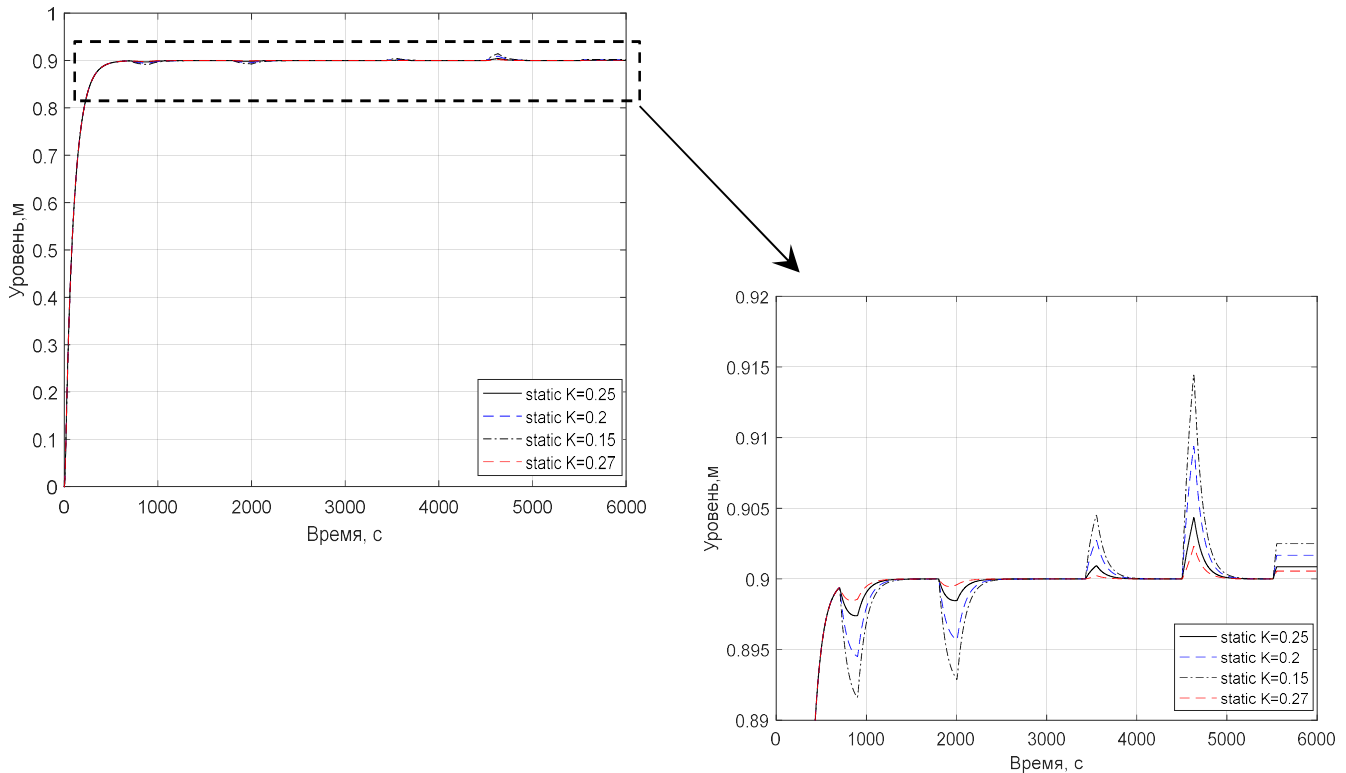


Рисунок 3.23 – Графики переходных процессов в системе со статическим компенсатором при различных значениях коэффициента компенсации K_k

В результате исследования определен допустимый диапазон изменения коэффициента компенсации $[0.15 \div 0.3]$ и наилучшие значения показателей качества переходных процессов достигнуты при $K_k = 0.27$.

Учитывая тот факт, что в процессе разливки уровень металла в промковше зависит от баланса между поступлением постоянно убывающего количества металла из стальнойковша, и истечением металла в кристаллизатор, которое зависит от изменений скорости вытягивания в соответствии с текущим режимом работы установки (например, нормальный, замена стальнойковша, замена погружного стакана, подготовка к замене самого промковша и т.д.), то целесообразным будет использовать статический компенсатор, но с переменным коэффициентом компенсации $K_k(L^{ПК})$.

Для задания закона изменения $K_2(L^{ПК})$ использованы возможности Matlab&Simulink табличного задания коэффициента в точках с фиксированным шагом и линейной интерполяцией на интервалах между ними (Рисунок 3.24) [44, 47].

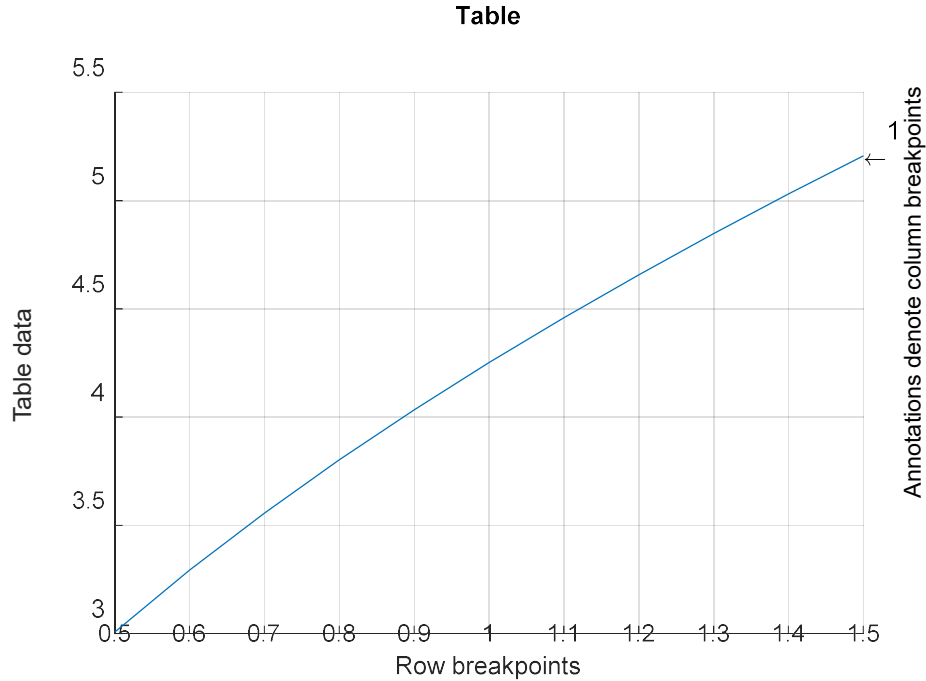


Рисунок 3.24 – Параметры блока Lookur-table для задания зависимости $K_2(L^{ПК})$

Графики переходных процессов в комбинированной системе управления приведены на рисунках 3.25-3.26.

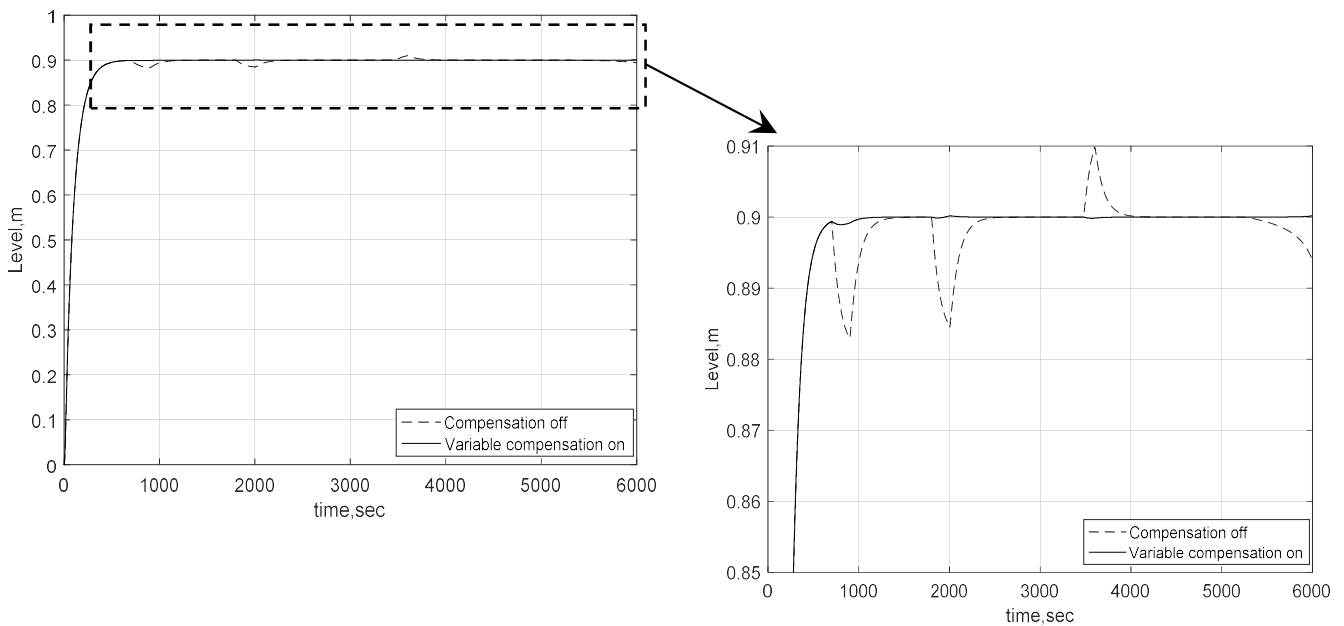


Рисунок 3.25 – График переходных процессов в комбинированной системе управления с переменным коэффициентом компенсации K_k

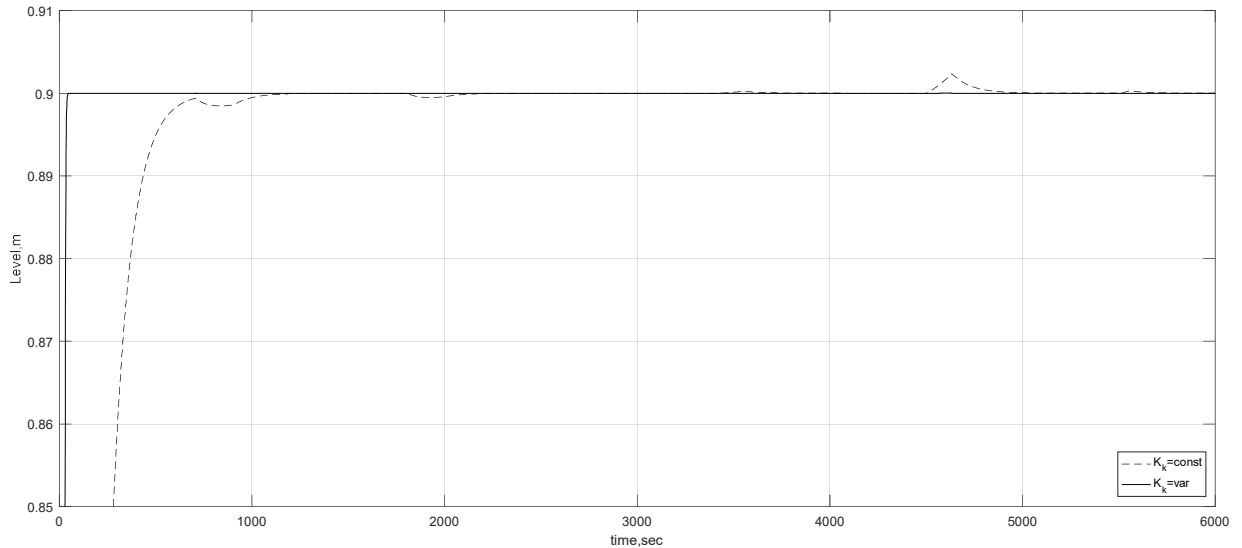


Рисунок 3.26 – Сравнительная характеристика переходных процессов в комбинированной системе управления с постоянным и переменным коэффициентом компенсации K_k

Графики изменения управляющего воздействия (высоты поднятия стопора), выдаваемого регулятором, компенсатором и общий сигнал управления представлены на рисунке 3.27.

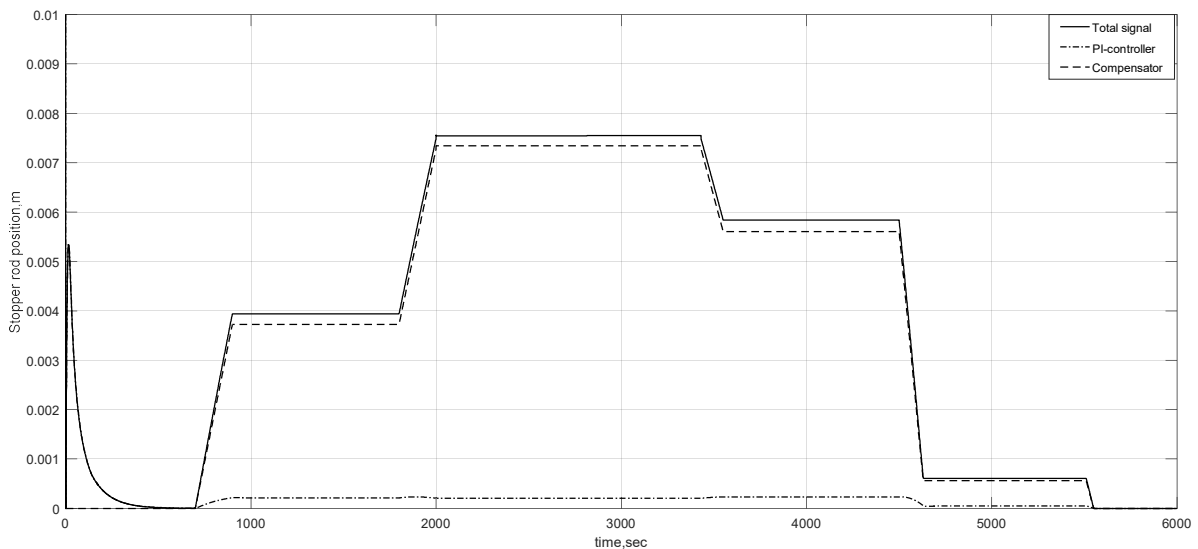


Рисунок 3.27 – График изменения управляющего воздействия (высоты поднятия стопора)

Выполнено исследование работы разработанной системы в еще одном нестационарном режиме – режиме замены стальной ковша («перековшовка»). При этом

скорость вытягивания изменяется в соответствии с законом, представленным на рисунке 3.28.

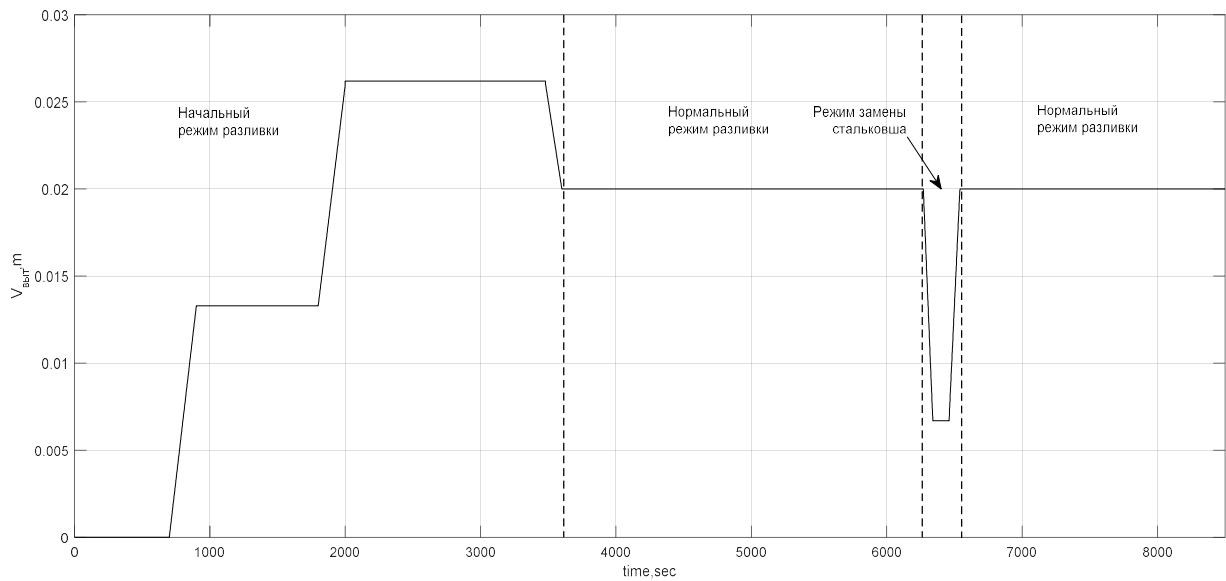


Рисунок 3.28 – Регламент изменения скорости вытягивания заготовки при замене стальнойковша

Результаты моделирования данного режима, представленные на рисунках 3.29-3.30, показали, что, несмотря на значительное снижение уровня металла в промковше относительно заданного значения при отсутствии поступления металла в период замены стальнойковша, отклонение уровня металла в кристаллизаторе не превысило допустимых пределов.

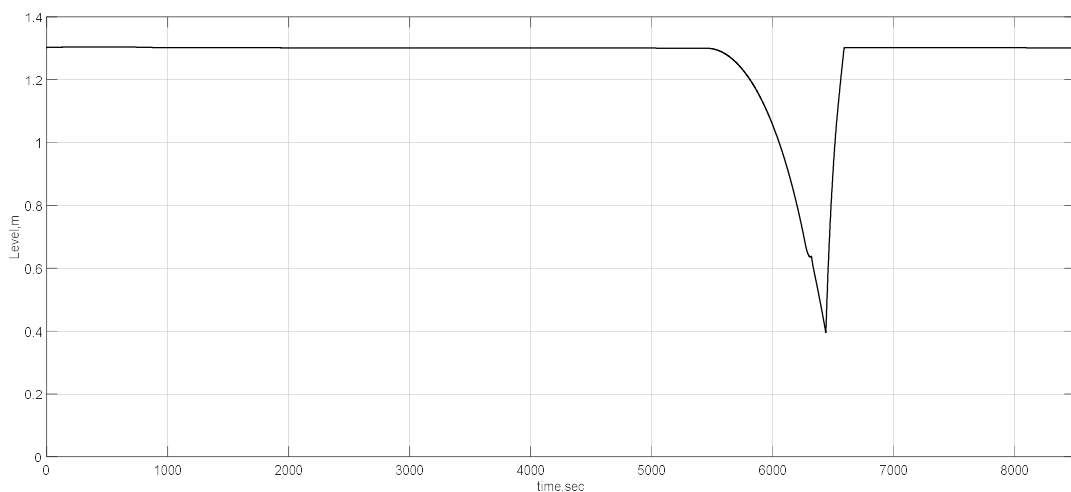


Рисунок 3.29 – График изменения уровня металла в промковше при последовательной разливке двух стальнойковшей (с учетом режима замены стальнойковша)

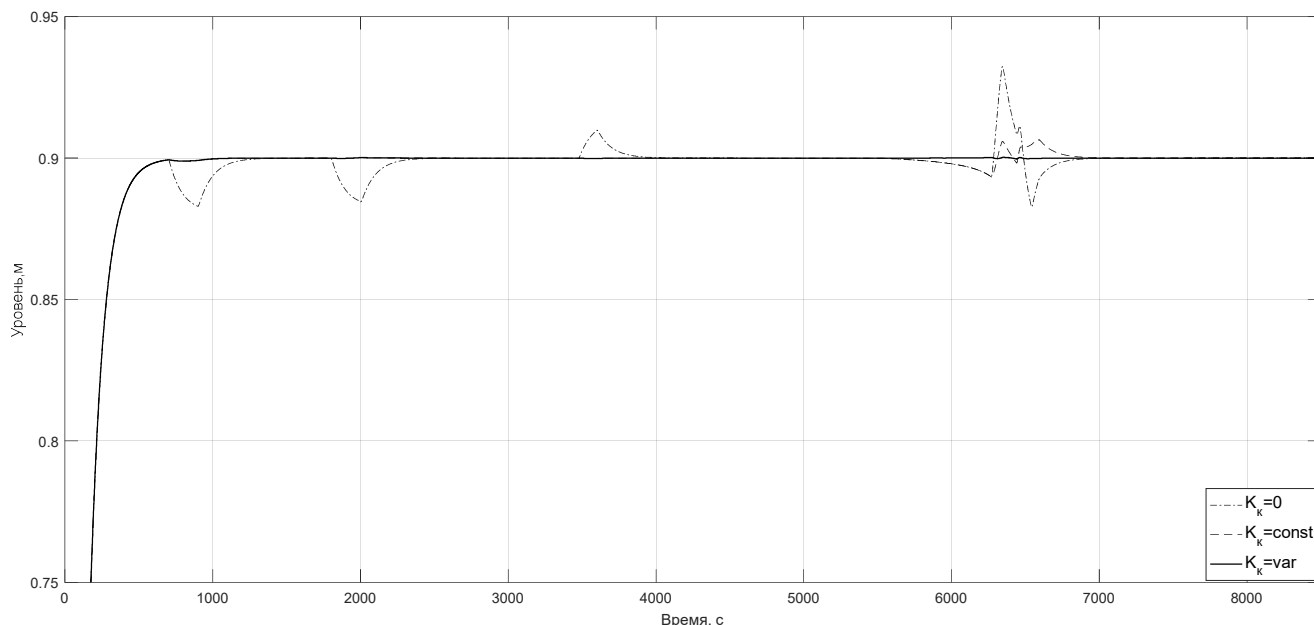


Рисунок 3.30 – График изменения уровня металла в кристаллизаторе при последовательной разливке двух стальной ковшей (с учетом режима замены стальной ковша)

На основе анализа полученных результатов можно сделать вывод, что использование комбинированной структуры системы управления и регулятора с переменной структурой позволяет уменьшить амплитуду отклонения уровня от заданного значения в 2-5 раз по сравнению с существующими системами, построенными только на основе принципа обратной связи.

Таким образом, модифицированная система управления позволяет решить задачу управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ в условиях изменения скорости вытягивания в нестационарных режимах работы. Кроме того, предложенная система частично компенсирует нестабильность подачи металла в кристаллизатор, обусловленную и изменением пропускной способности дозирующего устройства. Полностью решить эту проблему не представляется возможным, однако можно оценить процент зарастания с целью принятия решения о необходимости замены соответствующих устройств.

3.5 Выводы по разделу 3

1. Исходя из анализа технологических особенностей процесса непрерывной разливки стали, обоснована целесообразность использования комбинированного

управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ в нестационарных режимах работы на основании компенсации возмущений и обратной связи по регулируемой координате, что позволило объединить преимущества двух принципов: быстроту реакции на возмущение и точность регулирования независимо от природы возмущений.

2. Разработаны алгоритмы и программы настройки регуляторов для предложенных контуров управления на основании численного моделирования с фиксированным шагом с учетом технологических ограничений и прямых показателей качества: П-регулятора для контура управления уровнем металла в промковше и регулятора с переменной структурой для контура управления уровнем металла в кристаллизаторе. 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

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 рациональный диапазон значений для данной системы.

3. Разработана модифицированная система автоматического управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ, обладающая частичной инвариантностью по каналу возмущающего воздействия (изменение скорости вытягивания заготовки) за счет применения статических компенсаторов с постоянным и переменным коэффициентом компенсации, обладающих простой структурой. Установлено, 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.

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАРАСТАНИЯ КАНАЛА ДОЗИРОВАНИЯ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В КРИСТАЛЛИЗАТОР МНЛЗ

4.1. Актуальность задачи

Для защиты струи жидкого металла от окисления при подаче стали из промковша в кристаллизатор МНЛЗ используются погружные стаканы (так называемая разливка «закрытой струей»). Особенностью работы с погружными стаканами является их «заращение» - отложение стали из-за недостаточно высокой температуры и неметаллических включений (алюминатов, алюмосиликатов кальция, глиноземистых и прочих химических соединений) на стенках стакана в процессе непрерывной разливки (Рисунок 4.1) [32, 58].

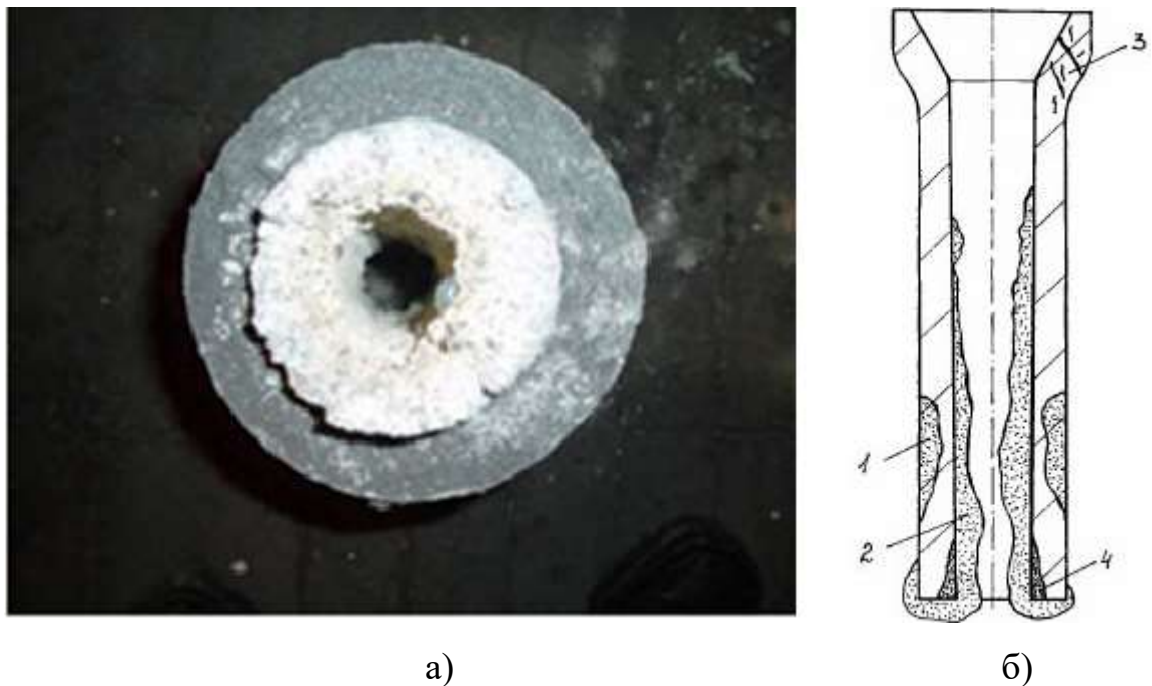


Рисунок 4.1 – Фотография заращения внутренней полости погружного стакана включениями глинозема (а) и схематическое представление характера износа погружного стакана в процессе разливки (б): 1 – эрозия в зоне шлакового пояса; 2 – заращение внутренней полости неметаллическими включениями; 3 – растрескивания в зоне контакта со стаканом-дозатором; 4 – эрозионный износ в зоне истечения струи.

Явление заращения может проявляться в различных формах, но в качестве источников проблемы может выступать одна или комбинация нескольких из следующих причин [59, 65, 107]:

- 1) отложение затвердевших включений, уже присутствующих в жидкой стали, поступающей в канал дозирования;
- 2) окисление вследствие попадания воздуха в стаканы через стыки;
- 3) реакции, протекающие между алюминием в стали и кислородом в огнеупорах.

При длительной разливке зарастание внутренней полости погружного стакана является значительной проблемой, поскольку в зависимости от материала стакана, состава разливаемой стали, уже через несколько часов после начала разливки возникает необходимость в замене стакана. То есть сам по себе эффект зарастания не является мгновенным явлением, а развивается с течением времени. Причем этот процесс имеет неравномерный, но при этом и циклический характер: медленное накопление отложений, за которым следует внезапный отрыв отложений, который может привести к внезапному повышению уровня металла в кристаллизаторе.

Последствия зарастания:

- 1) Снижение производительности. Чтобы компенсировать зарастание, устройство управления потоком (стопорный или шиберный затвор) должен быть открыт больше, чем это необходимо в начале процесса разливки. Если зарастание становится достаточно серьезным, устройство контроля потока будет неспособно его компенсировать, поскольку даже при предельном значении высоты подъема стопора не обеспечивается необходимый расход металла в кристаллизатор и становится невозможным обеспечивать заданную скорость разливки. Таким образом, необходимо либо снижать скорость литья, либо произвести замену погружного стакана. Эти события уменьшают время непрерывного литья и тем самым снижают производительность.

- 2) Увеличение стоимости. На современном этапе развития технологии МНЛЗ, в зависимости от литейного цеха, некоторые элементы канала дозирования жидкой стали могут быть замены во время процесса литья. Например, активно разрабатываются и применяются устройства быстрой замены погружных стаканов. Однако это предполагает использование специальных дорогостоящих огнеупорных изделий, что связано с необходимостью обеспечения высокой точности контакта между сменным стаканом-дозатором и базовым стаканом промковша по всей

плоскости скольжения. Но проблема зарастания неметаллическими и шлаковыми включениями касается также внутренней полости стаканов-дозаторов, устанавливаемых в днище промковша и обеспечивающих истечение стали и формирование компактной струи. Эти элементы могут быть заменены только при замене разливочных устройств. Таким образом, зарастание стаканов-дозаторов ограничивает срок службы промковша, приводит к дополнительным расходам на его ремонт. Все эти события увеличивают затраты на разливку.

3) Снижение качества. Неметаллические включения могут отрываться из отложений и приводить к недопустимым дефектам чистоты продукта. Ограничение потока через канал дозирования стали может также вызвать нежелательное искривление (несимметричность) потока металла, поступающего в кристаллизатор, которое, как следствие, создает дополнительные производственные проблемы и приводит к потере качества (например, затягивание шлака, истончение оболочки) [75]. Кроме того, переходные процессы уровня металла в кристаллизаторе, возникающие при замене промковша из-за зарастания разливочных устройств, может привести к снижению качества заготовки, например, трещинам в слябах [77, 80, 105].

Еще одной проблемой является противоположная предыдущей, а именно изменение проходной характеристики канала дозирования жидкого металла в сторону увеличения. Основные причины этих изменений следующие: локальное разрушение стакана-дозатора и головки стопора в зоне их контакта в результате виброударных нагрузок, обусловленных условиями истечения металла через отверстие стакана-дозатора, скалывание материала в месте контакта с погружным стаканом. Следствием данной проблемы является снижение качества управления уровнем металла в кристаллизаторе и в худшем случае (случае некрытия) - аварийная ситуация перелива металла через верхний край кристаллизатора.

4.2 Алгоритм оценки изменения пропускной способности канала дозирования жидкой стали в кристаллизатор в процессе разливки

Степень зарастания во время разливки можно определить на основании сравнения максимальной (теоретического) расхода стали при заданной высоте поднятия стопора и уменьшенного (фактического) расхода, обусловленного

заращением. Индекс заращения - это отношение разности теоретического и фактического расхода к теоретическому расходу жидкого металла [79, 101]

$$C.I._1 = \frac{Q_m^{ПК} - Q_\phi^{ПК}}{Q_m^{ПК}} = 1 - \frac{Q_\phi^{ПК}}{Q_m^{ПК}}, \quad (4.1)$$

где $Q_m^{ПК} = S (H_m^{cm}) \mu \sqrt{2gL^n}$ - теоретический расход металла из промковша;

$Q_\phi^{ПК} = Q^{kp} = V_{\text{выт}} S^{kp}$ - фактический расход металла из промковша.

Другой способ определения степени заращения - это отношение разности между теоретической и фактической высотой поднятия стопора промковша к теоретической высоте поднятия стопора [86, 96]:

$$C.I._2 = \frac{H_m^{cm} - H_\phi^{cm}}{H_\phi^{cm}} = 1 - \frac{H_m^{cm}}{H_\phi^{cm}}, \quad (4.2)$$

где H_m^{cm} - теоретическая высота поднятия стопора промковша;

H_ϕ^{cm} - фактическая высота поднятия стопора промковша.

Для идентификация реальной расходной характеристики стопорного затвора в процессе разлива на основе прямых измерений и математической модели массопереноса рассмотрим основные зависимости.

Из уравнение материального баланса в кристаллизаторе

$$dL^{kp} = \frac{1}{S^{kp}} (Q^n(t) - Q^{kp}(t)) dt \quad (4.3)$$

можно выразить теоретическое значение расхода металла из промковша

$$Q_{th}^n = S_{kp} \left(\frac{dL_{kp}}{dt} + V_{\text{выт}} \right). \quad (4.4)$$

Это же значение можно вычислить в соответствии с выражением:

$$Q_{th}^n(H^{cm}) = S_0^n(t) \mu \sqrt{2gL^n}. \quad (4.5)$$

Отсюда текущее значение проходного сечения канала дозирования жидкого металла, зависящее от высоты подъёма стопора, то есть $S_0^n(H^{cm}) = f(H^{cm})$, может быть вычислено следующим образом:

$$S_0^n(H^{cm}) = \frac{Q_{th}^n(t)}{\mu \sqrt{2gL^n}}, \quad (4.6)$$

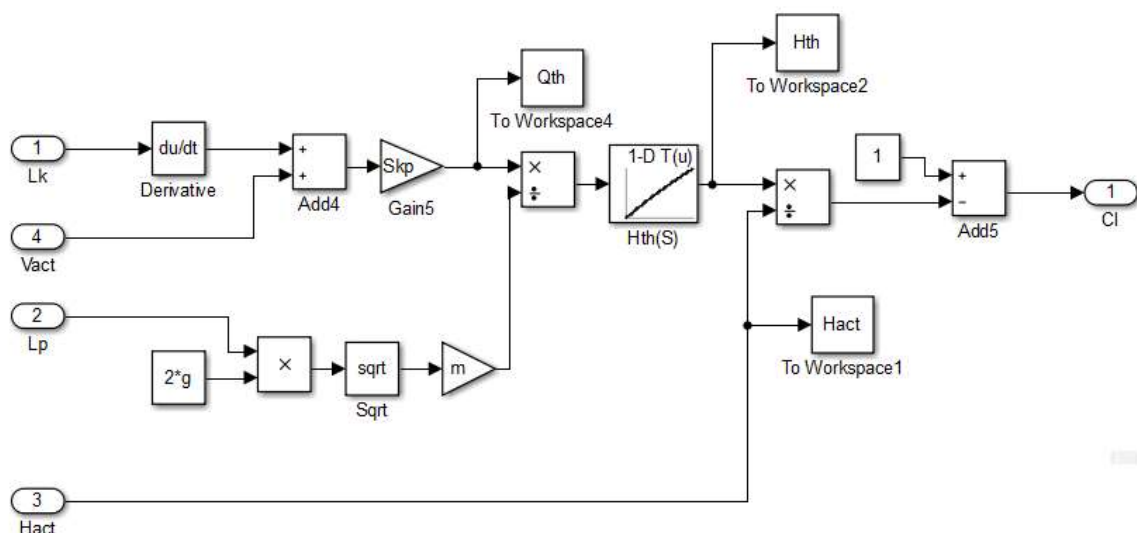
причем $S_{0\max}^n(H^{cm}) = \pi r_0^{n2}$.

Поскольку текущие значения H^{cm} , L^{kp} и $V_{выт}$ измеряются и, следовательно, известны (геометрические характеристики кристаллизатора также заданы для текущей разливки), то можно решить обратную задачу численными методами компьютерного моделирования: в соответствии с выражениями (4.3)-(4.6) определить $S_0^n(H^{cm})$. Затем, из полученной ранее эталонной расходной характеристики и зависимости $S_0^n(t) = f(H^{cm})$, найти теоретическое значение высоты поднятия стопора H_{th}^{cm} . После чего в соответствии с выражениями (4.1)-(4.2) может быть определено значение индекса зарастания CI .

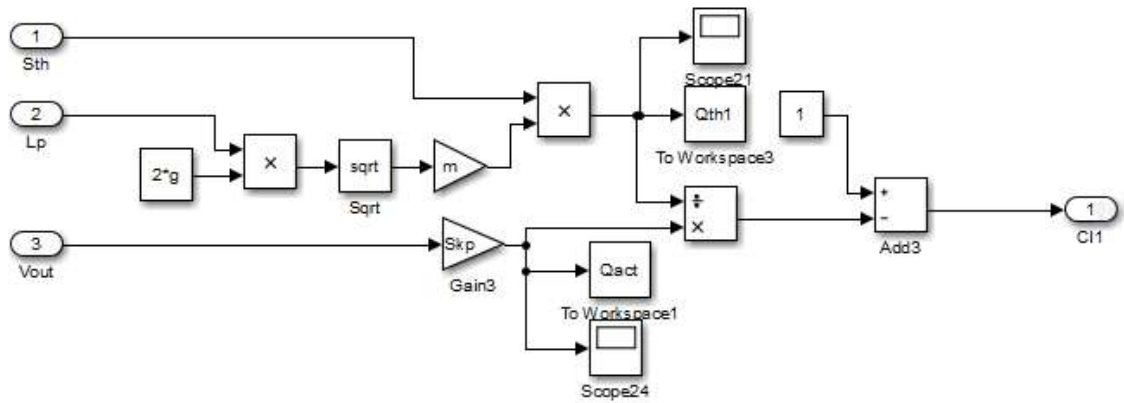
На рисунке 4.2 приведены структурные схемы решения задачи оценки теоретической высоты поднятия стопора и вычисления индекса зарастания в соответствии с выражениями (4.1)-(4.2).

С учетом описанных дополнений, структура системы управления уровнем металла в кристаллизаторе примет вид, представленный на рисунке 4.3.

Структурная схема моделирования комбинированной системы управления с учетом подсистем рисунка 4.2 приведена на рисунке 4.4.



a)



б)

Рисунок 4.2 – Структурные схемы решения задачи оценки теоретической высоты поднятия стопора и вычисления индекса зарастания: а) в соответствии с выражением (4.1); б) в соответствии с выражением (4.2)

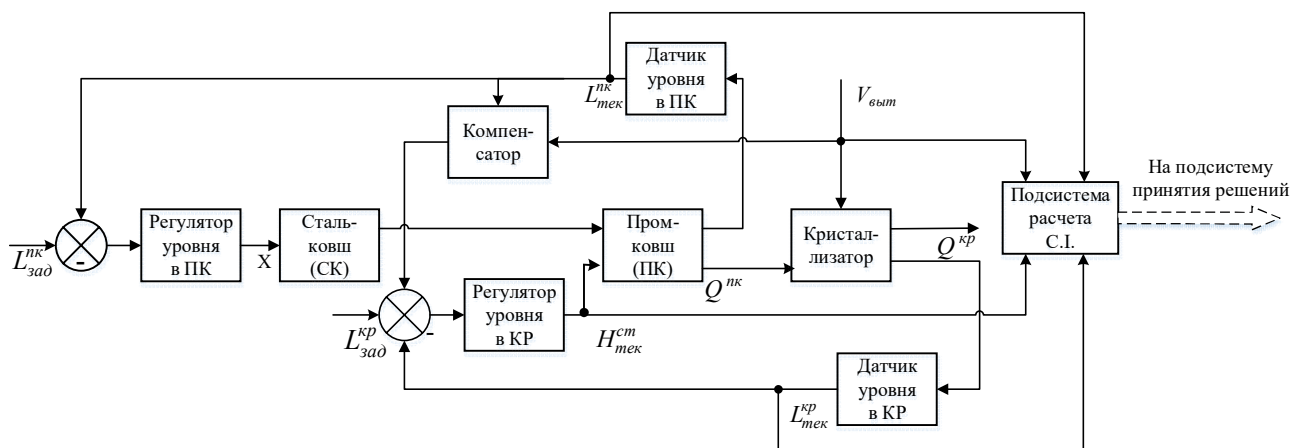


Рисунок 4.3. – Функциональная схема комбинированной системы управления уровнем металла в кристаллизаторе

На рисунках 4.5-4.6 представлены результаты моделирования, а именно теоретические и фактические зависимости $S_0^n(t) = f(H^{cm})$ и $Q^n(t) = f(H^{cm})$ в рабочей области. На начальном этапе работы, то есть при отсутствии эффекта зарастания, исследуемые зависимости полностью совпадают, что свидетельствует об адекватности полученных результатов.

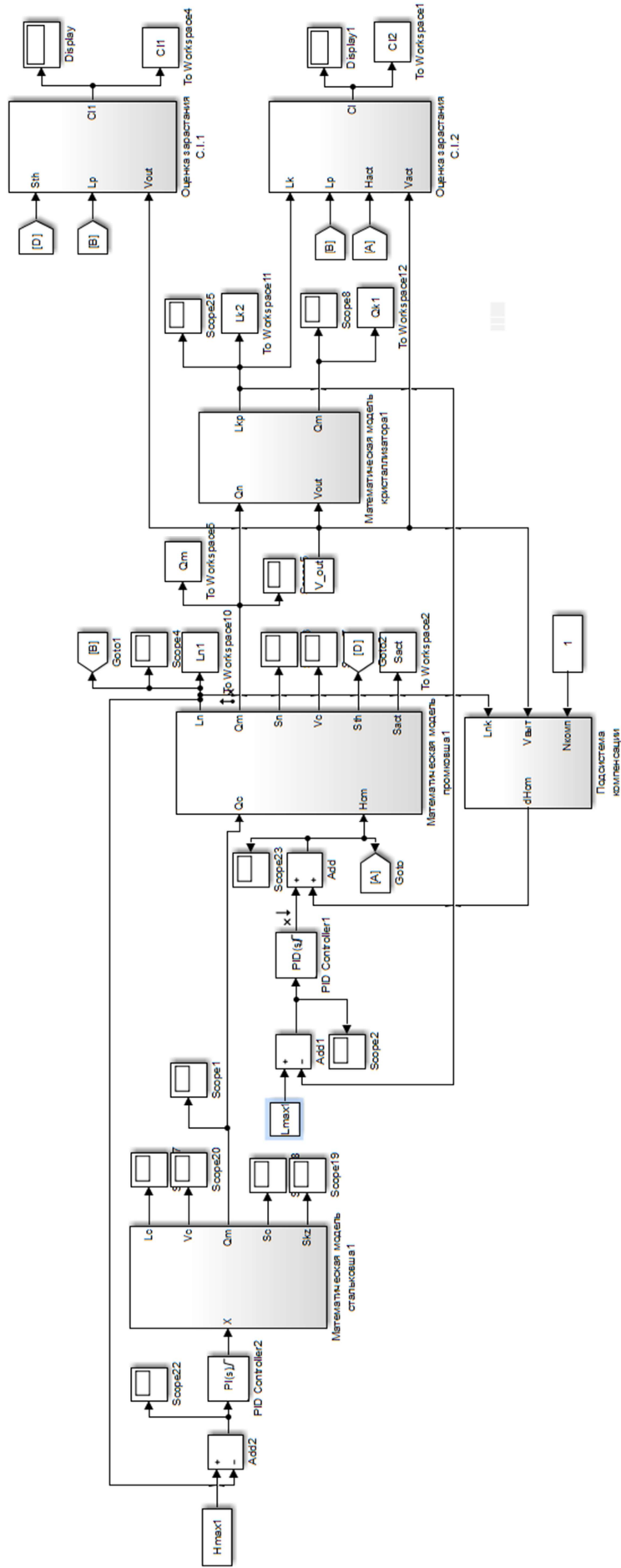


Рисунок 4.4- Структурная схема исследования процесса зарастания погружного стакана при дозировании жидкой стали из промковша в кристаллизатор МНЛЗ

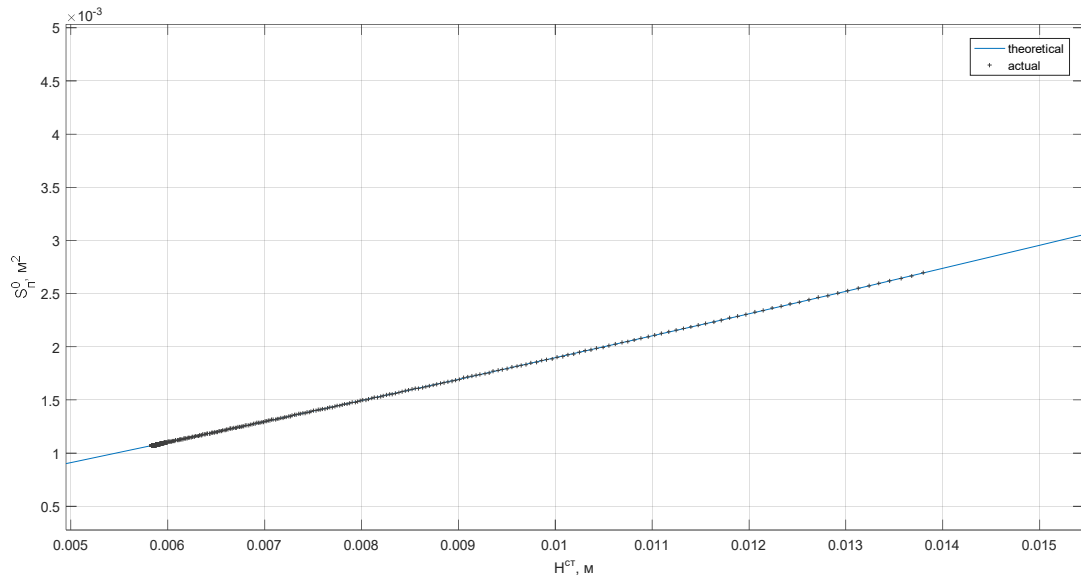


Рисунок 4.5 – Теоретическая и фактическая зависимости площади проходного сечения от высоты поднятия стопора $S_0^n(t) = f(H^{cm})$

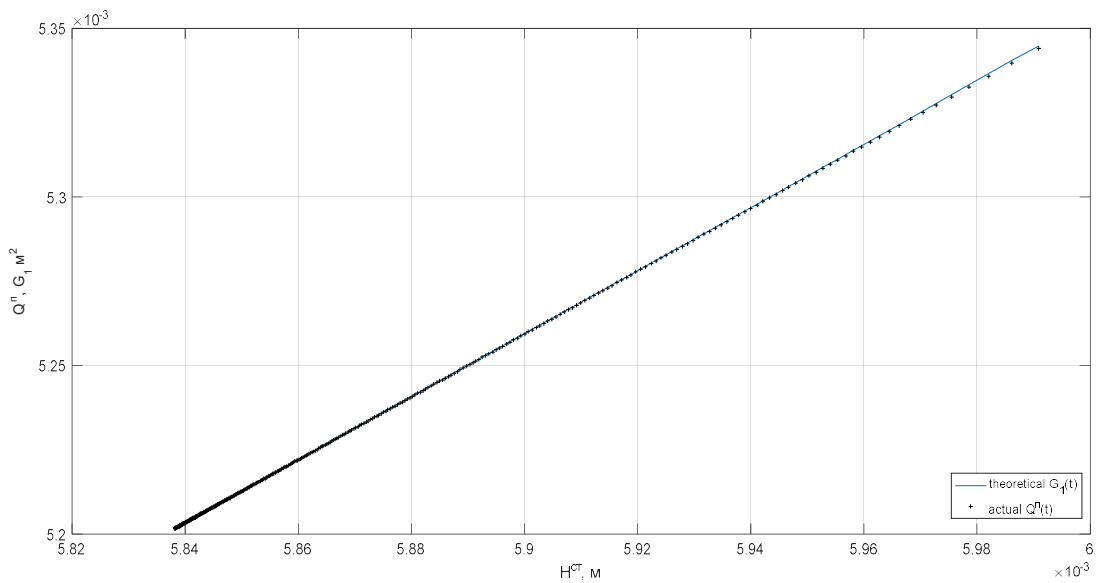


Рисунок 4.6 – Теоретическая и фактическая расходные характеристики стопорной системы в начале разливки

Результаты моделирования, имитирующего постепенное зарастание погружного стакана на 20%, начиная с момента времени 1000 секунд, представленное линейным уменьшением площади проходного сечения канала дозирования металла из промковша, приведено на рисунке 4.7.

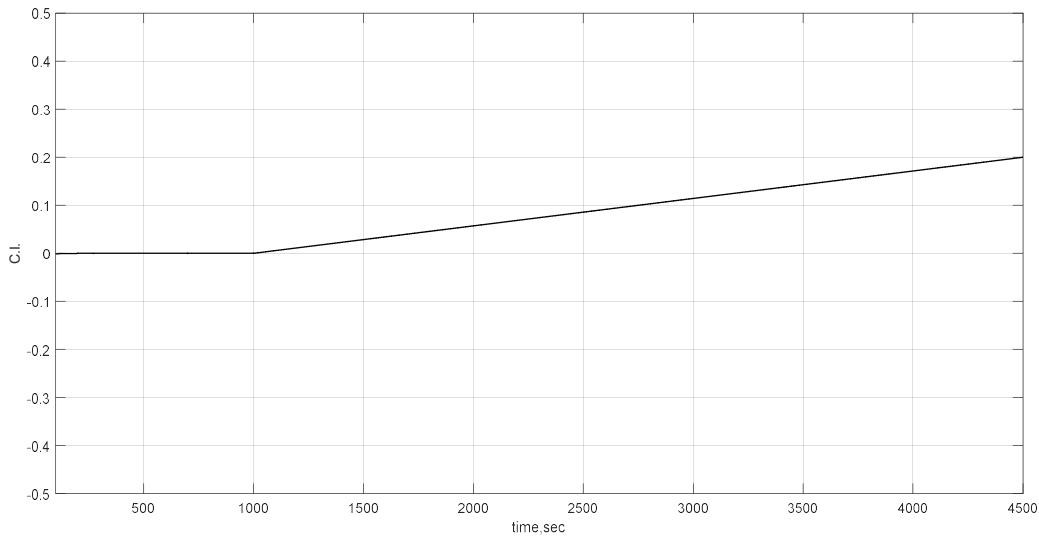


Рисунок 4.7 – График зависимости индекса зарастания при линейном уменьшении площади проходного сечения на 20% от исходного

Изменение расходной характеристики по сравнению с исходной приведено на рисунке 4.8.

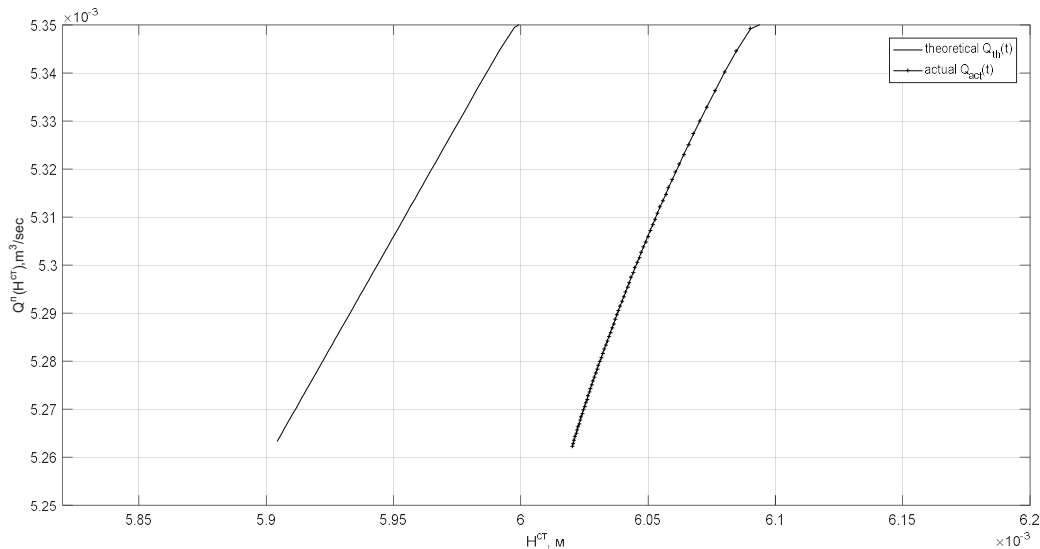


Рисунок 4.8 – Изменение расходной характеристики по сравнению с исходной в результате зарастания канала дозирования металла

В выражении (4.1) как теоретический расход металла из промковша Q_m^{IIK} , так и фактический расход металла и промковша $Q_\phi^{IIK} = Q^{kp}$ не могут быть измерены, оба эти параметра оцениваются на основе математической модели объекта. В выражении (4.2) фактическое линейное перемещение стопора может быть измерено. Имея

данные измерений, ожидаемым результатом был тот, что расчет по этой формуле будет более точно соответствовать реальному изменению пропускной способности погружного стакана. Однако моделирование показало, что значение $C.I._2$, вычисленное по формуле (4.2), дает несколько меньшее значение (с недостатком 1-2% при моделировании 20% зарастания), в то время как $C.I._1$ в точности соответствовало тому, которое было заложено при моделировании. Кроме того, было проведено исследование влияния значения уровня металла в промковше $L^{ПК}$ и скорости вытягивания $V_{выт}$ на значение индекса зарастания. Результаты моделирования показали, что на значение $C.I._1$, вычисленное вычисленного по формуле (4.1) эти параметры не оказали заметного влияния. А значение $C.I._2$ оказалось подвержено влиянию обоих параметров. Кроме того, оценка значения с недостатком, которым обладает формула (2), ухудшается при увеличении индекса зарастания. Результаты исследования представлены семейством кривых на рисунке 4.9.

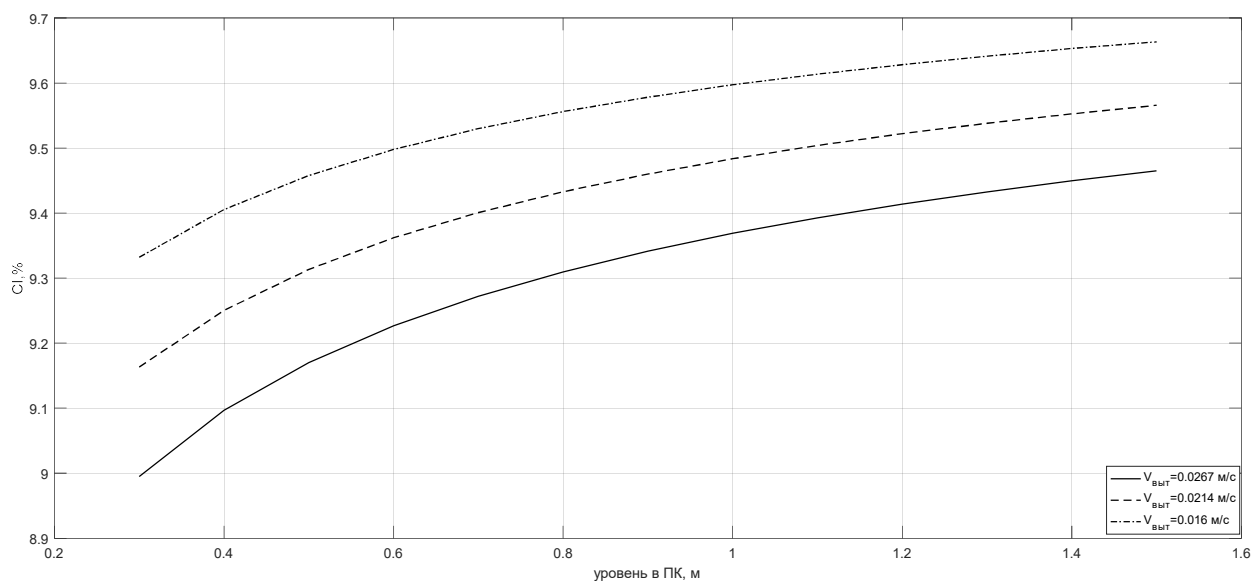


Рисунок 4.9 – Результаты исследования влияния скорости вытягивания и уровня металла в промковше на оцениваемое значение индекса зарастания при 10%

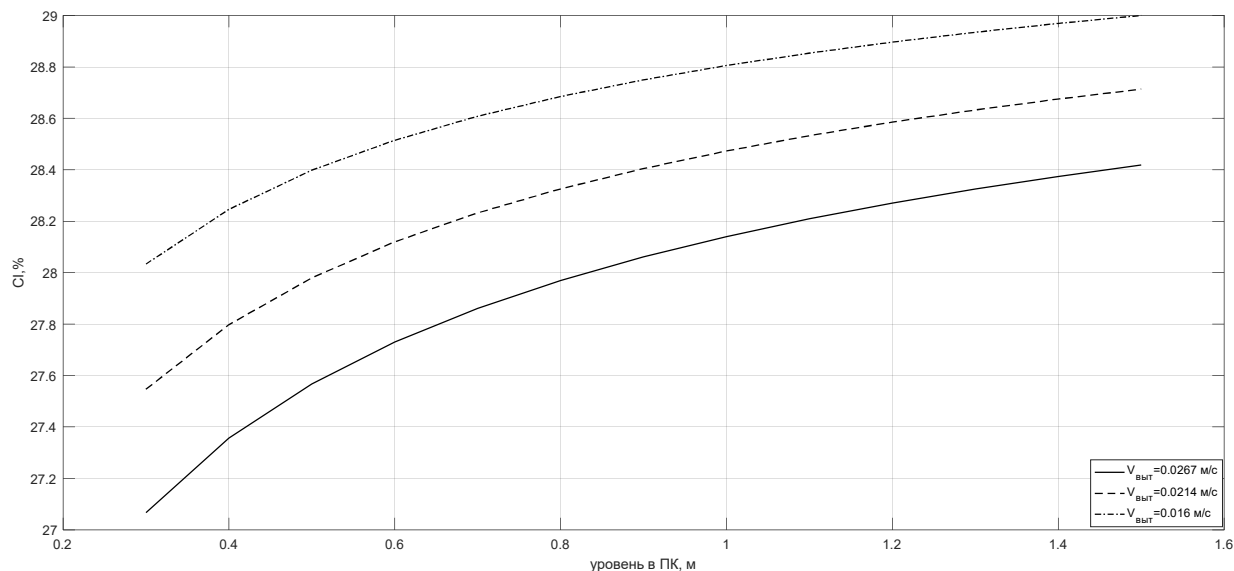


Рисунок 4.10 – Результаты исследования влияния скорости вытягивания и уровня металла в промковше на оцениваемое значение индекса зарастания при 30%

На основе анализа результатов моделирования, представленных на рисунках 4.9-4.10, можно сделать вывод, что оценка зарастания на основе только высоты поднятия стопора может давать ошибочные значения при малых количествах металла в промковше и высокой скорости разливки. Таким образом, соотношение между использованием формул (4.1) и (4.2) должно определяться режимом разливки. В стационарном режиме разливки в среднем диапазоне скорости вытягивания во избежание влияния параметрической неопределенности объекта, которая может оказать отрицательное влияние при использовании исключительно теоретических данных может быть использовано среднее арифметическое (или средневзвешенное значение) формул (4.1)-(4.2). На этапе скоростной разливки или замены стальной ковша, когда уровень металла в промковше снижается в соответствии с технологическим регламентом, целесообразно будет ограничиться исключительно формулой (4.1).

С целью повышения качества управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ, необходимо разработать алгоритм оценки текущего состояния канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ для передачи актуальной информации на верхний уровень системы управления, который позволит на основе индекса несоответствия исходной и текущей расходной характеристики канала дозирования жидкой стали принимать решение о внесении изменений в дальнейший процесс разливки

Предлагаемый алгоритм включает в себя следующие этапы [16-17]:

1) В начале работы МНЛЗ снимается исходная («эталонная») расходная характеристика стопорной системы $Q^n(H^{cm})$ и сохраняется в базе данных.

2) Через некоторые промежутки времени на основе данных измерений с датчиков скорости вытягивания $V_{выт}$, уровня металла в кристаллизаторе L^{kp} и линейного перемещения стопора H^{cm} , а также на основе математической модели объекта производится вычисление текущего теоретического значения расхода металла из проковша (4.5) и теоретического значения высоты поднятия стопора (4.6). Таким образом, вычисляется текущая расходная характеристика в рабочей области.

3) Выполняется вычисление индекса зарастания (англ. Clogging index – C.I.) в соответствии с выражениями (4.1) - (4.2).

Вычисление значения *C.I.* производится в режиме реального времени в процессе функционирования объекта управления.

4) На основе текущего значения скорости вытягивания и уровня металла в проковше принимается решение об использовании подходящего значения *C.I.*: *C.I.*₁, *C.I.*₂ или их комбинации.

5) На основе принятого значения *C.I.* производится оценка ситуации:

а) Если снижение пропускной способности канала дозирования жидкого металла не превысило заданную границу, обусловленную технологией разливки определенной марки стали – возможно снижение скорости литья с целью обеспечения необходимого качества регулирования.

б) При превышении параметра *C.I.* заданного порога принимается решение о замене погружного стакана. При этом может быть задействована система быстрой замены погружного стакана.

в) При отсутствии возможности замены погружного стакана, либо если в результате замены процесс разливки не удалось вывести на номинальный режим – требуется замена стакана-дозатора, а следовательно проковша, и разливку необходимо вывести на режим замены соответствующего оборудования.

Схематически данный алгоритм представлен на рисунке 4.11.

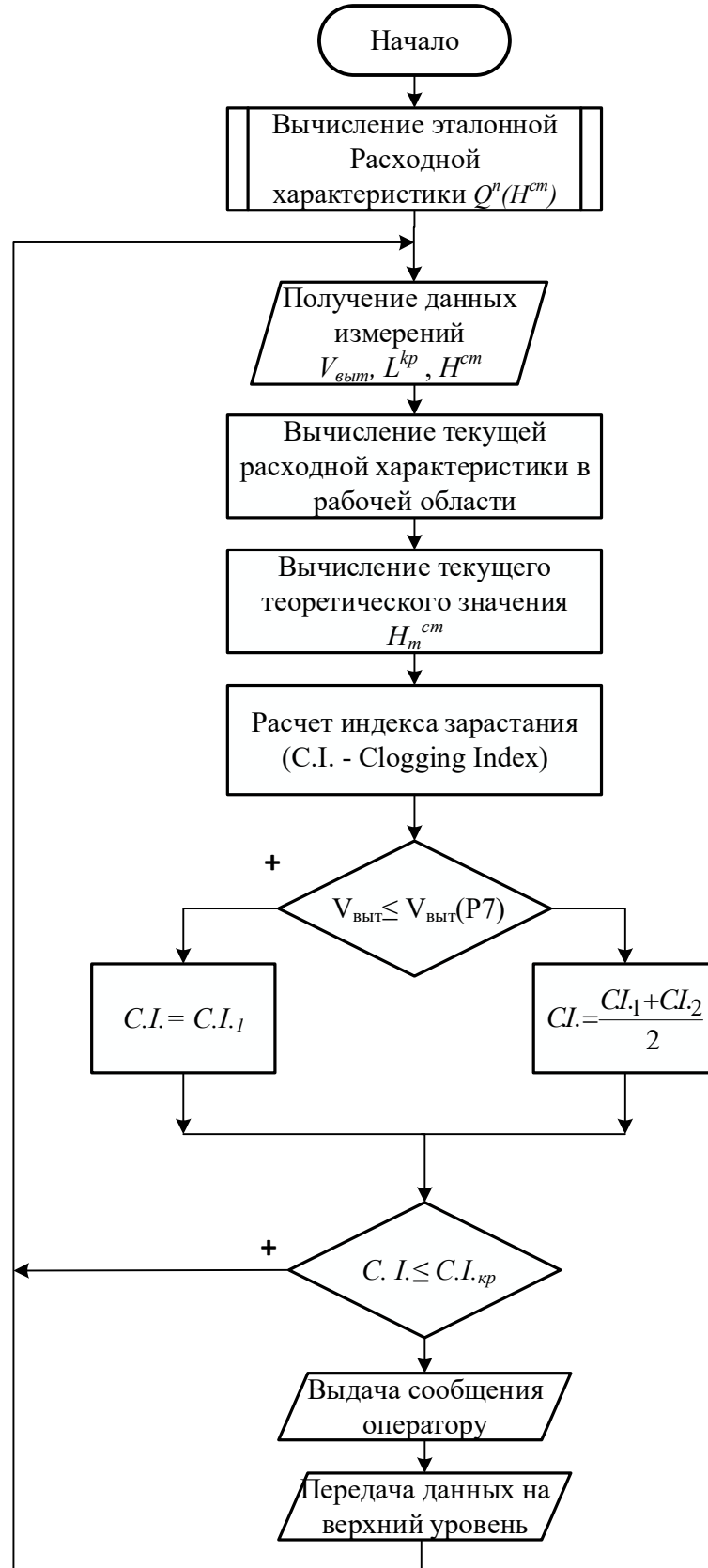


Рисунок 4.11 - Алгоритм работы подсистемы оценки изменения пропускной способности канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор

4.3 Выводы по разделу 4

1. Разработана математическая модель, которая способна в реальном времени обеспечить оценку зарастания канала дозирования жидкого металла в процессе литья на основании математической модели массопереноса стали с использованием данных измерений. Этот показатель служит достаточно надежным инструментом для планирования замены элементов канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ, замены промковша, продувки аргоном.

2. 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 разработана модификация метода оценки степени зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор МНЛЗ в процессе разливки.

3. Установлено, что для получения более точной оценки степени зарастания канала дозирования жидкого металла значения в процессе литья заготовок целесообразно совместное использование двух методов: на основе математической модели и прямых измерений, что позволит разработать способ оптимального использования металлургического оборудования.

РАЗДЕЛ 5

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
МОДИФИЦИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УРОВНЯ МЕТАЛЛА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ
ЛИТЬЯ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ ПРОМЫШЛЕННОЙ
АВТОМАТИЗАЦИИ

5.1 Функциональная схема технических средств системы автоматического управления

Принцип работы системы следующий: при включении системы автоматического управления задаются номинальные уровни в промковше и кристаллизаторе МНЛЗ. Данные сигналы поступают на программируемый логический контроллер (ПЛК). В целях повышения отказоустойчивости и готовности системы управления, предложена структура построения системы на базе отказоустойчивой системы автоматизации с высокой степенью децентрализации SIMATIC S7-300.

В системе производится опрос всех датчиков в системе и вырабатываются управляющие сигналы. Регулирование положения стопорного затвора осуществляется в связи с изменением уровня в кристаллизаторе, с приходом сигнала изменения скорости вытягивания заготовки, поскольку за счет стопорного затвора регулируется количество подаваемого в кристаллизатор металла. Поскольку стопор жестко связан с гидроцилиндром, то состояние стопора повторяет положения штока гидроцилиндра.

После выхода на установившийся режим регистрируется эталонная расходная характеристика канала дозирования жидкого металла в кристаллизатор для дальнейшего использования подсистемой оценки индекса зарастания. В процессе работы МНЛЗ и системы управления выполняется расчет текущей расходной характеристики и индекса зарастания на основе математической модели и данных, полученных с датчиков веса промковша WE, уровня в кристаллизаторе LE и перемещения стопора GE.

Функциональная схема разрабатывается с учетом состава и структуры функциональных узлов системы управления. Функциональная схема регулирования уровня в кристаллизаторе приведена на рисунке 5.1.

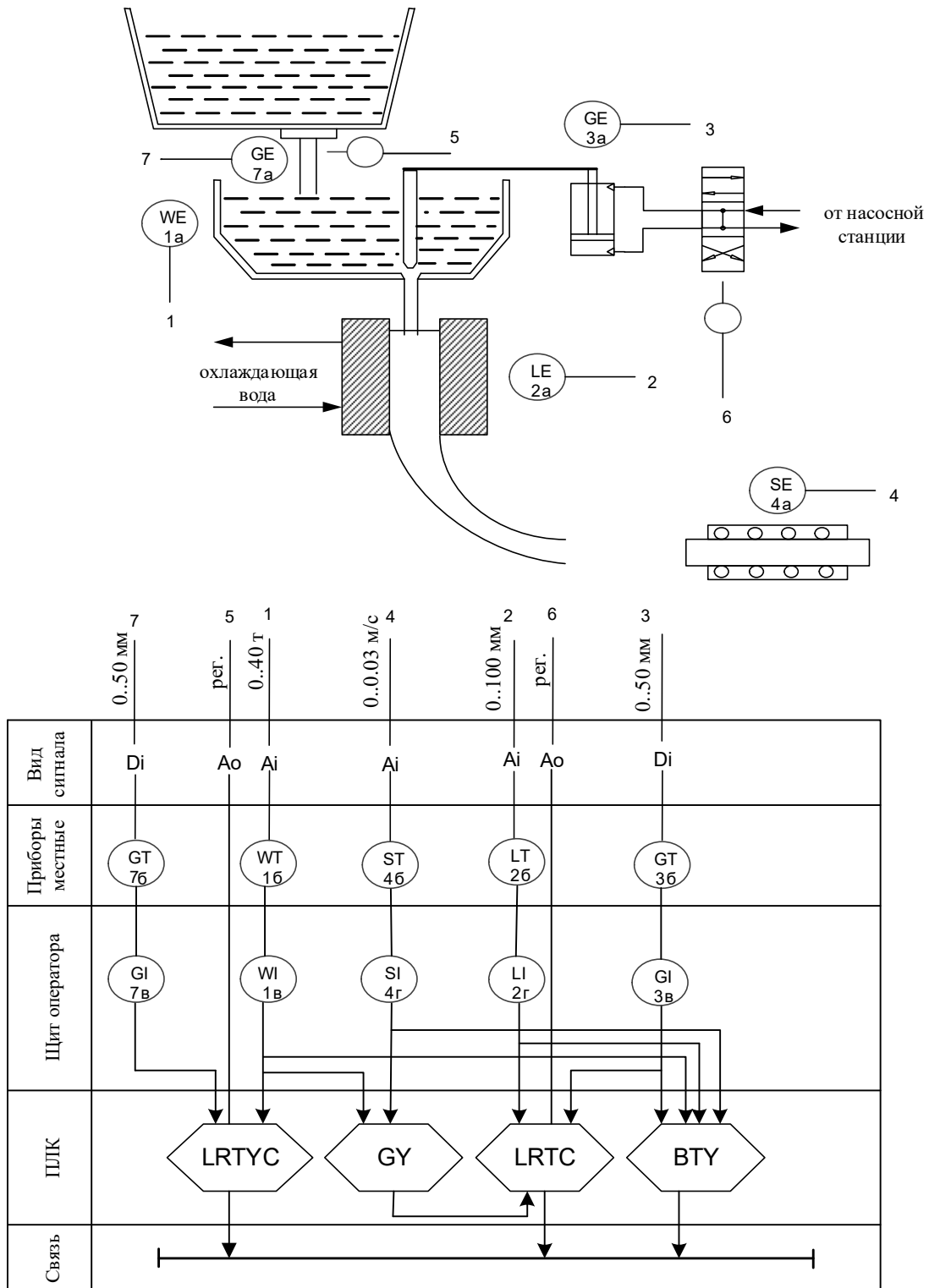


Рисунок 5.1 – Функциональная схема автоматизации

5.2 Выбор и разработка технических средств системы автоматического управления

5.2.1 Выбор исполнительных механизмов и датчиков

Выбирая исполнительные механизмы, необходимо учитывать, что они должны удовлетворять рабочим параметрам системы управления.

Выбор гидроцилиндров.

Требования, предъявляемые к гидроцилиндрам:

- рабочее давление 10 МПа;
- рабочий ход штока не менее 30 мм;
- скорость перемещения не менее 10 мм/с.

Этим требованиям соответствуют гидроцилиндры ENERPAC высокой точности двухстороннего действия, серии BRD. Технические характеристики данного гидроцилиндра:

- диаметр цилиндра 400 мм;
- диаметр штока 300 мм;
- ход штока 200 мм;
- максимальное рабочее давление 10 МПа;
- скорость перемещения штока 15 мм / с.

Выбор сервоклапана.

Выбран сервоклапан типа MOOG D633. Клапан серии D633 - это сервоклапаны с непосредственным управлением золотником и с электрическим обратной связью по положению. Управление золотником осуществляется с помощью жестко связанного с ним якоря линейного двигателя, перемещает золотник в обоих направлениях из положения гидравлического нуля (нейтрального положения). При отсутствии сигнала управления золотник удерживается в нейтральном положении плоской пружиной; таким образом, клапаны данной серии имеют существенное преимущество по сравнению с соленоидными клапанами. Электроника, обеспечивающая замыкание контура обратной связи по положению золотника и экономичное управления линейным двигателем за счет применения широтно-импульсной модуляции, представляет собой компактный блок, который является частью клапана. При

использовании сигнала управления одного из описанных ниже типов нет необходимости в каком-либо дополнительном интерфейсе.

Технические условия гидравлических данных:

- пропускная способность: от 5 до 100 л / мин;
- максимальный расход 180 л / мин;
- максимальное рабочее давление 350 бар;
- монтаж Pattern: ISO 4401 размер 03 и 05 (NG 6 и 10);

Электрические характеристики:

- напряжение питания: 24 В постоянного тока (18 до 32 В постоянного тока);
- энергопотребление: 10 ВА max;
- номинальные параметры сигнала: 4-20 мА.

Отличительные особенности клапана:

- возможность применения в режиме с 3-мя и 4-мя рабочими портами, а также в режиме 2x2 (удвоенный расход) в системах управления, контролирующими положение, скорость или усилия на нагрузке, а также расход рабочей жидкости;
- соединительные размеры в соответствии со стандартами DIN 24340, Cetop3 и Cetop5;
- большое усилие, развиваемое линейным двигателем с постоянными магнитами;
- отсутствие первого гидравлического каскада управления, и, соответственно, минимальная непродуктивный расход;
- при прекращении электропитания, например, при обрыве кабеля или в случае аварийного отключения плоская пружина возвращает золотник клапана в безопасное нейтральное положение, при этом исполнительные органы системы блокируются;
- независимость динамических характеристик клапана от давления подачи;
- степень защиты IP65 (по стандарту DIN 40050);
- незначительный гистерезис и высокая чувствительность;
- защита от неправильного подключения и от сигнала управления, превышает допустимое значение;
- электрическая регулировка нуля для корректировки положения нагрузки;
- сигнал о фактическом состоянии золотника имеет низкий уровень шумов.

Схема подключения сервоклапана приведена на рисунке 5.2.

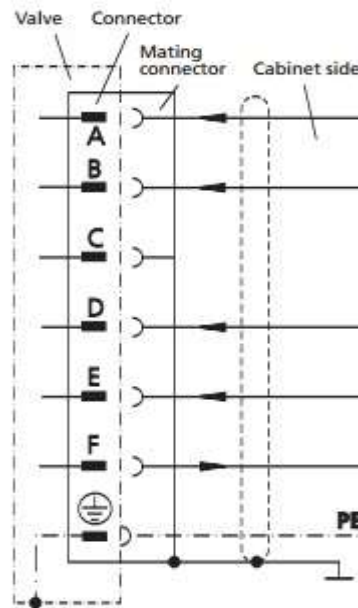


Рисунок 5.2 – Схема подключения сервоклапана MOOG D633

Описание подключения клапана по схеме 4-20mA.

- A - питание 24 VDC;
- B - питание 0 V;
- C - не используется;
- D - вход - 4-20mA нагрузочное сопротивление 200 Ом;
- E - не используется;
- F - выход 4-20mA.

Принцип работы клапана следующий. Сигнал управления подается на один из входов электронного усилителя, который контролирует работу линейного двигателя. Датчик положения вырабатывает сигнал (переменное напряжение), соответствующий реальному положению золотника. Этот сигнал преобразуется фазочувствительным выпрямителем и в качестве сигнала обратной связи подается в электронный усилитель, где он сравнивается с сигналом управления. До тех пор, пока сигнал обратной связи не будет равен сигналу управления, т.е. золотник не займет требуемое положение, электронный усилитель будет формировать сигнал управления линейным двигателем, пропорциональный интегралу их разности. Таким образом, положение золотника прямо пропорционально электрическому сигналу управления.

Выбор датчика положения стопора.

При выборе датчика необходимо руководствоваться следующими критериями (в порядке значимости):

- диапазон и точность;
- линейность характеристики;
- скорость измерения;
- условия эксплуатации и класс защиты;
- надежность;
- габаритные размеры;
- стоимость.

Основные параметры для выбора датчика положения стопора следующие. Рабочего хода стопора не превышает диапазон 0 - 200мм. Требуемая точность 0,1%. Этим параметрам соответствует кодовый датчик положения BALUFF BTL Micropulse:

Выдерживает давление до 600 бар, высокая воспроизводимость, бесконтактный принцип работы, прочный корпус. Измеритель линейного перемещения BTL Micropulse представляет собой измерительную систему в прочном корпусе с диапазоном измерения от 5 до 5500 мм, пригодную для эксплуатации в неблагоприятных условиях. Волновод расположен внутри трубки из нержавеющей стали, способной выдерживать высокое давление. Система идеально подходит для осуществления таких процессов, как определение положения в гидравлических цилиндрах, а также для контроля уровня в условиях агрессивной среды в пищевой и химической промышленности. Основные технические характеристики BTL Micropulse:

- диапазон измерения до 3000мм;
- основная погрешность не превышает 0.05% от измеряемой длины;
- информационный выход RS422;
- исходный код (программируемый) двоичный, двоично-десятичный;
- рабочее напряжение 19 ... 27 В постоянного тока;
- рабочая температура 0-70 ° C (по спецзаказу -20 +70 ° C);
- класс защиты IP 65 (DIN 40050);

- энергопотребление: 15 ВА max.

Схема подключения датчика представлена на рисунке 5.3.

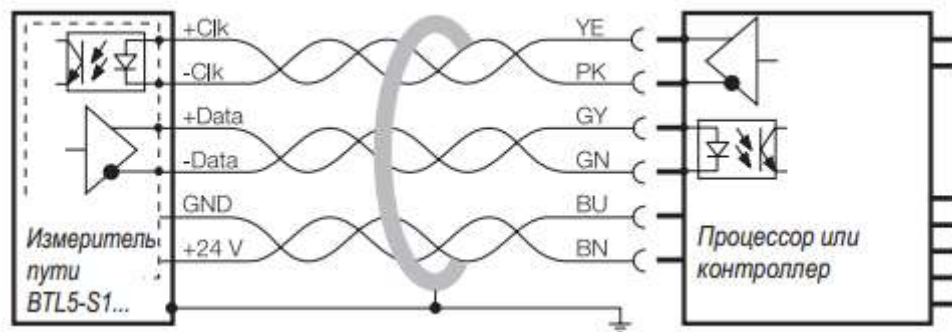


Рисунок 5.3 – Схема подключения датчика перемещения BTL Micropulse

Выбор датчика уровня металла.

Уровень металла в кристаллизаторе находится в пределах 0 - 100%. Требуемая точность 0.5%. Для измерения уровня металла может быть использован уровнемер Berthold LB452.

Измеритель уровня расплава LB452 является современной измерительной системой, использующей в качестве детектора излучения сцинтилляционный счетчик. Вместе с источником, специально разработанным для конкретной измерительной задачи, система бесконтактно и с высокой точностью отслеживает уровень расплава через стенки кристаллизатора. Детектор превращает получаемое излучение в электрические импульсы. Скорость счета импульсов на выходе детектора пропорциональна интенсивности излучения, приходящего на детектор. Как следствие этого, несмотря на относительно невысокую мощность источника, достигается высокая скорость счета, обеспечивает значимые результаты при неограниченном рабочем ресурсе.

Система LB452 обеспечивает подачу рабочего и оперативного напряжения для сцинтилляционного детектора. Для гарантированного устранения помех, стандартные импульсы, генерируемые детектором, передаются на вход микропроцессора через оптронно-электронный блок.

Технические характеристики процессора LB452:

- пределы скорости счета 0-99999 имп / сек;
- основная погрешность + / - 0.1% от пределов измерения;

- выходной сигнал 4 ... 20 мА постоянного тока;
- напряжение питания 12 ... 36 В постоянного тока;
- энергопотребление: 15 ВА max;
- долговременная стабильность $<+ / - 1\%$ от интенсивности излучения;
- рабочая температура окружающей среды до 50°C ;
- класс защиты IP 20.

Технические характеристики детектора:

- температура окружающей среды $-20 \dots + 50^{\circ}\text{C}$;
- водяное охлаждение - коннектор R $\frac{1}{4}$, максимальное давление 6 бар;
- класс защиты IP 65.

Схема подключения процессора Verhold приведена на рисунке 5.4.

Исходя из того, что рассматриваемая измерительная система работает с необходимой точностью, имеет достаточно высокую скорость счета импульсов, и подходит к работе в сложных условиях, она может быть использована в разрабатываемой системе.

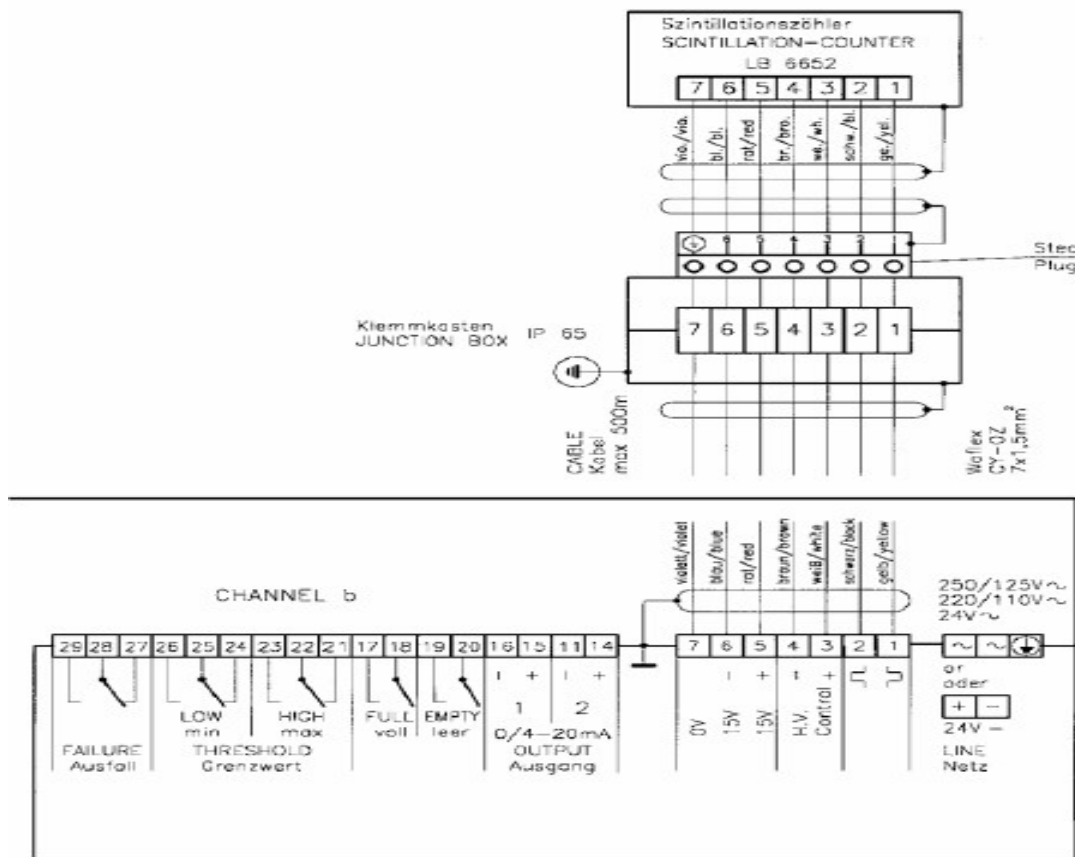


Рисунок 5.4 - Схема подключения измерительной системы Verhold 452

Выбор датчика измерения скорости движения непрерывно-литой заготовки.

Применение современных контактных датчиков для определения скорости движения слитка приводит к появлению ошибок в виде бросков при проскальзывании. Для исключения влияния подобных возмущений на систему управления уровнем металла предлагается использовать оптический измеритель, основанный на регистрации изображения движущегося объекта. Схематично измеритель представляет собой оптическую камеру, в состав которой входят объектив, линейный матричный фотоприемник, блок электроники и встраивается промышленный компьютер.

С помощью объектива на линейном матричном фотоприемнике формируется изображение участка поверхности объекта. Это изображение преобразуется в сигнал, который считывается, оцифровывается и сохраняется в памяти встроенного компьютера. Сущность используемого для регистрации перемещения объекта метода заключается в следующем. Оптическая камера производит непрерывную и покадровую регистрацию участка поверхности объекта, который находится в поле зрения камеры. Каждый зарегистрированный и сохраненный в памяти компьютера кадр представляет собой массив, размер которого соответствует количеству пикселей линейной матрицы фотоприемников. Значение элемента массива соответствует амплитуде фотосигнала в соответствующем пикселе. Для определения перемещения объекта необходимо сравнить два кадра, полученных оптической камерой через некоторый интервал времени. В случае, когда объект неподвижен, отличие между двумя кадрами минимально. При перемещении объекта характерные участки текущего изображения будут смещены относительно предыдущего изображения. Сравнивая их, можно выявить и рассчитать перемещения изображения объекта на фотолинейке. Данный принцип работы использован в промышленном оптическом измерителе «РАСТР» изображен на рисунке 5.5.

Оптические измерители является безынерционными и позволяют регистрировать быстрые изменения скорости. При этом оптические измерители не будут реагировать на проскальзывание валков и и тем самым вносить погрешность в измерение скорости.

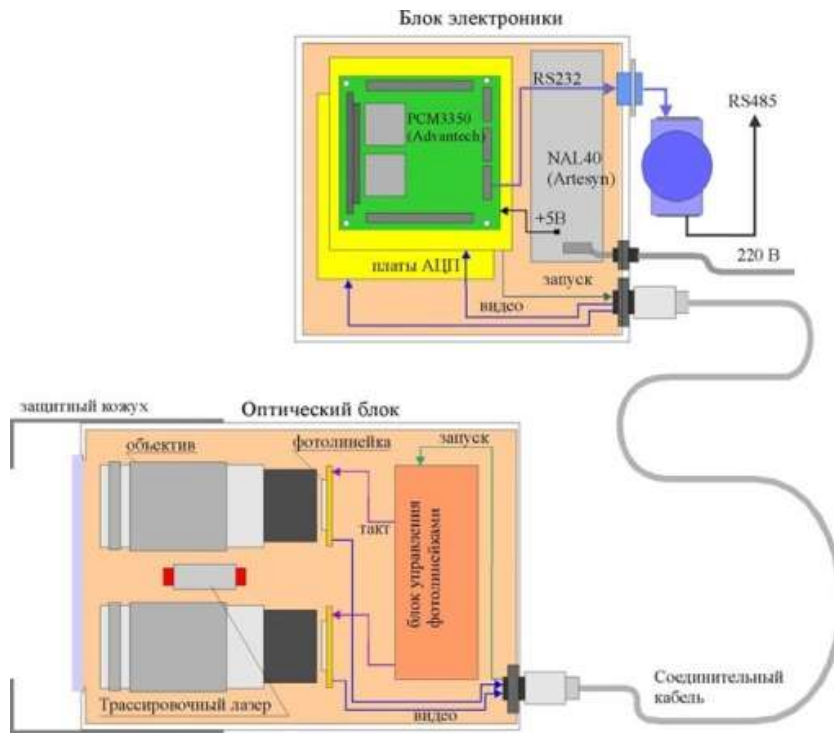


Рисунок 5.5 – Схема оптического измерителя «РАСТР»

Выбор датчика веса промежуточного ковша.

Измерение веса промковша является необходимым для определения уровня и обеспечения нормального хода разливки. Внедрение системы взвешивания ковшей повышает надежность и эффективность производственного процесса.

Датчик веса Schenck Process, который может быть использован в любых системах взвешивания, в опасных (возможно даже взрывоопасных) зонах, применяется при высоких требованиях к классу защиты до IP68. Весовая система Schenck Process MULTILADLE устанавливается под промежуточным ковшом, идеально подходит для работы в тяжелых условиях (Рисунок 5.6).

Технические характеристики:

- номинальная нагрузка 40 т;
- предельная нагрузка: 100 т;
- разрушающая нагрузка: 160 т;
- суммарная погрешность: $\pm 0,1\%$;
- рекомендуемое напряжение питания: 24 В;
- эксплуатационный диапазон температур: от -15°C до $+150^{\circ}\text{C}$;
- собственная масса: 39 кг;

- класс защиты: IP 65.

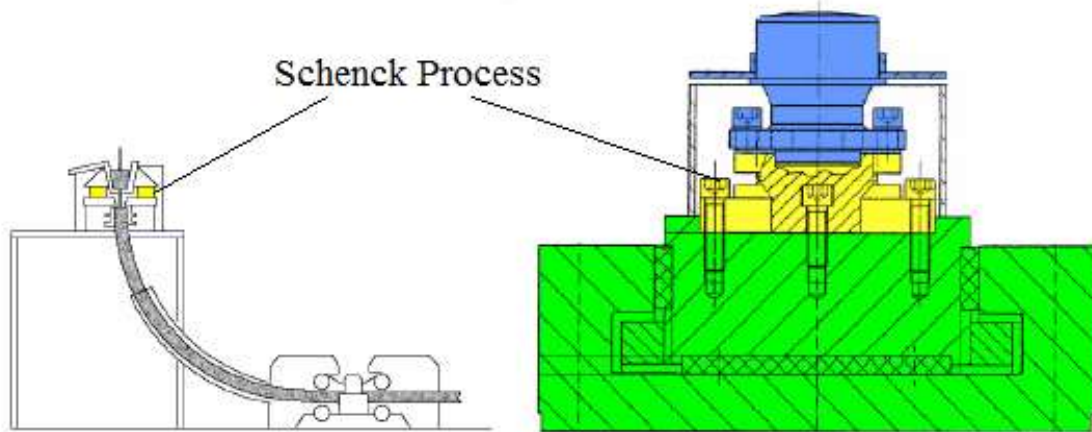


Рисунок 5.6 – Датчик для взвешивания проковша Schenck Process

Выбор датчика давления.

В качестве датчиков давления могут быть использованы датчики РС-28, разработанные фирмой ALISENS.

Схема подключения датчика представлена на рисунке 5.7.

Технические характеристики:

- пределы измерений: от -0,1 до 100 МПа;
- минимальная ширина диапазона 1,6 кПа;
- выходной сигнал: (4 ÷ 20) мА или (0 ÷ 10) В;
- напряжение питания 15 ÷ 30 В;
- энергопотребление: 14 ВА max;
- искробезопасное исполнение 0ExiaIICT6 X.

Данный датчик обладает достаточно простой конструкцией и имеет относительно низкую цену.

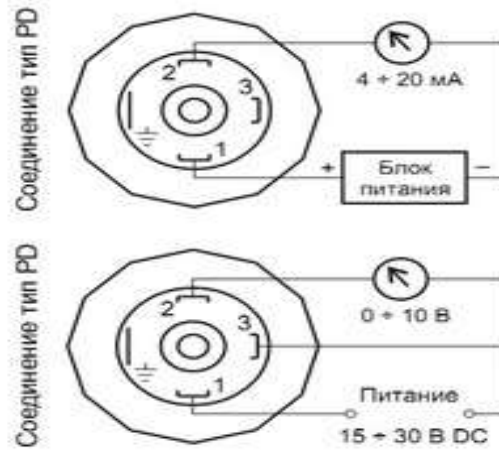


Рисунок 5.7 – Схемы электрических соединений датчика давления РС-28

5.2.2 Выбор программируемого логического контроллера

Учитывая общую сложность системы (количество датчиков, исполнительных механизмов и аппаратуры для управления системой и обработки информации), может быть применен модульный программно-логический контроллер фирмы Siemens модели S7-300 с CPU 315-2DP. Контроллер SIMATIC S7-300, включает в себя центральный процессор CPU 315-2DP, встроенный интерфейс MPI, встроенный интерфейс ведущего / ведомого устройства PROFIBUS-DP, рабочую память объемом 1218 Кбайт, работает без буферной батареи.

Контроллеры SIMATIC S7-300 имеют модульную конструкцию и могут включать в свой состав:

- модуль центрального процессора (CPU). В зависимости от степени сложности решаемой задачи в контроллерах могут быть использованы различные типы центральных процессоров, отличающихся производительностью, объемом памяти, наличием или отсутствием встроенных входов-выходов и специальных функций, количеством и видом встроенных коммуникационных интерфейсов и так далее. В данном проекте, учитывая общую сложность системы управления используется CPU 315-2DP;

- сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода-вывода дискретных и аналоговых сигналов с различными электрическими и временными параметрами;

- коммуникационные процессоры (CP) для подключения к сетям PROFIBUS, Industrial Ethernet;

- интерфейсные модули (IM), которые обеспечивают возможность подключения к базовому блоку (стойка с CPU) 3 стоек расширения ввода-вывода.

Контроллеры SIMATIC S7-300 имеют в своем составе до 32 сигнальных и функциональных модулей, а также коммуникационные процессоры.

Технические данные контроллеров SIMATIC S7-300:

- степень защиты IP 20 согласно IEC 529;
- диапазон рабочих температур: при горизонтальной установке 0...60°C при вертикальной установке 0...40°C;
- диапазон температур хранения и транспортировки -40 ... + 70°C;
- относительная влажность 5...95%, без конденсата (RH уровень сложности 2 в соответствии с IEC 1131-2);
- атмосферное давление 795...1080 ГПа;
- изоляция цепи = 24 В;
- испытательное напряжение 500В цепи ~ 230В;
- испытательное напряжение ~ 1460В;
- электромагнитная совместимость регламентируется German EMC Legislation;
- устойчивость к шумам по EN 50082-2, испытания по IEC 801-2, ENV 50140, IEC 801-4, ENV 50141, IEC 801-5;
- наводки по EN 50081-2, испытания по EN 55011, класс А, группа 1.

Механические воздействия:

- вибрация IEC 68, часть 2-6: 10 ... 58Гц / постоянная амплитуда 0.075мм; 58 ... 150Гц / постоянное ускорение 1g. Длительность вибраций: 10 циклов по каждой из взаимно перпендикулярных осей;
- ударные нагрузки IEC 68, часть 2-27: полусинусоидальные ударные воздействия с ускорением 15g (пиковое значение) продолжительностью до 1мс.

5.2.3 Выбор станции удаленной периферии

В распределенных системах, при значительном удалении элементов ввода-вывода от системы автоматизации, электрический монтаж становится очень

объемным, и влияние электромагнитных помех на надежности работы значительно возрастает. Для таких условий работы рекомендуется использовать систему децентрализованной периферии ET200. Для решения задачи проектирования могут быть использованы станции распределенной периферии ET200M.

ET200M может быть смонтирована не более чем на одном носителе модулей (профильной шине), поскольку соединение через интерфейсные модули с другими носителями недопустимо. Для размещения модулей на носителе следует учитывать, что по правую сторону от IM 153 можно установить до 12 сигнальных и/или функциональных и коммуникационных модулей. На рисунке 5.8 показано размещение модулей в структуре ET200M.

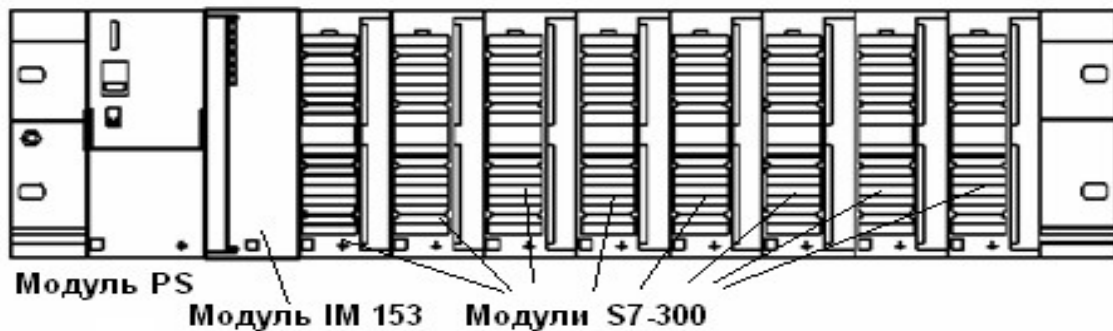


Рисунок 5.8 - Размещение модулей ET200M

При проектировании механической конфигурации нужно учесть потребление тока со стороны модулей. Модули получают необходимый для их работы ток с задней шины, а также от внешнего источника питания нагрузки. Следует учесть, что IM 153 поставляет для задней шины питания, ограниченный током 1 А. Поэтому при проектировании ET200M необходимо определить потребление тока и мощность потерь в станции. Определение потребляемого тока позволит выбрать блок питания, а определение мощности потерь - обоснованно выбрать размеры шкафа и способы его вентиляции.

Задействованные сигналы приведены в Таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Задействованные сигналы

№ п/п	Наименование	Тип датчика	Электрич-е параметры	Интерфейс	Кол-во
1	BTL Micropulse	цифровой	4-20mA	-	1
2	LB-452	аналоговый	4-20mA	-	1
3	Сигнал управления сервоприводом	аналоговый	4-20mA	-	1
4	РАСТР	аналоговый	4-20mA	-	1
5	Schenck Process	аналоговый	4-20mA	-	1
6	PC-28	аналоговый	4-20mA		1

5.2.4 Выбор интерфейсного модуля

В качестве интерфейсного модуля для соединения станции удаленной периферии с процессором контроллера, может быть использован подчиненный интерфейсный модуль IM 153-1.

IM 153-1 имеет следующие характеристики:

- подчиненный интерфейсный модуль для не более чем 8 модулей спектра S7-300 (SM, FM, CP);
- возможна замена модулей S7-300 при работе ET 200M;
- возможная скорость передачи от 9,6 кБ до 12 МБ;
- конфигурирование с STEP 7, COM PROFIBUS, SYNC и FREEZE;
- поведение как DP-Slave в соответствии с EN 50170, том 2, PROFIBUS;
- питание 24 В постоянного тока.

Состав модуля IM 153-1 приведен на рисунке 5.9.

В качестве источника питания 24 В постоянного тока производитель рекомендует использовать блок питания PS 307.

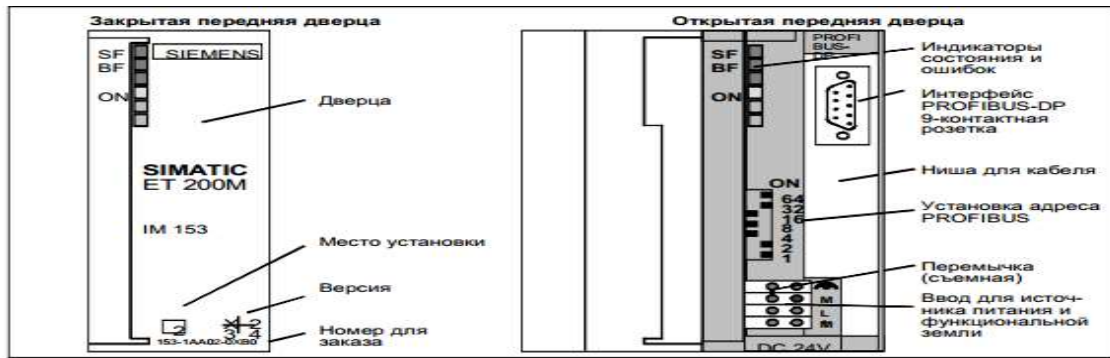


Рисунок 5.9 - Вид спереди интерфейсного модуля IM 153-1

5.2.5 Выбор блока аналоговых входов

Для подключения датчиков аналогового типа может быть использован аналоговый модуль ввода SM 331; AI 8x12 Bit (6ES7331-7KF02-0AB0). Модуль 6ES7331-7KF02-0AB0 предназначен для подключения к контроллеру аналоговых датчиков и исполнительных устройств. Модуль ввода аналоговых сигналов выполняет аналого-цифровое преобразование входных аналоговых сигналов контроллера и формирует их цифровое представление для дальнейшего использования.

Технические характеристики модуля:

- блок питания измерительных преобразователей;
- ток питания макс. 60 мА (на канал);
- 8 входов в 4 группах каналов;
- вид измерения устанавливается на группу каналов: напряжение, ток, сопротивление, температура;
- разрешающая способность устанавливается на группу каналов (13 битов + знак);
- выбор диапазона измерений любой, на группу каналов;
- параметризуемые диагностика и диагностическое прерывание;
- контроль граничных значений настраиваемый для 2 каналов;
- параметризуемое аппаратное прерывание при нарушении границы;
- быстрое обновление измеряемых значений;

- поддерживает режим тактовой синхронизации;
- гальваническая развязка с CPU и относительно напряжения на нагрузке (не для 2-проводных измерительных преобразователей).
- с задней шины макс. 50 мА;
- из источника питания нагрузки L + макс. 30 мА (без 2-проводного преобразователя).

Подключение: 2 и 4-проводные измерительные преобразователи для измерения тока:

Принципиальная схема и схема подключения представлены на рисунке 5.10.

К модулю подключены следующие датчики: датчик уровня металла в кристаллизаторе LB-452, датчик давления PC-28 и сервоклапаны MOOG D633.

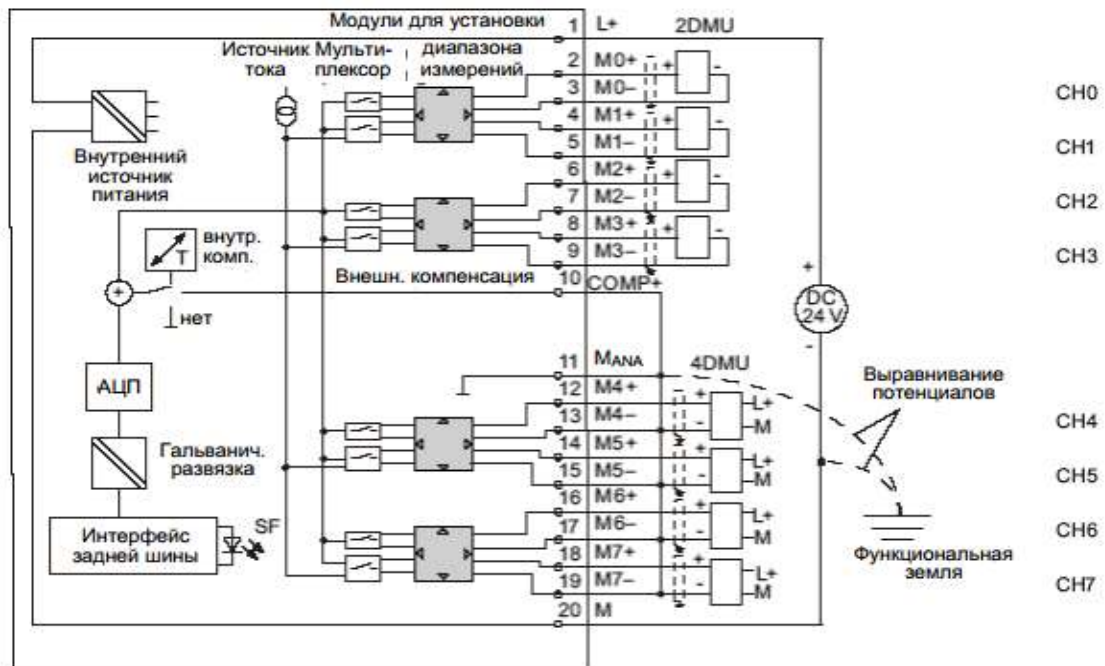


Рисунок 5.10 – Принципиальная схема и схема подключения аналогового блока ввода

5.2.6 Выбор модуля аналогового вывода

Для вывода аналоговых сигналов управления может быть использован модуль аналогового вывода SM 332; AO 2 x 12 Bit (6ES7332-5NB01-0AB0). Модуль предназначен для цифро-аналогового преобразования внутренних цифровых величин контроллера и формирования его выходных аналоговых сигналов. Модули

выпускаются в пластиковых корпусах, которые могут устанавливаться на профильную шину с креплением защелками или на вертикальную плоскую поверхность с креплением винтами.

Технические характеристики модуля:

- 2 выхода в одной группе;
- отдельные выходные каналы могут быть параметризованы как:
 - потенциальные выходы,
 - токовые выходы
- разрешение 12 бит;
- параметризуемые диагностика и диагностическое прерывание;
- гальваническая развязка относительно интерфейса с задней шиной и напряжения на нагрузке.

Потребление тока:

- с задней шины. макс. 60 мА;
- из источника питания нагрузки L + макс. 135 мА.

Номинальное напряжение на нагрузке L + 24 В пост. тока.

Подключение для токового выхода представлено на рисунке 5.11.

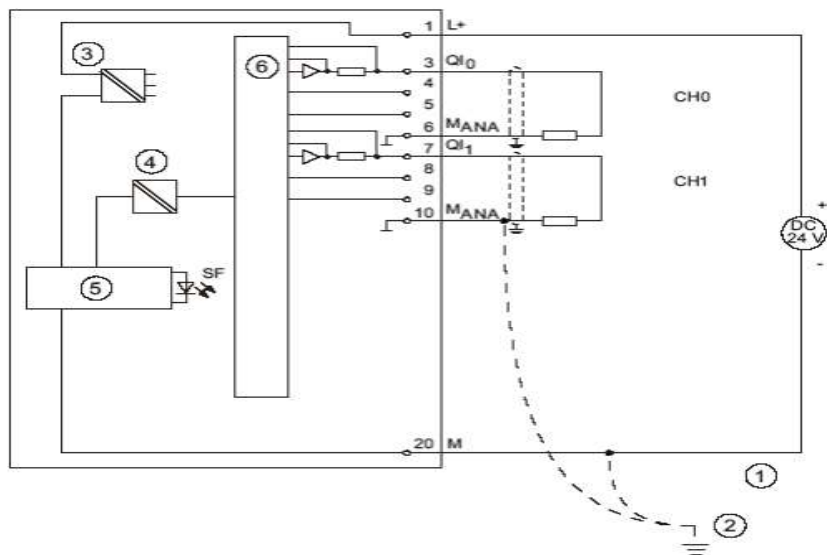


Рисунок 5.11 – Принципиальная схема и схема подключения модуля аналогового вывода: 1 – выравнивание потенциалов, 2 - функциональная земля, 3 – внутренний источник питания, 4 – потенциальная развязка, 5 – подключение к задней шине, 6 - аналого-цифровой преобразователь (АЦП)

Поскольку количества выходных каналов достаточно, модуль будет использоваться один в станции ET 200M. К модулю подключены сервоклапаны MOOG D633.

5.2.7 Выбор модуля регистрации перемещений

Для подключения цифрового датчика линейных перемещений BALLUFF BTL Micropulse будет использоваться модуль регистрации перемещений SM 338 POS-INPUT (6ES7338-4BC01-0AB0).

Цифровой датчик абсолютных значений передает свои значения модулю SM 338 в виде кодовых сообщений. Передача сообщения инициируется модулем SM 338. При отсутствии тактовой синхронизации значения датчика регистрируются в свободном режиме. В режиме тактовой синхронизации значения датчика регистрируются синхронно с циклом PROFIBUS DP в каждый момент T_i .

- Свободная регистрация значений датчика SM 338 всегда инициирует передачу сообщения по окончании параметризации времени паузы между кадрами. Асинхронно с этими поступающими сообщениями, в свободном режиме SM 338 обрабатывает зарегистрированное сообщение датчика в течение цикла своей актуализации. Вследствие этого при свободном режиме регистрации значений датчика появляются значения, относящиеся к различным моментам времени.

- Регистрация значений датчика в режиме тактовой синхронизации устанавливается автоматически, если в master-системе DP активизирован эквидистантный цикл шины и slave-устройство DP синхронизировано с циклом DP. Модуль SM 338 инициирует передачу сообщения в каждом цикле PROFIBUS DP в момент времени T_i и обрабатывает переданные значения датчика синхронно с циклом PROFIBUS DP.

Технические характеристики модуля:

- 3 входа для подключения до трех абсолютных датчиков (SSI) и 2 цифровых входа для фиксации значений датчиков;
- возможна непосредственная реакция на значение датчиков в перемещаемой системе;

- обработка значений датчиков, регистрируемых модулем SM 338, в программе пользователя;
- поддержка режима тактовой синхронизации;
- возможен выбор вида регистрации значений датчика: свободный или с тактовой синхронизацией;
- номинальное входное напряжение 24 В пост. тока;
- потенциально связан с CPU;
- возможен выбор ускоренного режима (Fast Mode) с более быстрой регистрацией значений датчика и сжатым интерфейсом обратной связи. Режим Fast Mode доступен, начиная с версии программы ПЗУ V2.0.0 в SM 338 POS-INPUT и может быть выбран, начиная с STEP 7 V5.3 + SP2;
- поддерживает код Грея и двоичный код;

Потребление тока:

- с задней шины - макс. 160 мА;
- из источника питания нагрузки L + макс. 10 мА.

Принципиальная схема и схема подключения представлена на рисунке 5.12.

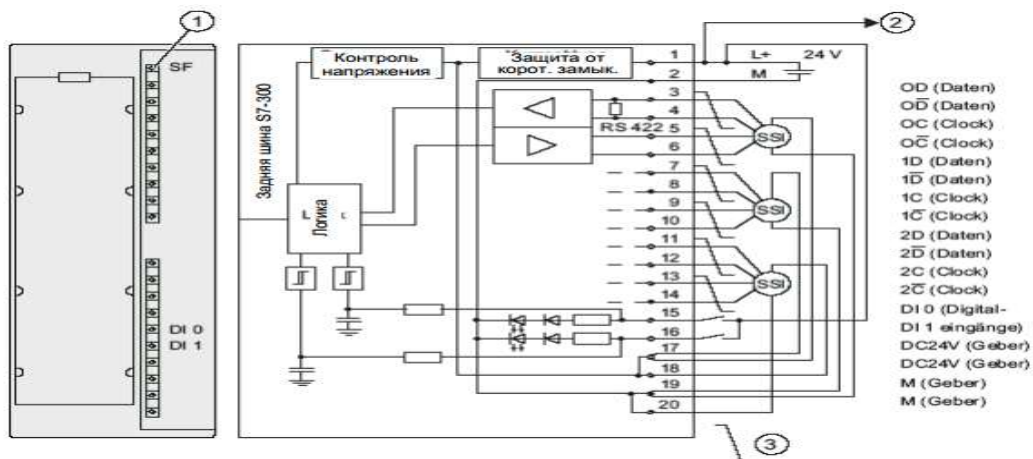


Рисунок 5.12 – Принципиальная схема и схема подключения модуля регистрации перемещений: Daten - данные; Clock - тактовый генератор; Digitaleingänge - цифровые входы; Geber - датчик

Так как количества каналов достаточно, модуль будет использоваться один в станции ET 200M. К модулю подключен датчик линейных перемещений BALUFF BTL Micropulse

5.2.8 Выбор коммутационного модуля

Для соединения с компьютером необходим коммуникационный процессор. В данном случае может быть применен модуль CP 343-1, который позволяет осуществить непосредственное подключение контроллеров SIMATIC S7-300 к сети Industrial Ethernet со скоростью передачи 100 Мбит/с. CP 343-1 поддерживает обмен данными через Industrial Ethernet с одновременным обслуживанием до восьми S7 и одного PG соединения. Соединения могут устанавливаться с программируемыми контроллерами SIMATIC S7 / WinAC, компьютерами, программаторами, системами автоматизации других производителей. Для мониторинга состояния системы связи могут задаваться времена контроля активности соединений со всеми активными и пассивными партнерами по связи.

Коммуникационному процессору CP 343-1 присваивается собственный Ethernet-адрес, что позволяет производить его подключение к сети предприятия. Также в модуль встроен коммутатор с 4 портами RJ45, что позволяет строить сети с гибкой топологией. Применение внешнего опционального блока питания обеспечивает автономную работу коммутатора в случае отключения компьютера. Технические данные коммуникационного модуля приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Технические данные коммуникационного модуля

Технические данные	
Скорость передачи данных	10/100 Мбит/с
Интерфейсы	
Подключение к Industrial Ethernet (10/100 Мбит/с)	15-полярное гнездо соединителя D-типа (автоматическое переключение между интерфейсами AUI и ITP)
Подключение к 10BaseT, 100BaseTX	RJ45
Потребляемый ток	
- от цепи +24 В	Типовое значение: 53 мА, максимальное значение: 60 мА

5.2.9 Выбор блоков питания

Чтобы обеспечить бесперебойным питанием станцию удаленной периферии, а также датчики, которые к ней подключаются необходимо выбрать соответствующие блоки питания. Для этого необходимо выполнить расчет потребляемого тока.

Расчет внешнего блока питания для датчиков.

- Уровнемер «Berthold» модели LB-323-2:

$$I_1 = \frac{15BA}{24B} = 0.625(A) \quad (5.1)$$

- Датчик линейного перемещения BTL Micropulse:

$$I_2 = \frac{15BA}{24B} = 0.625(A) ; \quad (5.2)$$

- Измерительный преобразователь давления РС-28:

$$I_3 = \frac{14BA}{24B} = 0.583(A) ; \quad (5.3)$$

- Пропорциональный сервоклапан MOOG D633:

$$I_4 = \frac{10BA}{24B} = 0.416(A) . \quad (5.4)$$

- Датчик веса промковша Schenck Process:

$$I_5 = \frac{12BA}{24B} = 0.5(A) . \quad (5.5)$$

- Датчик скорости движения заготовки «РАСТР»:

$$I_5 = \frac{10BA}{24B} = 0.416(A) . \quad (5.6)$$

Суммарный ток $I_{\text{сумм1}} = \Sigma I_i = 2.9A$.

Рассчитанное значение тока с запасом не менее 50% обеспечит блок питания SITOP POWER 4A.

Технические характеристики блока питания SITOP POWER 4A:

- выходной ток 4 А;
- выходное напряжение 24 в пост. тока;
- подключение к однофазной системе переменного тока ~ 230 В.

Расчет блока питания для модулей станции удаленной периферии.

Потребляемая мощность модулей фирмы Siemens в соответствии с технической документацией:

- интерфейсный модуль IM-153-1: $I_6 = 0.625\text{A}$;
- модуль аналоговых входов SM331: $I_9 = 0.05\text{A}$;
- модуль аналоговых выходов SM332: $I_{10} = 0.06\text{A}$;
- позиционный модуль SM338: $I_{11} = 0.16\text{A}$.

Суммарный потребляемый ток: $I_{\text{сумм}2} = 1.05\text{A}$.

Рассчитанное значение тока с запасом не менее 50% обеспечит блок питания PS 307 - 2 А.

Технические характеристики блока питания PS 307 - 2 А:

- выходной ток 2 А;
- выходное напряжение 24 в пост. тока;
- подключение к однофазной системе переменного тока (120/230 В);
- надежная гальваническая развязка в соответствии с EN 60950;
- может быть использован как источник питания нагрузки.

Расчет блока питания центрального процессора и коммутационного процессора.

- центральный процессор CPU 315-2DP: $I_{12} = 0.800\text{A}$;
- коммутационный процессор CP 343-1: $I_{13} = 0.06\text{A}$;

Суммарный потребляемый ток: $I_{\text{сумм}3} = 0.86\text{A}$.

Рассчитанное значение тока с запасом не менее 50% обеспечит блок питания PS 307 - 2 А.

Схема подключения датчиков и всех исполнительных устройств к модулям ввода-вывода, контроллеру и блокам питания приведена в приложении Д.

5.3 Разработка человеко-машинного интерфейса

Одной из главных задач проектирования АСУ ТП - обеспечение надежного, удобного и понятного человеко-машинного интерфейса. В настоящее время системы НМІ (человеко-машинного интерфейса) представлены панелями управления или SCADA-системами.

SCADA-система – компьютер или облачное объединение компьютеров, с набором специализированного программного обеспечения, предназначенного для комплексного контроля и мониторинга систем управления, сбора информации, ее регистрации, обработки и вывода на объект визуализации.

На SCADA-системах в понятном пользователю (оператору) виде отображается информация об объекте: значения параметров, интерфейсные элементы управления и установки значений параметров, схемы, графические изображения объектов управления и их частей (мнемосхемы). Элементы, а также их состояние, могут отображаться с применением анимации. Также широко применяются обновляющиеся графики значений параметров по оси времени (тренды) с информацией, сохраняемой в базе данных или текстовых файлах.

Таким образом, можно сформулировать основные функции SCADA-систем:

- 1) сбор информации о технологическом процессе;
- 2) обеспечение качественного интерфейса пользователя;
- 3) сохранение архивов данных о ведении процесса;
- 4) непосредственное автоматическое управление.

Средства визуализации - одно из базовых свойств SCADA-систем. Визуализация предназначена для графического представления объекта управления и непосредственно связана с программой контроллера. Для разработки приложений SCADA применяются специальные среды разработки, в каждой из которых существует графический объектно-ориентированный редактор с определенным набором функций. Используемая графика дает возможность выполнять большой набор операций над создаваемыми простыми или сложными объектами. Все SCADA-системы включают библиотеки стандартных графических символов, библиотеки графических объектов и имеют практически одинаковый базовый набор инструментов и средств отображения информации (сравнительная характеристика наиболее распространенных в настоящее время SCADA-систем приведена в Таблице 5.4) [70].

Таблица 5.4 – Сравнительная характеристика различных SCADA-систем и средств визуализации

SCADA-система (производитель)	Достоинства	Недостатки
1	2	3
Genie (Advantech)	<p>1) редактор задач позволяет создавать блок-схемы, максимально приближенные по виду к функциональной схеме системы;</p> <p>2) удобная среда разработки (является продуктом all-in-one);</p> <p>3) легко осуществляется согласование уровней сигналов в пределах каждого контура;</p> <p>4) тестовые запуски осуществляются непосредственно в рабочем режиме.</p>	<p>1) удобен для разработки и отладки проектов некрупных АСУ ТП.</p>
TraceMode 5.03 Laboratory (AdAstra)	<p>1) редактор FBD-программ содержит широкую номенклатуру функциональных блоков;</p> <p>2) возможность интеграции с базами данных и другими приложениями;</p> <p>3) реализованы универсальные тренды;</p> <p>4) позволяет быстро создать связи между узлами распределённой системы управления.</p>	<p>1) невысокая наглядность схемы из-за отсутствия на схеме блоков ввода-вывода, а дополнительные функции часто оказываются невостребованными;</p> <p>2) требовательна к ресурсам и вычислительной мощности системы, на которой ведется разработка проекта;</p> <p>3) использует различные эмуляторы, что оправдывает себя лишь при тестировании небольших частей крупного проекта.</p>
WinCC (Siemens)	<p>1) имеет традиционный набор функций для HMI;</p> <p>2) качественная обработка графических файлов;</p> <p>3) продуманная система структурированно-приоритетного обращения с сообщениями об ошибках, предупреждениях, тревогах;</p>	<p>1) сложности и неудобство в работе с некоторыми инструментами;</p> <p>2) требуется специальное платное ПО от Siemens.</p>

Продолжение Таблицы 5.4

1	2	3
	4) наличие модуля сжатия, экспорта, резервирования данных, и механизмов их восстановления.	
CoDeSys (3S-Smart Software Solutions GmbH)	1) не требуются дополнительные инструменты, содержит встроенный редактор визуализации; 2) не нуждается в списках переменных; 3) объединение управления и визуализации делает очень простым управление режимами выполнения; 4) созданные внутри системы программирования формы могут использоваться в 4 различных режимах выполнения без изменений; 5) простота, высокое быстродействие и надежность, невысокие требования к вычислительной мощности компьютера и каналам связи; 6) поддерживает все определяемые стандартом IEC 61131-3 языки; 7) доступен широкий круг отладочных инструментов; 8) позволяет разработчику подключать собственные плагины.	1) применяется на нижних уровнях АСУТП для локальных подсистем; 2) возможность работы лишь с небольшим числом контроллеров; 3) не предполагает формирование отчетов.

На основе анализа таблицы 5.4, для разработки человеко-машинного интерфейса выбрана CoDeSys HMI - система исполнения визуализации, которая является менее требовательным к ресурсам и открытым аналогом SCADA-системы и является наиболее рациональным решением для случаев, где необходима быстрая реакция, а стоимость оборудования является критичной.

Инструментальный программный комплекс промышленной автоматизации CoDeSys доступен в виде модульной системы с одним источником для разных платформ устройств и обладает следующими преимуществами:

- осуществляет поддержку всех распространенных процессоров и операционных систем для промышленных систем;
- предоставляет возможность разработки промышленных контроллеров с требуемыми техническими характеристиками с помощью определенных интерфейсов;
- реализует конкретные свойства устройства с помощью библиотечных модулей (например, для собственных функций ввода/вывода);
- обладает возможностями адаптации и расширяемости пользовательского интерфейса с помощью подключаемых модулей, специфичных для производителя (например, шаблонов, редакторов, конфигураторов и мастеров);
- интегрируется в существующие архитектурные системы посредством использования запатентованных интерфейсов или стандартов.

Среда разработки CoDeSys v2.3 позволяет создать достаточно простую, но в то же время представительную систему визуализации. Редактор визуализации CoDeSys НМІ предоставляет набор готовых графических элементов, которые могут быть связаны соответствующим образом с переменными проекта (встроенная в CoDeSys визуализация непосредственно может брать переменные из контроллера). Коммуникация осуществляется тем же механизмом, который используется для самой системы программирования. Таким образом, инженерные затраты на реализацию визуализации значительно сокращаются. Объединение управления и визуализации делает очень простым управление режимами выполнения.

Для разработки системы визуализации необходимо сформулировать требования по составу отображаемой информации о задаваемых и контролируемых параметрах разливки в целом и локальной системы управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ в частности.

В текущем окне визуализации оператор должен постоянно контролировать следующие данные.

1. Общие установки по машине:

- № плавки;
- время начала разливки;
- длительность разливки;

- вес разлитой стали от начала разливки;
- скорость вытягивания слитка: минимальная, максимальная, текущая;
- кнопка «Начало разливки»;
- кнопка «Разливка в процессе»;
- кнопка «Конец разливки»;
- кнопка «замена СК»;
- кнопка «замена погружного стакана».

2. Параметры стальковша

- вес стальковша СК1;
- вес стальковша СК2;
- уровень металла в стальковше;
- номер разливаемого стальковша в серии;
- кнопка обнуления веса стальковша;

3. Параметры промковша:

- вес промковша;
- уровень металла в промковше;
- кнопка обнуления веса промковша;
- цифровое и графическое отображение заданного уровня металла в промковше

с возможностью изменения;

- цифровое и графическое отображение фактического уровня металла в промковше;

- график (тренд) изменения уровня металла в промковше в реальном времени.

4. Уровень металла в кристаллизаторе

- кнопки переключения режима управления уровнем металла («РУЧНОЙ»/«АВТОМАТ»);

- сигнал «ВНИМАНИЕ» (возникает при поступлении какого-либо сигнала предупреждения);

- сигнал «АВАРИЯ» (возникает при поступлении какого-либо сигнала аварии);

- значение индекса зарастания «СИ»;

- цифровое и графическое отображение заданного уровня металла в кристаллизаторе с возможностью изменения;
- цифровое и графическое отображение фактического уровня металла в кристаллизаторе;
- график (тренд) изменения уровня металла в кристаллизаторе в реальном времени.

Каждому из вышеперечисленных параметров необходимо поставить в соответствие свой элемент визуализации - графический элемент, который используется при построении объекта визуализации.

Возможные элементы представлены в виде пиктограмм на панели инструментов CoDeSys. Каждый элемент имеет собственную конфигурацию (набор свойств).

Для реализации проекта визуализации НМІ в соответствии с поставленными требованиями, необходимо использовать следующие элементы [7]:

- 'Button' (Кнопка). Вставка кнопки в текущую визуализацию. Если для кнопки сконфигурирована переменная переключения, то кнопка визуально отображает состояние этой переменной (то есть изображается или нет, соответственно), и наоборот - значение переменной изменится при нажатии кнопки.

- 'Bar Display' (Столбчатый указатель). Служит для представления текущего значения переменной в форме столбца или отметки, которая перемещается вдоль шкалы.

- 'Trend' (Тренд). Элемент Тренд служит для графического представления тенденции изменения значения переменной на определенном временном периоде. Элемент 'Trend' аккумулирует данные и отображает их в виде графика. При изменении значения переменной производится новая запись в специальном файле. Она содержит дату/время и новое значение переменной. Элемент 'Тренд' отображается прозрачным, благодаря чему можно выбрать любой задний план (цвет, растровый рисунок). Настройка способа представления (ось координат, переменные, хронология) осуществляется в диалоге конфигурации категории 'Тренд'.

- 'Rectangle' (Прямоугольник) и 'Rounded Rectangle' (Закругленный прямоугольник). Позволяют вставить прямоугольник в текущую визуализацию. Может использоваться для вставки текстовых блоков.

- 'Ellipse' (Эллипс). Вставка круга или эллипса в текущую визуализацию.

- 'Extras' → 'Group' (Группировка элементов). Группа ведет себя как единичный элемент: сгруппированные элементы получают общую рамку, а также общие свойства: ввод данных действует на группу целиком, а не на отдельные элементы. Поэтому группа имеет общий диалог конфигурации.

После того, как созданы все необходимые элементы графического интерфейса, выполнена их логическая группировка для удобства восприятия оператором в соответствии с физическими участками технологического процесса:

- 1) «Разливка» – группа общих параметров разливки;
- 2) «Режим разливки» - группа управления режимами работы;
- 3) «Стальковш» – группа текущих параметров стальковша;
- 4) «Промковш» - группа текущих параметров промковша;
- 5) «Уровень металла» - группа управляющих, контролируемых и предупреждающих сигналов о работе кристаллизатора;
- 6) «Скорость вытягивания» - группа текущих параметров, соответствующих скорости вытягивания.

Центральная часть рабочего окна отведена под представление управляемых параметров системы – уровней металла в кристаллизаторе и промковше – в наиболее удобном для восприятия графическом виде.

На рисунке 5.13 представлена форма визуализации разработанной системы автоматического управления, представленная в среде разработки CoDeSys HMI.

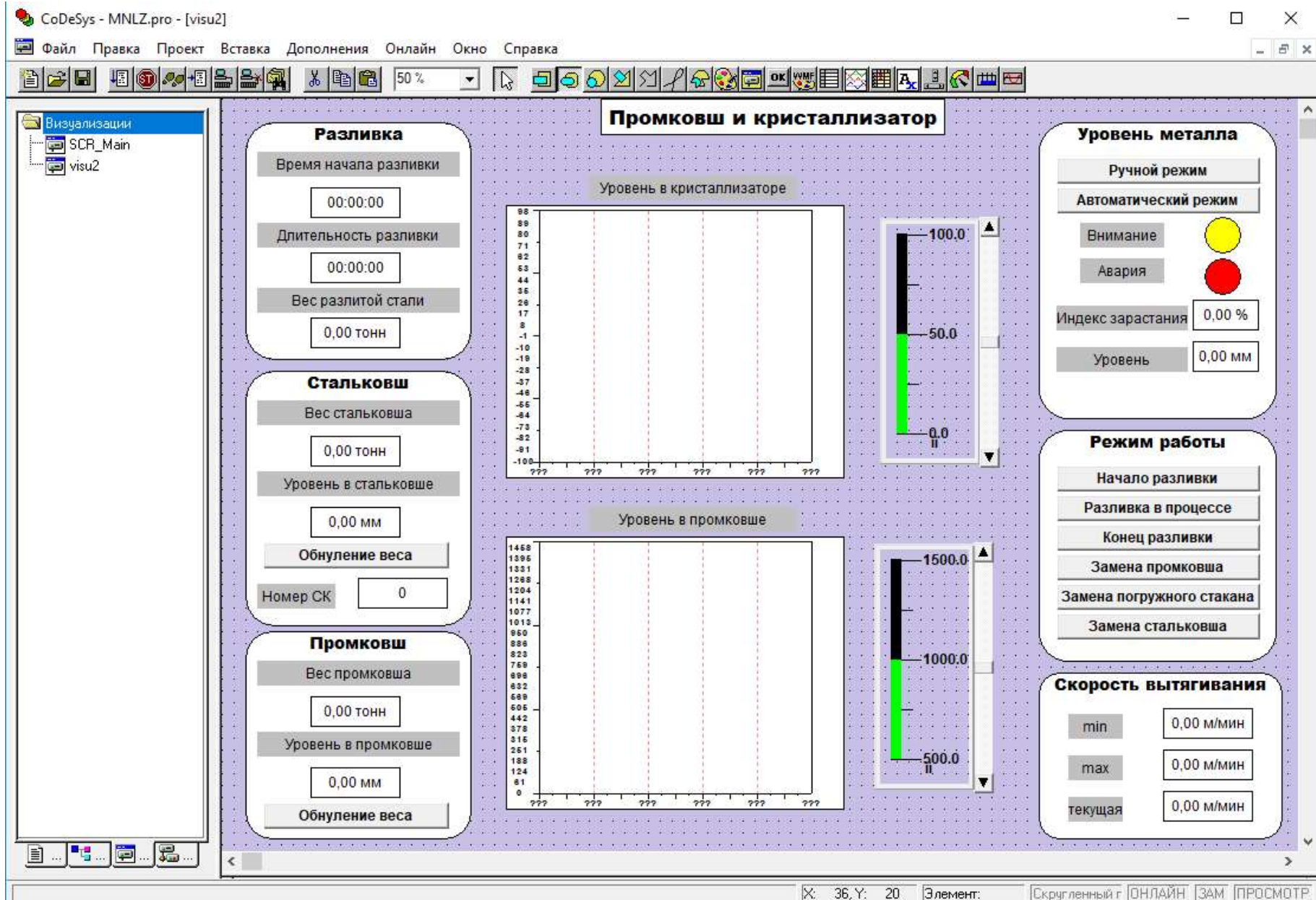


Рисунок 5.13 - Окно разработки HMI в редакторе визуализации CoDeSys 2.3

5.3 Выводы по разделу 5

1. Разработана функциональная схема технической реализации модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе в нестационарных режимах литья заготовок.

2. Произведен выбор необходимых элементов для реализации разработанной системы управления. Представлены их основные характеристики и схемы подключения. Выбран программируемый логический контроллер, способный реализовать разработанные алгоритмы управления.

3. Предложена структура визуализации для модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок в среде программирования CoDeSys v2.3.

4. Предложенная структура и комплекс технических средств на основе современных промышленных контроллеров и средств инфокоммуникационных технологий позволит реализовать концепцию автоматизированного цифрового управления металлургическим предприятием.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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 разлива, 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 разлива. 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.

Результаты исследования используются в учебном процессе кафедры «Автоматика и телекоммуникации» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет».

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовок;
- МНК – метод наименьших квадратов;
- П – пропорциональный;
- ПИ – пропорционально-интегральный;
- ПИД - пропорционально-интегрально-дифференциальный;
- ПЛК – программируемый логический контроллер;
- ПО – программное обеспечение;
- Промковш – промежуточный ковш;
- САР – система автоматического регулирования;
- САУ – система автоматического управления;
- Стальковш – сталеразливочный ковш;
- ТУ – технологический участок;
- ASI – Actuator/Sensor Interface;
- CAN – Controller Area Network;
- FFRC – flow fraction registration and control;
- FRC – flow registration and control;
- HMI – человеко-машинный интерфейс;
- MPC – model predictive control;
- MPI – Message Passing Interface
- PRC – pressure registration and control;
- PROFIBUS – Process Field Bus;
- PROFIBUS-DP – Process Field Bus for Distributed Periphery;
- PROFIBUS-FMS – Process Field Bus for Fieldbus Message Specification;
- PROFIBUS-PA – Process Field Bus for Process Automation;
- QRC – quality registration and control;
- SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АСУТП в черной металлургии: учеб. для вузов / Г.М. Глинков, В.А. Маковский, 2-е изд. перераб. и доп. – Москва: Металлургия, 1999. – 310 с.
2. Атлас дефектов стали / ред. с оригинал. изд. М.Л. Бернштейн; пер с нем. Е.Я. Капуткина – Москва, Металлургия, 1979. – 188 с.
3. Авдонин, В.Ю. Система управления качеством непрерывно литых заготовок / В.Ю. Авдонин, Л.В. Буланов, Н.А. Юровский [и др.] // Металлургическая и горнорудная промышленность. -2003. - № 8. - С. 131 - 135.
4. Бигеев, А.М. Непрерывные сталеплавильные процессы / А.М. Бигеев – М.: Металлургия, 1986. – 136 с.
5. Бровман, М.Я. Усовершенствование технологии и оборудования машин непрерывного литья заготовок / М.Я. Бровман – Киев: Техника, 1976. – 165 с.
6. Вдовин, К. Н. Определение оптимальных режимов при непрерывной разливке стали / К. Н. Вдовин, С. А. Повитухин // Теория и технология металлургического производства: Сборник науч. тр. / Под ред. В. М. Колокольцева. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2005. - С. 122-128.
7. Визуализация CoDeSys. Дополнение к руководству пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.owen.ru/uploads/134/codesys_visu_v23_ru.pdf. – Загл с экрана.
8. Власов, К.П. Теория автоматического управления: Учеб. пособие / К.П.Власов, А.С.Анашкин. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2003. - 103 с.
9. Волкова, В.Н. Теория систем / В.Н. Волкова, А.А. Денисов – Москва: «Высшая школа», 2006. – 511с.
10. Волуева, О.С. Основные функции компьютерной системы управления процессом непрерывной разливки стали [Электронный ресурс] / О.С.Волуева, 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. – Режим доступа: <http://ea.donntu.org:8080/jspui/handle/123456789/16317>. – Загл с экрана.

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

12. Волуева, О.С. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания заготовки из кристаллизатора [Электронный ресурс] / Н.В. Жукова, О.С. Волуева, В.В. Корчак. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 183. - С.6-11. – Режим доступа: http://ea.donntu.org:8080/jspui/bitstream/123456789/7787/1/Ткаченко-Волуева_Жукова.pdf. - Загл с экрана.

13. Волуева, О.С. Система автоматического управления уровнем металла и скорости вытягивания МНЛЗ [Электронный ресурс] / В.Н. Ткаченко, О.С. Волуева, Н.В. Жукова // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2011), 28-30 вересня 2011 року - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011 – С. 204-205. – Режим доступа: <http://ena.lp.edu.ua/bitstream/ntb/18534/1/109-Ткаченко-204-205.pdf>. - Загл с экрана.

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

15. Волуева, О.С. Компенсация эффекта интегрального насыщения регулятора в системе управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ [Электронный ресурс] / О.С. Волуева. Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2013.– Вип. 2(25). – С. 13-20. – Режим доступа: <http://ea.donntu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/22622/1/волуева.pdf> - Загл с экрана.

16. Волуева, О.С. Компенсация зарастания канала дозирования жидкого металла в системе управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ

[Электронный ресурс] / О.С. Волуева, Н.Н. Чернышев. // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк: ДонНТУ, 2014. – Вип. 2(27). – С. 62-69. – Режим доступа:

<http://ea.donntu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/27322/1/Chernyshev.pdf>. - Загл с экрана.

17. Волуева, О.С. Оценка зарастания канала дозирования жидкого металла в кристаллизаторе МНЛЗ [Электронный ресурс] / О.С. Волуева, Н.Н. Чернышев, В.Н. Ткаченко. // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – Харьков, 2014. - №2(105). – С.43-47. – Режим доступа:

<http://ea.donntu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/27343/1/Chernyshev.pdf>. - Загл с экрана.

18. Волуева, О.С. Модернизированная система автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ [Электронный ресурс] / О.С. Волуева, Н.Н. Чернышев. // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці: матеріали VIII Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Луганськ, 2014). – Луганськ: Вид-во ДЗ „ЛНУ імені Тараса Шевченка”, 2014. – С.122-124. - Режим доступа: http://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/27347/1/Chernyshev_Volueva.pdf.

- Загл с экрана.

19. Волуева О.С. Математическая модель изменения уровня жидкого металла на участке «стальковш-кристаллизатор» установки непрерывной разливки стали / О.С. Волуева, Н.Н. Чернышев. // Сборник трудов конференции «Завалишинские чтения» 11-15 апреля 2016г. / Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения. - Санкт-Петербург, 2016. – 322 с. – С. 278-283.

- Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27291559>. - Загл с экрана.

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

21. Втюрин, В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. Основы АСУТП: учеб. пособие для студентов специальности 220301 "Автоматизация технологических процессов и производств". – Санкт-Петербург: СПбГЛТА, 2006. – 152 с.

22. Выскуб, В.Г. Методы анализа и синтеза сложных автоматических систем / В.Г. Выскуб, С.В. Колодезев, А.Н. Тихонов, П.И. Чинаев. – Москва: Машиностроение, 1992. – 303 с.
23. Гудвин, Г.К. Проектирование систем управления. / Г.К. Гудвин, С.Ф. Гребен, М.Э. Сальгадо; пер. с англ. А.М. Епанешникова – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
24. Денисов, А.А. Теория больших систем управления: учеб. пособие для вузов / А.А. Денисов, Д.Н. Колесников – Ленинград: Энергоиздат, Ленингр.отд-ние, 1982. – 288 с.
25. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп; Пер. с англ. Б.И. Копылов. – Москва: Лабораторий базовых знаний, 2004. – 832 с.
26. Дюдкин, Д.А. Технологические и конструктивные аспекты новых МНЛЗ / Д.А. Дюдкин // Сталь. – 2002. – №2. – С. 21-26.
27. Дюдкин, Д. А. Качество непрерывнолитой заготовки / Д. А. Дюдкин – Киев: Техника, 1988. – 253 с.
28. Дюдкин, Д.А. Производство стали. Том 4. Непрерывная разливка металла / Д.А. Дюдкин, В.В. Кисиленко, А.Н. Смирнов – М.: Теплотехник, 2009. – 528 с.
29. Егоров, Ю.В. Некоторые задачи теории оптимального управления / Ю.В. Егоров // ЖВМ и МФ, 1963. - Том 3. - №5. - С. 887 – 904.
30. Еременко, Ю. И., Кузнецов, Л. А. Нечеткий логический регулятор для системы управления уровнем металла в кристаллизаторе установки непрерывной разливки стали / Ю. И. Еременко, Л. А. Кузнецов. - Датчики и системы. – Москва: Сенсидат-Плюс, 2003. - С.22-25. - № 10.
31. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования / Г.Ф.Зайцев. – 2-е изд., перераб. и доп. - Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1989. - 431 с.
32. Золотухин, В.И. Автоматизация управления потоком металла в машинах непрерывной разливки стали [Электронный ресурс] / В.И. Золотухин // Известия ТулГУ. Технические науки, 2012. – С. 46-53. - Вып. 2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/v/avtomatizatsiya-upravleniya-potokom-metalla-v-mashinah-nepreryvnoy-razlivki-stali>. -

Загл. с экрана.

33. Зотов, М.Г. Многокритериальное конструирование систем автоматического управления / М.Г. Зотов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 375 с.

34. Иванова, А.А. Управление режимами вторичного охлаждения МНЛЗ / А.А. Иванова // Доклады XV международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика – 2008». - Одесса, 2008. – С.221-224.

35. Контроль и автоматизация металлургических процессов: учеб. для вузов / Г.М. Глинков, А.И. Косырев, Е.К. Шевцов. – Москва: Металлургия, 1989. – 352 с.

36. Кривоносов, В.А. Наблюдаемость и управляемость системы стабилизации уровней расплавленного металла на МНЛЗ [Электронный ресурс] / В.А. Кривоносов, А.С. Митин // Инженерный вестник Дона, Ростов-на-Дону: ФГАОУВПО «Южный федеральный университет», 2013. - Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/nablyudaemost-i-upravlyaemost-sistemy-stabilizatsii-urovney-raspavlennogo-metalla-na-mnlz>. - Загл. с экрана.

37. Куберский, С.В. Непрерывная разливка стали: Учеб. пособ. / С.В. Куберский. – Алчевск: ДГМИ, 2004. – 65 с.

38. Лисиенко, В.Г. Теплофизика металлургических процессов / В.Г. Лисиенко, В.И. Лобанов, Б.И. Китаев // Под науч. ред. В. Г. Лисиенко. - Москва, 1982. - 239 с.

39. Льюнг, Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / Л. Льюнг – Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 432с.

40. Марголин, Ш.М. Электропривод непрерывного литья заготовок. / Ш.М. Марголин. – Москва: Металлургия, 1987. - 279 с.

41. Марченко, К.И. Полунепрерывное литьё стали / К.И. Марченко – Москва: «Металлургия», 1986. – 246 с.

42. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук – Москва: Наука, 1980. – 535 с.

43. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х томах. Т. 2. Машины и агрегаты сталеплавильных цехов. / Целиков А.И., Полухин П.И., Гребеник В.М. [и др.] – Москва: Металлургия. – 1988. – 432 с.

44. Медведев, В.С. Control System Toolbox. MATLAB 5 для студентов / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин [ред.] и др. – Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 1999. – 278 с.

45. Месарович, М. Теория иерархических многоуровневых систем / М.Месарович, Д. Мако, И. Такахара. – Москва: Мир, 1973. – 334 с.

46. Методы классической и современной теории автоматического управления: Учебник в 3-х томах. Под ред. Н.Д. Егупова. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 748 с.

47. Мещеряков, В.В. Задачи по математике с MATLAB&SIMULINK / В.В.Мещеряков. – Москва: ДИАЛОГ-МИФИ, 2007. – 528 с.

48. Митин, А.С. Автоматизация процесса разлива стали на МНЛЗ / А.С. Митин, В.А. Кривоносов. - Lambert Academic Publishing, 2012. – 164 с.

49. Митин, А.С. Повышение эффективности автоматизированной системы контроля и управления процессом разлива стали в машине непрерывного литья заготовок на основе наблюдателя состояния [Электронный ресурс] / А.С. Митин // Автореф. дис. кандидата технических наук: 05.13.06 / Старооскольский технологический институт (филиал) «Национального исследовательского технологического университета «МИСиС». – Липецк, 2012, - 21 с. - Режим доступа: <https://dlib.rsl.ru/viewer/01005053730#?page=1>. - Загл. с экрана.

50. Мэтьюз, Д. Численные методы. Использование MATLAB / Д. Мэтьюз, К. Финк. - 3-е издание: пер. с англ. – Москва: Издательский дом Вильямс, 2001. – 720 с.

51. Нелинейная теория управления: динамика, управление, оптимизация. Под. ред. В.М. Матросова, С.Н. Васильева, А.И. Москаленко. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.

52. Огурцов, А.П. Непрерывная разливка стали: Учеб. пособие / А.П. Огурцов, А.В. Гресс – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Наукова думка, 2001. – 675 с.

53. Олссон, Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. – Санкт Петербург: Невский Диалект, 2001. – 557 с.
54. Основы управления технологическими процессами. Под. ред. Н.С. Райбмана. - Москва: Наука, 1978. – 440 с.
55. Перельмутер, В.М. Пакеты расширения MATLAB. Control System Toolbox и Robust Control Toolbox / В.М. Перельмутер - Москва: СОЛОН-ПРЕСС, 2008. – 224 с.
56. Подчукаев, В.А. Теория автоматического управления (аналитические методы): учеб. для вузов. / В.А. Подчукаев. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2005.– 392 с.
57. Попандопуло, И. К. Непрерывная разливка стали. / И.К. Попандопуло, Ю.Ф. Михневич – Москва: Metallurgia, 1990. – 296 с.
58. Процессы непрерывной разливки стали: Монография / А.Н. Смирнов, В.П. Пилюшенко, А.А. Минаев [и др.] – Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
59. Пути повышения эффективности разливки стали и улучшения качества слитков и заготовок / В.А. Ефремов, В.М. Щеглов, В.А. Казачков [и др.] // Сталь. – 1988. – №1. – С. 31-33.
60. Расчет металлургических машин и механизмов / В.М. Гребеник, Ф.К. Иванченко, В.И. Ширяев [и др.] – Киев: Выща шк. – 1988. – 448 с.
61. Рудной, Л.С. О скорости непрерывной разливки стали / Л.С. Рудной // Сталь. – 1976. – №5 – С. 403-405.
62. Рутес, В.С. Теория непрерывной разливки. Технологические основы / В.С. Рутес, Д.П. Евтеев, В.Я. Генкин [и др.]. - Москва: Metallurgia, 1971. – 296 с.
63. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / М. Сингх, А. Титли. – Москва: Машиностроение, 1986. - 496 с.
64. Система автоматической стабилизации уровня металла в кристаллизаторе МНЛЗ (система УРОВЕНЬ). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.technoap.ru/product/razl_ur.htm
65. Смирнов, А.Н. Погружные стаканы для разливки слябов на МНЛЗ. / А.Н. Смирнов, А.П. Верзилов // Бюллетень «Черная металлургия». – Москва: «Черметинформация», 2011. – Вып. 9 (1341). - с.42-51.

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

67. Столяров, А.М. Непрерывная разливка стали. Часть 1. Конструкция и оборудование МНЛЗ: Учеб. пособие / А.М. Столяров, В.Н. Селиванов. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. – 154 с.

68. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Серия «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика» / В.Н. Ткаченко. – Киев: Наукова думка, 2008. - Том 13 – 440 с.

69. Ткаченко, В.Н. Координация взаимодействия локальных подсистем регулирования процессом непрерывной разливки стали. / В.Н. Ткаченко, О.С. Волуева. Матеріали XIII Міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2006), 25-28 вересня 2006 року. - Вінниця: «УНІВЕРСУМ-Вінниця», 2006. – С. 240.

70. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: Учеб. пособие [Электронный ресурс] / И.А. Елизаров, Ю.Ф. Мартемьянов, А.Г. Схиртладзе, С.В. Фролов. 2-е изд. перераб. и доп. - Москва: «Издательство Машиностроение-1», 2004. - 180 с. - Режим доступа: http://kafedra.asutp.lclients.ru/sau/Elisarov_TSA_2004_126str.pdf. - Загл. с экрана.

71. Харсте К., Танке К.Г. Критерии расчета слябовых МНЛЗ с высокими требованиями к качеству непрерывно-литой заготовки / К. Харсте, К.Г. Танке // Черные металлы. – 1998. – Апр. – С. 24-31.

72. Цупрун А.Ю. Системы управления процессами и механизмами машин непрерывного литья заготовок [Электронный ресурс] / А.Ю. Цупрун, А.Г. Редько, А.В. Колоколов [и др.] // Украинская Ассоциация Сталеплавателей. – Режим доступа: <http://uas.su/conferences/2010/50let/32/00032.php>. - Загл. с экрана.

73. Чен, К. MATLAB в математических исследованиях: Пер. с англ. / К.Чен, П.Джиблин, А.Ирвинг. – Москва: Мир, 2001. – 346 с.

74. Чернышев, Н.Н. Синтез математической модели системы автоматического регулирования уровнем металла в кристаллизаторе / Н.Н.

Чернышев // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології», гол. ред. В.Ф. Євдокимов. – Київ: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова, 2012. – Випуск 65. – С. 195-202.

75. Штепан, Е. В. Усовершенствование технологии и параметров перелива стали из промежуточного ковша в кристаллизатор высокоскоростной сортовой МНЛЗ: Автореф. дис. кандидата технических наук: 05.16.02 [Электронный ресурс] / Штепан Е. В.; Донецкий национальный технический университет. - Донецк, 2007. - 21 с. – Режим доступа: <https://dlib.rsl.ru/viewer/01003175196#?page=1>. – Загл. с экрана.

76. Astrem K.J., Murray R.M. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers, Published by Princeton University Press, 2008. – P. 409.

77. Bernhard C. Simulation of Internal Crack Formation in Continuous Casting of Steel // BHM, Vol. 145 (2000), Heft 1, 22-29.

78. Bolger D. Stopper Rod and Submerged Nozzle Design and Operation in Continuous Casting. 77th ISS Steelmaking Conference, ISS, Chicago, IL, 1994, Vol. 77. - P. 531-537.

79. Campbell J. Castings. The New Metallurgy of Cast Metals (2nd ed.) Butterworth-Heinemann. An imprint of Elsevier Science, Oxford, 2003. -352 p.

80. Camisani-Calzolari F., Craig Ian., Pistorius C. Mould Temperature Control in Continuous Casting for the Reduction of Surface Defects. ISIJ International, Vol. 44 (2004), No.8. - P. 1393–1402.

81. Cukierski, K. Flow control with local electromagnetic braking in continuous casting of steel slabs / K. Cukierski, B. G. Thomas // Metall. Mat. Trans., 2007. – В. 39. – No 1. - P. 94-107.

82. Dautov R., Kadyrov R., Laitinen E., Lapin A., Pieskä J., Toivonen V. On 3D Dynamic Control of Secondary Cooling in Continuous Casting Process. Lobachevskii Journal of Mathematics, 2003. - Vol. 13. - P. 3-13.

83. Dussud, Michel. Application of Fuzzy logic control for continuous casting mold level control [Электронный ресурс] / Michel Dussud, Sylvie Galichet, Laurent P. Foulloy, IEEE Transactions on control systems technology, 1998. - VOL. 6, No. 2. – P. 246-256. – Режим доступа: <http://www.pcporoje.com/filedata/691568.pdf>. – Загл. с экрана.

84. Filipič Bogdan, Laitinen Erkki. Model-based tuning of process parameters for steady-state steel casting [Электронный ресурс]. – 2005. - Informatica 29. - P. 491-496.

- Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/220166140_Model-Based_Tuning_of_Process_Parameters_for_Steady-State_Steel_Casting. - Загл. с экрана.

85. Gäumann Matthias, René Graf, Marco Gremaud. Continuous Casting Simulation. [Электронный ресурс]. - Calcom SA. Режим доступа: <https://www.yumpu.com/en/document/view/19506344/continuous-casting-simulation-esi-group>. - Загл. с экрана.

86. Girase N. U., Basu S., Choudhary S. K. Development of indices for quantification of nozzle clogging during continuous slab casting. Journal Ironmaking & Steelmaking Processes, Products and Applications. - 2007. - Volume 34. - Issue 6. – P. 506-512

87. Hangos K., Cameron L. Process modeling and model analysis, Academic press, 2001. – P. 561.

88. Hardin Richard A., Liu Kai and Beckermann Christoph. Development of a model for transient simulation and control of a continuous steel slab caster [Электронный ресурс]. Режим доступа:

www.engineering.uiowa.edu/~becker/documents.dir/mpciii.pdf. - Загл. с экрана.

89. Hattel Jesper. Numerical modelling of stresses and deformations in casting processes International ADI and Simulation Conference, May 28-30, 1997.

90. Jabri, Karim. Disturbances estimation for mold level control in the continuous casting process / Karim Jabri, Bertrand Bele, Alain Mouchette, Emmanuel Godoy, Didier Dimur // Proceedings of the Fifth International Conference on informatics in control, automation and robotics, signal processing, systems modeling and control, Funchal, Madeira, Portugal, May 11-15, 2008 – P. 119-124. Режим доступа: http://vigir.missouri.edu/~gdesouza/Research/Conference_CDs/IFAC_ICINCO_2008/ICINCO%202008/SPSMC/Short%20Papers/C3_196_Jabri.pdf. – Загл с экрана.

91. Kim, Minsung. Control of mold level in continuous casting based on a disturbance observer / Minsung Kim, SungWoong Moon, Changheum Na, Dukman Lee, Yeongsub Kueon, Jin S. Lee // Journal of Process Control, 2011. – Vol 21, Issue 7 - P. 1022– 1029.

92. S. Kumar, I.V., Samarasekera and J.K. Brimacombe. Mold thermal response and formation of defects in the continuous casting of steel billets: Part 1: Laps and Bleeds, Iron and Steelmaker (ISS Transactions), 1997. - Vol. 24 (June). - P. 53-69.

93. S. Kumar, B.N. Walker, I.V. Samarasekera, J.K. Brimacombe. Chaos at the Meniscus – the Genesis of Defects in Continuously Cast Steel Billets / PTD Conference Proceedings, Iron and Steel Society, (Warrendale, PA), 1995. - Vol. 13. - P. 119-141.

94. K.Y.M. Lai, M. Salcudean, S. Tanaka, R.I.L. Guthrie, "Mathematical modeling of flows in large tundish systems in steelmaking // Metall. Trans., 1986. - Vol. 17B. - P. 449-59.

95. K. Ogata. Modern control engineering. Prentice Hall, fourth edition [Электронный ресурс] / Ogata K. - New Jersey. - 2002. – 964 p. – Режим доступа: http://www.academia.edu/31710772/Modern_Control_Engineering_4th_Ed_Ogata.pdf. - Загл. с экрана.

96. Rajendra. T1, Rachappa Kadli2, Anil Kumar. S. Development and Implementation of Nozzle Clogging Index at Continuous Caster to Improve Length of Casting / International Journal of Recent Development in Engineering and Technology Volume 5, Issue 6, June 2016.- P. 10-14

97. Rembold Madeline, Chahin Oscar, Ross Neal, Williams Bob, O'Malley Ron. Investigation of Stopper Rod Tip Wear on a Thin-Slab Caster [Электронный ресурс] // Conference: Proc. AISTech 2014, At Indianapolis. – P. 1921-1931. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/318966567_Investigation_of_stopper_rod_tip_wear_on_a_thin-slab_caster. - Загл. с экрана.

98. Santos Carlos A., Jaime A. Spim Jr., Maria C. F. Ierardi, Amauri Garcia. The Use of Artificial Intelligence Technique for the Optimization of Process Parameters Used in the Continuous Casting of Steel. [Электронный ресурс]. - Applied Mathematical Modeling, Vol. 26. - P. 1077-1092. – Режим доступа: <https://pdfs.semanticscholar.org/ea25/2e8771dc95ed24431b62c2aa4cfa3866dbde.pdf>. - Загл. с экрана.

99. Siemens: Slab caster upgrades and modernization [Электронный ресурс]. - Millennium Steel 2010: Steelmaking and Casting. – P. 67-71. - Режим доступа: <http://www.millennium-steel.com/wp-content/uploads/articles/pdf/2010/pp67-71%20MS10.pdf>. - Загл. с экрана.

100. Thomas, Brian G. Continuous Casting: Modeling [Электронный ресурс]. - Millennium Steel 2010: The Encyclopedia of Advanced Materials (J. Dantzig, A. Greenwell, J. Michalczyk, eds.) Pergamon Elsevier Science Ltd., Oxford, UK, 2001. - Vol.2. - Режим доступа: http://ccc.illinois.edu/introduction/Dantz_Ch_rev3.doc.final.pdf. – Загл. с экрана.
101. Thomas B.G. Continuous Casting. The Encyclopedia of Materials: Science and Technology / B.G. Thomas. – Oxford (United Kingdom): Elsevier Science Ltd, 2009. – 506 p.
102. Thomas B. G. Comparison of Four Methods to Evaluate Fluid Velocities in a Continuous Slab Casting Mold / B. G. Thomas, Q. Yuan, S. Sivaramakrishnan, T. Shi, S. P. Vanka, M. B. Assar // ISIJ International, 2001. - Vol. 41. - No. 10. - P. 1266-1276.
103. Thomas B. G. Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting [Электронный ресурс] / B. G. Thomas, Zhang Lifeng. // ISIJ International, 2001. - Vol. 41. - No.10 - P. 1181–1193. - Режим доступа: https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational1989/41/10/41_10_1181/_pdf-char/en. - Загл. с экрана.
104. Thomas, B. G. Fluid flow in the mold. Chapter 14 in Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, vol. 5, Casting Volume, Editor: A. Cramb, AISE Steel Foundation, Oct. 2003, Pittsburgh, PA. – P. 14.1-14.41.
105. Triolet N. Prevention of corner cracks in slab continuous casting / N. Triolet, K. Poelmans, P. Mabelly // La Revue de Metallurgie. – 2009. – November. – P. 508–516.
106. Tsunenari K. Continuous caster design for high quality steel in Nippon Steel Corporation // K. Tsunenari, S. Shima / SEAJ Quarterly Journal. – 2009. – № 2. – P. 23–30.
107. Zhang Lifeng. Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Strand / Lifeng Zhang, Subo Yang, KaikeCai, Jiying Li, Xiaoguang Wan, Brian G. Thomas // Metallurgical and Materials Transactions, February 2007. – Vol. 38B.P. – P. 63-83.

Приложение А
Технологически регламент изменения
скорости вытягивания

Таблица А.1 - Типовой регламент изменения скорости вытягивания заготовки

Наименование	Единица измерения	Значение	Обозначение на диаграмме	Примечание
Разгон начального этапа	м/с ²	1.67e-3	P1 – P2	-
Скорость начального этапа	м/с	0.005	P2	-
Продолжительность начального этапа	сек	20	P2	Начальная скорость разливки (0.40 м/мин) сохраняется в течение этих 20сек.
Пусковой разгон	м/с ²	0.11e-3	P2 – P3	-
Пусковая скорость	м/с	0.0133	P3 – P4	-
Коэффициент разгона	м/с ²	+/-5.56e-5	P4 – P5	Ускорение, применяемое для измерения нормальной скорости
Скорость разливки	м/с	0.0267	P5-P6	-
Скорость конечного этапа	м/с	0.02	P7	
Снижение скорости при окончании серии плавков	м/с ²	-5.56e-5	P7-P8	-
Скорость конца серии плавков	м/с	0.0067	P8 – P9	В точке P8 стопор промковша закрыт. Продолжительность 120 сек

Запирающая скорость	м/с	0.0067	P9 – P10	Продолжительность разливки с данной скоростью должна равняться 150 сек
Конечный разгон	м/с ²	-1.67e-3	P10	-
Замедленная скорость	м/с	0.00333		-

Таблица А.2 - График изменения скорости вытягивания заготовки при замене стальной заготовки

Наименование	Единица измерения	Значение	Обозначение на диаграмме	Примечание
Завершение разливки i-го стальной заготовки	м/с	0.02	P1 – P2	Длительность этапа 5-10 мин
Снижение скорости	м/с ²	-5.56e-5	P2-P3	-
Скорость этапа замены	м/с	0,0067	P2	-
Продолжительность замены стальной заготовки	сек	≤120сек	P3-P4	-
Разгон до нормальной скорости	м/с ²	0.11e-3	P4-P5	Длительность этапа 1 мин.-
Скорость разливки	м/с	0.02	P5	-

Приложение Б

Программа задания исходных данных конфигурации МНЛЗ

```

clc;
clear all;
%%% Константы
m=0.96;           % коэффициент расхода
g=9.80665;       % Ускорение свободного падения, м/с2
ro=7069;         % Плотность стали, кг/м3

%%% Стальковш на 220 т
M=220;           % Масса металла, т
Rmax=3640/(2*1000); % Верхний диаметр сталь ковша на 220 тон, м
Rmin=2730/(2*1000); % Нижний диаметр сталь ковша на 220 тон, м
H=4850;         % Высота стальковша, мм
Hmax=(H-640-400)/1000; % Максимальное значение высоты металла в стальковше на 220
тон, м
Mm=M*1000;      % Масса металла, кг
Vm=Mm/ro;       % Объем металла, м3
r=41/(2*1000); % Диаметр выходного отверстия, м
Tx=4; % время полного перемещения плиты затвора, с
Skz=pi*r^2; % max значение проходного сечения, м
dR=(Rmin^3+3*Vm*(Rmax-Rmin)/(pi*Hmax))^(1/3)-Rmin;
Hs=Hmax/(Rmax-Rmin)*dR;
k1=0.15;

%%% Промковш
L2=1.5; % длина основания промковша
W2=0.345; % ширина основания промковша
Hmaxp=0.00001; % начальный уровень металла в ПК
beta=100*pi/180; % угол наклона стенок ПК
Hmax1=1.3; % оптимальное значение высоты металла в промковше, м
Hmax2=1.6; % Максимальное значение высоты металла в промковше, м
R2=Hmaxp*tan(beta-pi/2);
R22=Hmax2*tan(beta-pi/2);
W1=W2+2*R22;
L1=L2+2*R22;
rp=0.082/2; % Радиус выходного отверстия, м
Sp=pi*rp^2; % площадь выходного отверстия, м^2
Hcm1=7*10^-3; % "рабочая" высота поднятия стопора, м

%%% Параметры стопора
% alpha=127/50; % конусность=диаметр конуса/высоту
Db=82*10^-3;
Rs=50*10^-3;
D=127*10^-3;
d=51*10^-3;
l1=50*10^-3;
alpha2=atan((D-d)/(2*l1));

```

```

hp=25*10^-3; %м
%% Задание характеристики стопора S(h)
l=25*10^-3; %м
h=0:0.0001:1;%высота поднятия стопора, м
S=pi*sin(alpha2)*h.*(h.*tan(alpha2)+Db+Rs*(1-cos(alpha2)));
k_v=0.2; % скорость поднятия стопора, м/с
Qmaxp=Sp*m*sqrt(2*g*Hmax2) - %max flow

%% Кристаллизатор
Skp=1*0.26; % площадь сечения, м^2
Lkp=0; % начальный уровень металла, м
Lmaxl=0.9; % заданный уровень металла в кристаллизаторе, м
V_out=1.6/60; % скорость вытягивания, м/с

%% Компенсатор
K1=0.21137;
K3=1/Skp;
Kv=1;
Kcom=0.27;

```

Приложение В

Подпрограмма настройки параметров
регулятора уровня металла в проковше

```

clc;
close all;
set_param('first1','IgnoredZcDiagnostic','none');
set_param('first1','MaxConsecutiveZCsMsg','none');
set_param('first1','AlgebraicLoopSolver','LineSearch');
warning off
i=0;
bad1=zeros(1,4)';
good1=zeros(1,4)';
for P=-5:1:25
    i=i+1;
    sim('first1');

    if((0.895<=Lk1(end) && Lk1(end)<=0.905))
        [tpp,Q,N]=time_tp(Lk1,time);
        if tpp<50 && Q<3 && N<2 && max(Es)==0 && min(Es)==0
            good1=[good1 [P;tpp;Q;N]];

        else bad1=[bad1 [P;tpp;Q;N]];
            disp ('усл.не вып. ');
        end
    else
        bad1=[bad1 [P;0;0;0]]
    end
end
figure(2)
plot(bad1(1,:),'o');
hold on;
plot(good1(1:,:),'+');
xlabel('Nπ/π');
ylabel('Kp');
grid on;
legend('Ограничения не выполнены', 'Область допустимых значений');

```

Приложение Г

Подпрограмма настройки параметров регуляторов уровня металла в
кристаллизаторе

```

clc;
close all;
set_param('first1','IgnoredZcDiagnostic','none');
set_param('first1','MaxConsecutiveZCsMsg','none');
set_param('first1','AlgebraicLoopSolver','LineSearch');
%%% П-Регулятор
i=0;
bad2=zeros(1,4);
good2=zeros(1,4);
for P=-5:1:25
    k=k+1;
    sim('first1');

    if ((Lmax1-0.005<=Lk1(end) && Lk1(end)<= Lmax1+0.005))
        [tpp,Q,N]=time_tp(Lk1,time);
        if tpp<50 && Q<3 && N<2 && max(Es)==0 && min(Es)==0
            good2=[good2 [P;tpp;Q;N]];
        else bad2=[bad2 [P;tpp;Q;N]];
            disp ('усл.не вып. ');
        end
    else
        bad2=[bad2 [P;0;0;0]]
    end
end
figure(1)
plot(bad2(1,:),'o'); hold on;
plot(good2(1,:),'+');
xlabel('Nп/п');
ylabel('Кр');
grid on;
legend('Ограничения не выполнены','Область допустимых значений');

%%% ПИ-регулятор
Bad3=zeros(1,5);
good3=zeros(1,5);
z=0;
for P=1:0.25:7
    for I=0.05:0.5:25
        z=z+1;
        sim('first1');
        if ((Lmax1-0.005<=Lk1(end) && Lk1(end)<= Lmax1-0.005) && min(Lk1)> Lmax1-0.01)
            [tpp,Q,N]=time_tp2_pi(Lk1,time);
            if tpp<1 && Q<0.25 && N<2 && max(Es)==0 && min(Es)==0
                good3=[good3 [P;I;tpp;Q;N]];
            else bad3=[bad3 [P;I;tpp;Q;N]];
        end
    end
end

```

```

    end
  end
end
end
figure(2)
plot(bad3(1,:),bad3(2,:),'o'); hold on;
plot(good3(1,:),good3(2,:),'+');
xlabel('Kp');ylabel('Ki');
grid on;
legend('Ограничения не выполнены', 'Область допустимых значений');

%%
function [tpp,Q,N]=time_tp2_pi(y,t)
% The timing of the transition process and the overshoot
n=length(y);
M(1)=1;
N=0;
p=0;
for k=2:n;
if (y(k)>=Lmax1*0.999)&&(y(k)<= Lmax1*1.001)
    M(k)=1;
end

if (y(k)<= Lmax1*0.999)|| (y(k)>= Lmax1*1.001)
    M(k)=0;
end

if M(k)==1 && M(k-1)==0
    p=k;
end

if (y(k)> Lmax1*1.0001)&&(y(k-1)< Lmax1*1.0001)|| (y(k)< Lmax1*0.9999)&&(y(k-1)>
Lmax1*0.9999)
    N=N+1;
end

end
% transient time tpp
if (p==0 && y(n)~= Lmax1)
    tpp=100;
else
    tpp=t(p)-20;
end;
%tpp=t(p);
% overshoot
Q=(abs(min(y)- Lmax1)/ Lmax1)*100;

```

Приложение Д

Техническая реализация системы автоматического управления уровнем металла в кристаллизаторе МНЛЗ

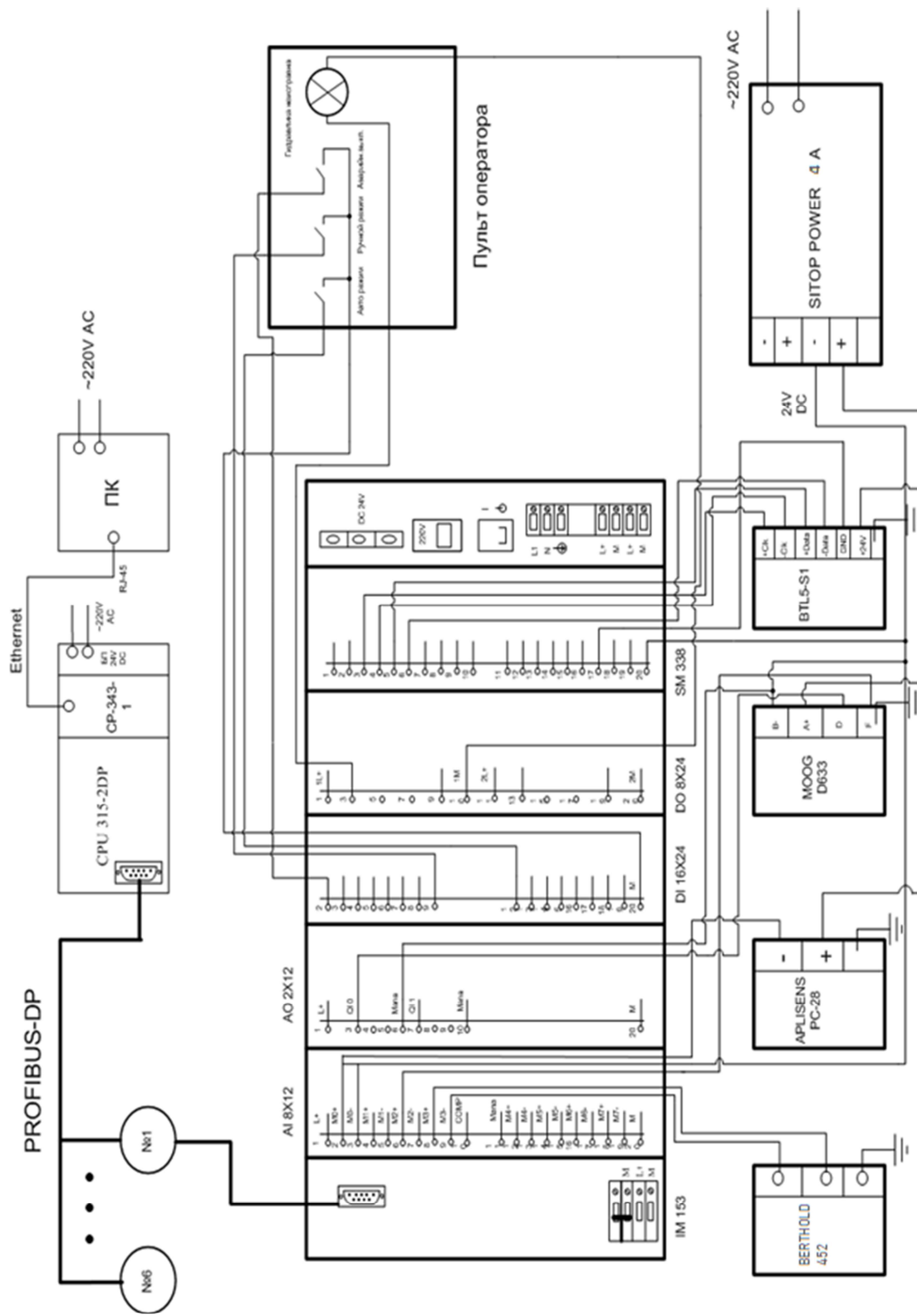


Рисунок Д.1 – Принципиальная схема подключения датчиков и исполнительных механизмов

Приложение Е

Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

№ _____
На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Волуевой Ольги Сергеевны на тему: «Модифицированная система автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в научно-исследовательскую работу ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Волуевой О.С., а именно: программное обеспечение, позволяющее исследовать динамические режимы работы, выполнять оперативную оценку и управление процессами последовательного перелива технологического процесса непрерывной разливки стали; алгоритм поиска настроек параметров регуляторов для рассматриваемого класса объектов с учетом необходимого качества переходных процессов; методика синтеза статического компенсатора с переменным коэффициентом компенсации были использованы при выполнении научно-исследовательских работ № 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» в 2005-2016 гг.

Проректор по научной работе
ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»,
д.т.н., профессор

Ю. Ф. Булгаков

Начальник научно-исследовательской части
ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»
д.т.н., доцент

А.Л. Сотников

Заведующий кафедрой «Автоматика и телекоммуникации»
ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»,
к.т.н., профессор

В.В. Турупалов



ул. Россини, 3/16, г. Донецк, 83004
 тел. 095 552 16 26
 факс 062 334 78 55
 e-mail: masterkip@ukr.net

№071443 от 19.09.2017

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Волуевой Ольги Сергеевны на тему: «Модифицированная система автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (горно-металлургический комплекс, химические технологии, электроэнергетика, транспорт, информатика и вычислительная техника) (технические науки)

Результаты диссертационных исследований Волуевой О.С. были приняты к использованию компанией «КИП СТС-Восток» при разработке проекта и программного комплекса по модернизации систем управления и контроля технологическим процессом непрерывного литья заготовок для МНЛЗ. В частности:

1) Рекомендации к структуре разрабатываемой модифицированной системы автоматического управления стабилизацией металла в кристаллизаторе в нестационарных режимах работы МНЛЗ, зависящих от режима разлива заготовок.

2) Алгоритм настройки параметров регуляторов в различных режимах функционирования МНЛЗ с учетом технологического регламента и требуемого качества стабилизации уровня металла в кристаллизаторе

3) Компонент аппаратно-программного комплекса, предназначенный для оценки изменения пропускной способности канала дозирования жидкой стали в кристаллизаторе и последующего ее анализа и телеметрии.

Директор



Витушинский С.Д.





**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

№ _____

На № _____

Диссертационный совет Д 01.024.04
при ГОУВПО «Донецкий национальный
технический университет»

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Волуевой Ольги Сергеевны на тему: «Модифицированная система автоматического управления стабилизацией уровня металла в нестационарных режимах литья заготовок», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в учебный процесс ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

Результаты диссертационных исследований Волуевой О.С., а именно: динамическая математическая модель технологического процесса непрерывной разливки стали на участке «стальковш-кристаллизатор», основанная на комплексном рассмотрении материальных балансов; алгоритмы настройки параметров регуляторов в соответствии с режимами функционирования; методика синтеза статического компенсатора с переменным коэффициентом компенсации; структура и комплекс технических средств модифицированной системы автоматического управления стабилизацией уровня металла в кристаллизаторе в нестационарных режимах литья заготовок на основе современных промышленных контроллеров внедрены в учебный процесс при чтении курсов лекций по дисциплинам «Математическое моделирование объектов и систем управления», «Современные проблемы теории управления», «Интеллектуальные системы управления», «Компьютерные технологии управления в технических системах» для студентов направления подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах» (магистерская программа «Управление и информатика в технических системах»), что отражено в учебных программах вышеуказанных дисциплин.

Проректор по научно-педагогической работе
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

А.А. Каракозов

Начальник учебного отдела
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой «Автоматика и телекоммуникации»
ГОУ ВПО «Донецкий национальный
технический университет», профессор

В.В. Турупалов