

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»

На правах рукописи

Слюта Марина Олеговна



УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПРОСТРАНСТВЕННО-
РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ
РЕГУЛЯТОРОВ НА ПРИМЕРЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Бахтин А.В.

Санкт-Петербург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ПРИМЕРЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	12
1.1 Исследование технологического объекта с пространственно-распределенными параметрами на примере бумагоделательной машины.....	12
1.2 Анализ технологических параметров бумажного полотна.....	18
1.3 Обзор экономических показателей при эксплуатации систем управления поперечным профилем бумажного полотна.....	22
1.4 Исследование технологического процесса производства бумаги на Кондопожском целлюлозно-бумажном комбинате.....	24
1.5 Обоснование необходимости управления основными технологическими параметрами бумаги по ширине полотна.....	28
1.6 Выводы к Главе 1.....	29
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ ПО ШИРИНЕ ПОЛОТНА.....	31
2.1 Анализ систем управления технологическими параметрами в поперечном направлении.....	31
2.2 Анализ системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна «Asea Braun Boveri».....	33
2.3 Анализ системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна «Valmet».....	39
2.4 Технология измерения параметров по ширине бумажного полотна.....	43
2.5 Анализ алгоритма управления технологическим процессом производства бумаги.....	46
2.6 Выводы к Главе 2.....	57
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С	

ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ПРИМЕРЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ.....	59
3.1 Постановка задачи совершенствования системы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на примере бумагоделательной машины.....	59
3.2 Обработка экспериментальных данных для построения математических моделей.....	60
3.3 Разработка математических моделей для системы управления технологическими параметрами бумаги в поперечном направлении.....	65
3.4 Выводы к Главе 3.....	70
ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ БУМАГИ.....	72
4.1 Особенности функционирования и эксплуатации исполнительных механизмов.....	72
4.2 Алгоритм формирования управляющих воздействий.....	87
4.3 Выводы к Главе 4.....	91
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ ПО ШИРИНЕ ПОЛОТНА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ.....	92
5.1 Структура и топология нейросетевых регуляторов.....	92
5.2 Анализ процесса обучения нейросетевых регуляторов.....	94
5.3 Построение структуры системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна.....	99
5.4 Реализация системы управления технологическими параметрами бумаги по ширине полотна на основе нейросетевых регуляторов.....	101
5.5 Выводы к Главе 5.....	103
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	108

ПРИЛОЖЕНИЕ А Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Акт внедрения.....	120
ПРИЛОЖЕНИЕ В Листинг программы.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Управление сложными технологическими объектами большой размерности является одной из ключевых задач на современном производстве. Целлюлозно-бумажная промышленность включает в себя большое количество сложных объектов с распределенными параметрами. Один из примеров такого производства представляет собой процесс изготовления бумажного полотна на бумагоделательных машинах.

Качество бумаги является ключевым фактором, определяющим стоимость продукции. Нестабильность параметров качества, таких как масса квадратного метра и влажность, снижает выход высокосортной продукции и может вызывать простои оборудования. Оптимизация производства с обеспечением стабильных показателей качества открывает перспективы для рационального использования ресурсов всего технологического цикла.

Данный подход позволяет достичь комплексного улучшения производственных показателей за счет минимизации обрывов бумажного полотна, сокращения холостой работы оборудования, снижения доли брака и уменьшения вероятности аварийных ситуаций. Экономия сырья достигается поддержанием оптимальных уровней влажности и сухого веса в рамках установленных допусков.

Обеспечение высокой точности управления требует использования моделей с высокой степенью адекватности. Традиционные математические модели требуют постоянной корректировки из-за меняющихся условий эксплуатации и демонстрируют тенденцию к накоплению погрешности.

Перспективным решением является разработка интеллектуальной системы на базе нейронных сетей. Такая модель обладает свойством постоянной актуализации благодаря непрерывному обучению в процессе функционирования оборудования. Нейронные сети позволяют реализовать модели произвольной сложности для комплексного управления качественными показателями бумажного полотна.

Внедрение нейронных сетей в производство требует решения комплекса методологических и практических задач: разработка методов и моделей формирования информативных обучающих выборок, методов оптимизации архитектуры нейронных сетей, настройки алгоритмов обучения и разработки комплексной системы управления, учитывающей многомерность объекта и обеспечивающей интеграцию с существующим оборудованием. Решению этих актуальных проблем и посвящена данная научная работа.

Степень разработанности темы исследования

Производство бумаги представляет собой комплексный технологический процесс, характеризующийся высокой степенью сложности и взаимозависимости параметров. Фундаментальные аспекты бумажного производства были детально исследованы и освещены в трудах выдающихся ученых Д.М. Фляте, Д.А. Кларк, С.Н. Иванов и др.

Значительный вклад в развитие систем с искусственным интеллектом внесли отечественные исследователи Д.А. Поспелова, А.Н. Аверкина, И.З. Батыршина, В.И. Васильева, А.Г. Александрова и др. Зарубежные ученые, такие как Л. Заде, Э. Мамдани, Р. Ягер, М. Сугэно, Т. Такаги, Т. Танаки, А. Пегат, С. Хэйкин, Д. Ульман и др. внесли существенный вклад в развитие теории нечетких множеств, нейронных сетей и других методов искусственного интеллекта.

Анализ открытых источников информации свидетельствует об отсутствии данных об использовании методов искусственного интеллекта в системах управления качественными показателями бумаги на целлюлозно-бумажных производствах. Это обусловлено, в частности, коммерческой тайной и закрытостью алгоритмов, используемых в промышленных системах управления. Однако в научной литературе представлен ряд исследований, в частности, работы А.В. Бахтина и М.С. Ревунова, в которых изложены концептуальные подходы к применению нейронных сетей, методов экстремального и нечеткого управления для повышения эффективности автоматизированных систем управления процессами формирования бумажного полотна.

Цель диссертационного исследования – разработка способов управления и алгоритмов повышения точности управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами.

Идея – обеспечить высокоточную стабилизацию технологических параметров по ширине бумажного полотна за счет разработки системы управления на основе нейросетевых регуляторов.

Объект исследования – система управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна.

Предмет исследования – структура и алгоритмы системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна.

Для достижения указанной цели было необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ производственного процесса с целью создания концептуальной модели технологического объекта с пространственно-распределенными параметрами.

2. Разработать алгоритм и соответствующее программное обеспечение для реализации системы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе нейросетевых регуляторов на примере стабилизации технологических параметров бумажного полотна.

3. Разработать алгоритм применения управляющих воздействий, обеспечивающий наилучшее положение исполнительных механизмов для увеличения их запаса по регулированию.

4. Оценить качество функционирования системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна на основе нейросетевых регуляторов.

Научная новизна

1. Научно обоснован способ управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе системы нейросетевых регуляторов.

2. Предложены алгоритмы управления технологическими параметрами по ширине бумагоделательной машины с использованием системы нейросетевых регуляторов и реализацией программного обеспечения.

3. Разработан алгоритм формирования управляющих воздействий, обеспечивающий положение исполнительных механизмов с минимально возможным отклонением от среднего значения и учетом запаса до предельных значений управления.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам:

5. «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами».

6. «Научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами».

12. «Методы создания специального математического и программного обеспечения, пакетов прикладных программ и типовых модулей функциональных и обеспечивающих подсистем АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая управление исполнительными механизмами в реальном времени».

Методы исследования. При решении поставленных задач были проведены экспериментальные исследования на объекте, были использованы методы и алгоритмы обучения нейронных сетей, математическое моделирование, методы математической статистики и компьютерного моделирования. При разработке программного обеспечения применялись методы объектно-ориентированного программирования.

Теоретическая значимость:

Решение задачи реализации системы управления распределенным объектом с большим количеством взаимосвязанных технологических параметров на основе нейросетевых регуляторов.

Практическая значимость:

1. Разработанный программно-аппаратный комплекс, базирующийся на предложенных методах и алгоритмах, обеспечивает возможность эффективной подготовки операторов бумагоделательных машин и создает предпосылки для успешного импортозамещения систем управления технологическими процессами в целлюлозно-бумажной промышленности.

2. Разработана инновационная система управления, стабилизирующая с высокой точностью значения параметров массы 1 м^2 , влажности и толщины с целью рационального использования сырьевых ресурсов при сохранении высоких качественных характеристик готовой продукции.

3. Результаты работы внедрены в деятельность АО «Кондопожский ЦБК» от 20.06.2025 г. (Приложение Б).

Положения, выносимые на защиту:

1. Предложенный способ и алгоритмы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе системы нейросетевых регуляторов на примере бумагоделательной машины позволяют уменьшить отклонения технологических параметров процесса в пределах 5 %.

2. Алгоритм формирования управляющих воздействий обеспечивает наилучшее положение исполнительных механизмов для увеличения их запаса по регулированию.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждена проведенным компьютерным моделированием с использованием реальных данных целлюлозно-бумажного комбината и подкреплена апробацией основных теоретических положений в статьях и докладах на научных конференциях. Полученные в диссертационной работе результаты не противоречат данным, представленным в литературе.

Апробация работы проведена на 9 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 5 международных. За последние 3 года принято участие в 7 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

1. IV Международная научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов ЦБП «Современная целлюлозно-бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения» (14-15 ноября 2022 г., г. Санкт-Петербург).

2. II Международная научно-практическая конференция на английском языке «Теория и практика современной науки: взгляд молодежи» (24 ноября 2022 г., г. Санкт-Петербург).

3. XV Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития систем автоматизации и управления» (28-29 апреля 2023 г., г. Санкт-Петербург).

4. V Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS 2023) (26-28 сентября 2023 г., г. Санкт-Петербург).

5. XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей «Проблемы и перспективы развития систем автоматизации и управления» (15 апреля 2024 г., г. Санкт-Петербург).

6. XII Всероссийская научная конференция «Системный синтез и прикладная синергетика» (23 – 29 сентября 2024 г., пос. Нижний Архыз).

7. XVI Всероссийская научно-практическая конференция студентов, магистрантов, аспирантов и преподавателей «Проблемы и перспективы развития систем автоматизации и управления» (22 апреля 2025 г., г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора состоит в исследовании систем управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на примере целлюлозно-бумажной промышленности, в анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме диссертационного исследования, в разработке алгоритмов функционирования взаимосвязанной системы управления технологическими параметрами по ширине бумажного полотна, построении системы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе нейросетевых регуляторов на примере целлюлозно-бумажной промышленности и последующей ее реализации с

помощью специализированного программного обеспечения, а также апробации достигнутых результатов и подготовке публикаций.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 8 печатных работах (пункты списка литературы № 2, 3, 5, 6, 24, 34, 60, 75), в том числе в 3 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (пункт списка литературы № 30, Приложение А).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 5 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования, и содержит 3 приложения. Диссертация изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 69 рисунков.

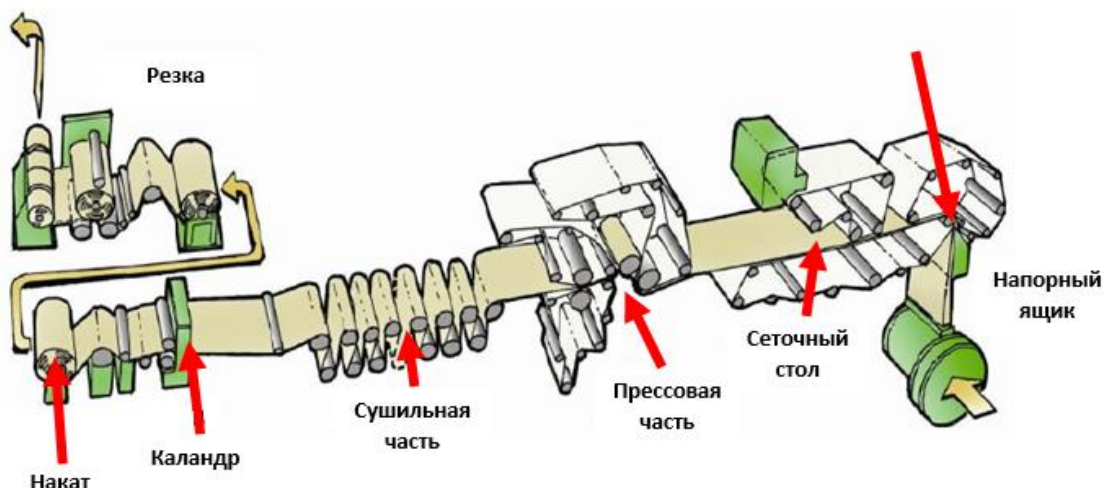
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ПРИМЕРЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

1.1 Исследование технологического объекта с пространственно-распределенными параметрами на примере бумагоделательной машины

Производство бумаги представляет собой сложный многостадийный технологический процесс, сочетающий в себе как традиционные методы, сформированные многовековой историей бумажного производства, так и современные инновационные решения, направленные на повышение эффективности и качества конечного продукта. Данная глава посвящена комплексному анализу технологического процесса изготовления бумаги с учетом современных тенденций развития целлюлозно-бумажной промышленности.

В данной главе также рассматриваются основные технологические параметры, влияющие на формирование ключевых показателей качества бумаги, и анализируются существующие методы их контроля и регулирования. Особое внимание уделяется проблеме обеспечения равномерности показателей качества по ширине бумажного полотна, что представляет собой одну из наиболее сложных задач в современном бумажном производстве.

На рисунке 1.1 представлена типовая схема плоскосеточной бумагоделательной машины (БДМ). Общая технологическая схема бумажного производства в упрощенном виде представлена на рисунке 1.2 [19].



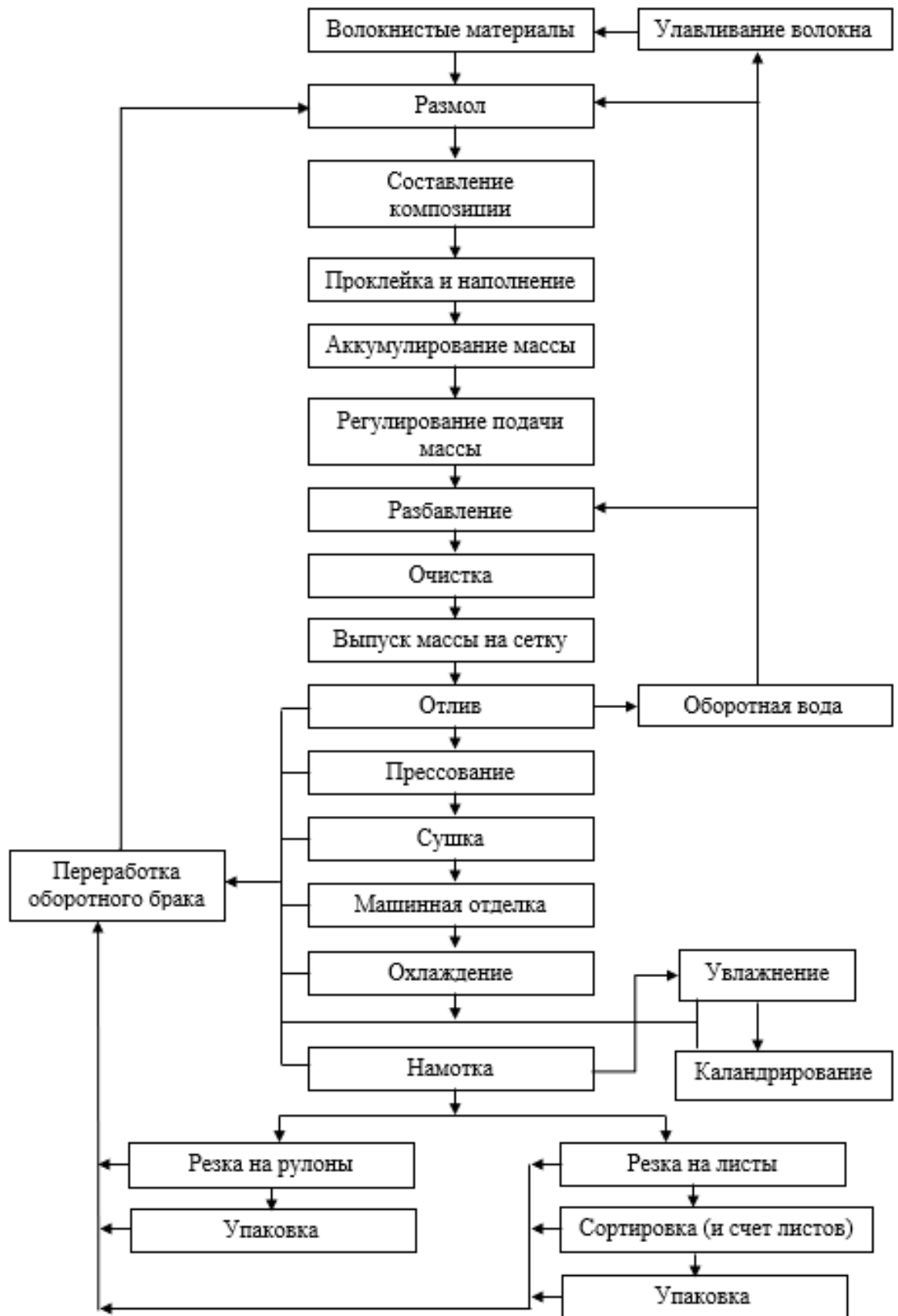


Рисунок 1.2 – Общая технологическая схема бумажного производства [19]

Современное оборудование для производства бумаги включает в себя напорную систему подачи массы, формирующий сеточный узел, комплекс прессовых

устройств, сушильный блок и каландровую установку. Рабочая ширина таких агрегатов может превышать 8 метров, при этом производственная скорость составляет 800-1000 м/мин.

Конструкция сеточного стола бумагоделательной машины состоит из грудного вала, регистровой секции с гидропланочными элементами, влажных вакуумных камер, отсасывающего гауч-вала и валов для ведения сетки.

Напорный ящик оснащен накладками из полимерного материала. Его размещение направлено на регулирование процесса дегидратации на начальном участке сеточного узла и оптимизацию процесса создания бумажного листа. В зоне регистрации машины размещены комплекты гидравлических планок.

Сеточный узел представляет собой критически важный компонент бумагоформирующего агрегата, где осуществляется создание бумажного листа из разведенной волокнисто-водной смеси. Характеристики готовой продукции существенно определяются параметрами подачи массы на сеточную поверхность и режимами дренирования на ней. Подачу массы на сетку реализуют напорные механизмы, а создание бумажного листа обеспечивается конфигурацией сеточной конструкции машины и режимами ее функционирования [17].

Напускные механизмы предназначены для обеспечения равномерного распределения бумажной суспензии, поступающей на формирующую сетку. Основная функция данных устройств заключается в расширении потока волокнистой массы до полной ширины сеточного полотна с одновременным обеспечением однородности по концентрации, устранением агломерации волокон и турбулентных завихрений, формированием струи под определенным углом и с заданной скоростью относительно движения сетки, при исключении образования поперечных потоков.

Решение указанных задач достигается посредством системы подачи массы к формирующему столу. Изменения массы квадратного метра бумажного полотна в поперечном направлении коррелируют с геометрией выпускной щели. Следовательно, выходная насадка должна обладать достаточной жесткостью конструкции и обеспечивать возможность плавной регулировки раскрытия щели

по всей ширине оборудования. Волокнистая суспензия должна подаваться на сетку равномерным потоком, ориентированным преимущественно параллельно направлению движения сетки, без образования видимых струй и разбрызгивания [2].

Для большинства типов картонно-бумажной продукции ключевыми техническими характеристиками выступают: удельная поверхностная плотность (масса единицы площади), содержание влаги, зольность, толщина листа, показатель белизны, гладкость поверхности, степень непрозрачности, устойчивость к излому, разрывная длина, уровень проклейки.

При производстве различных сортов бумаги в волокнистую композицию вводят разнообразные минеральные добавки: каолиновую глину, гипс, карбонат кальция, диоксид титана, сульфат бария.

Использование наполнителей обусловлено также экономическими факторами, поскольку их введение в композицию позволяет частично заместить волокнистое сырье более доступным по стоимости минеральным компонентом.

Минеральные наполнители оказывают влияние на многие физико-механические свойства бумаги: толщину, объемный вес, степень проклейки, впитывающую способность, воздухопроницаемость, механическую прочность. Степень влияния на эти показатели зависит от вида и количества вводимых наполнителей. Количественное содержание минеральных добавок определяется через показатель зольности [99].

В спецификациях высококачественных полиграфических сортов бумаги зольность включается в перечень регламентируемых технических параметров наравне с удельной массой и содержанием влаги.

Оптические характеристики бумажной продукции включают степень белизны, цветовые параметры, гляцевость, светопропускание, просветность и прозрачность. Несмотря на то, что не все данные характеристики подлежат стандартизации, а автоматизированный мониторинг некоторых из них представляет значительные технические сложности, указанные параметры существенно влияют на потребительские качества премиальных сортов бумаги.

Значительная часть этих показателей не поддается непрерывному измерению в процессе изготовления бумаги или картона, что исключает возможность их прямого регулирования на бумагоделательном оборудовании. Лабораторные методики анализа остаются единственным доступным способом контроля многих технических характеристик.

Прогресс в сфере измерительных технологий для контроля параметров бумажной продукции способствует постепенному увеличению количества автоматизированных измерительных устройств и, как следствие, формированию комплексов автоматизированного регулирования характеристик бумажного материала.

В ходе бумагоделательного процесса параметры качества, фиксируемые в машинном и поперечном направлениях, характеризуются нестабильностью. На бумагоделательной машине при отсутствии автоматизированного регулирования производственного процесса приблизительно 40 % вариаций качественных параметров приходится на машинное направление, аналогичная доля - на поперечное, а оставшиеся 20 % представляют высокочастотные флуктуации показателей в машинном направлении.

Абсолютное исключение данных флуктуаций посредством автоматизированных средств недостижимо вследствие неустранимых ограничений по диапазону фильтрации помех, характерных для любых автоматизированных систем регулирования независимо от принципов их технического исполнения. Тем не менее, применение автоматизированного управления позволяет снизить до 50 % низкочастотных вариаций технических характеристик в машинном направлении.

До середины 1970-х годов автоматизированное регулирование веса бумаги, влагосодержания, зольности и каландрированности в автоматизированных системах управления бумажным производством реализовывалось преимущественно для минимизации отклонений данных характеристик в машинном направлении, что само по себе гарантировало существенную экономическую отдачу от внедрения средств автоматизации.

Первые опыты по автоматическому регулированию поперечного профиля массы 1 м^2 и содержания влаги с аналоговыми регуляторами были в 1960-е гг., но для разработки современных быстродействующих систем управления бумагоделательными машинами потребовалось несколько десятков лет.

Основными этапами создания бумаги на бумагоделательных машинах по производству печатных бумаг являются [70]:

- предмашинная подготовка бумажной массы осуществляется путем подачи бумажной массы из машинного бассейна на многоступенчатые установки вихревой очистки, последующая подача отсортированной массы в баки деаэраторы для вакуумной очистки бумажной массы, разбавление массы до заданной концентрации;

- напорный ящик (НЯ) для регулирования профиля, концентрации, давления и скорости выпуска бумажной массы на формующую сетку;

- просвет и однородность бумаги зависят от равномерного распределения волокон и наполнителей, поэтому конструкция и работа напускных устройств играют очень значительную роль в выпуске качественной бумаги;

- сеточное формующее устройство, обеспечивает формирование бумажного полотна, начальную стадию обезвоживания, обрезку остаточных кромок бумажного полотна спреями высокого давления;

- прессовая часть, обеспечивает обезвоживание бумажного полотна до заданных значений влажности, достижение достаточной прочности во влажном состоянии, отделение полотна от сукна и его передача на следующие прессы и на сушильную часть. Мокрое прессование имеет явное влияние на свойства бумаги, ввиду этого геометрия прессы, валы, покрытия валов и применяемые комбинации линейных давлений имеют большое влияние на конечный результат обезвоживания и формирования бумажного полотна;

- сушильная часть обеспечивает полный цикл сушки бумажного полотна на сушильных цилиндрах. Высокая температура сушильных цилиндров обеспечивается подачей пара в цилиндры и отводом конденсата из сушильных цилиндров. Так же в сушильной части присутствуют вакуумные перфорированные

валы и вакуумные головки, обеспечивающие более плотное прилегание бумажного полотна к валам для снижения обрывности;

- каландрирование осуществляется для повышения гладкости и выравнивания профиля толщины, шероховатости, пористости, глянца бумажного полотна. Термовал с периферическими рассверленными отверстиями для циркуляции теплоносителя, теплота от термовала повышает пластичность поверхности бумажного полотна и способствует процессу каландрирования;

- намотка бумажного полотна на накате обеспечивает равномерную плотную намотку бумаги в тамбуры и последующую отправку бумажного полотна на продольно-резательные станки [53].

1.2 Анализ технологических параметров бумажного полотна

Для различных сортов бумаги основными параметрами качества считают вес 1 м², влажность, зольность, толщина, белизна, гладкость, сопротивление излому, разрывная длина, уровень проклейки [82].

Для печатной бумаги масса 1 м², влагосодержание и толщина рассматриваются как ключевые показатели качества по причинам, которые будут рассмотрены далее, хотя классификация технических свойств бумаги на основные и второстепенные носит достаточно условный характер [12].

Для большей части видов картонной и бумажной продукции содержание влаги и массы 1 м² являются нормируемыми параметрами. Базовые научные работы, выполненные российскими и зарубежными исследователями, демонстрируют значительное влияние толщины бумажного материала на механические, эксплуатационные и оптические свойства готовой продукции [19].

Необходимость производства однородной бумажной продукции определяется не только запросами потребителей бумаги и типографских компаний. Обеспечение стабильного технологического процесса становится невозможным при существенных колебаниях толщины бумажного материала, что приводит к увеличению частоты разрывов полотна, снижению качества равномерной и плотной намотки в рулоне, росту количества внутрирулонных повреждений.

Повышенные значения толщины бумажного полотна приводят к увеличению потребления сырья, следовательно, непрерывное регулирование и мониторинг толщины полотна экономически целесообразны, поскольку обеспечивают управление процессом в нижней области допуска, установленной стандартами качества.

В результате диагностики бумажного полотна генерируется комплексный набор данных о колебаниях параметра толщины в продольном и поперечном измерениях. Использование специализированных алгоритмов цифровой фильтрации результатов измерений дает возможность извлечь из массива измеренной информации составляющие поперечных флуктуаций. Указанные показатели характеризуют вариации толщины в поперечном сечении бумажного полотна или профиль распределения параметров по ширине материала.

Структура и периодичность колебаний параметра толщины по ширине бумагоделательной машины отличаются от колебаний, которые создаются в машинном направлении. Проводимая методом дисперсионного анализа оценка колебаний толщины по длине и ширине полотна выявляет различие дисперсий толщины в поперечном и продольных направлениях, причем дисперсия в поперечном направлении, в большинстве случаев, имеет большую величину по сравнению с дисперсией в продольном направлении [2].

Влажность является ещё одним важнейшим параметром качества бумажного полотна. Влага – это обязательный компонент капиллярно-пористых материалов, к которым относится бумага. Объем влаги, находящихся в единичных волокнах, определяет на их прочность, эластичность и бумагообразующие характеристики. Объем влаги в бумаге сопряжен с ее толщиной, прочностью, усадкой и печатными свойствами. Экспериментальные исследования показали, что физико-механические свойства бумаги, включая толщину материала, деформационные характеристики при растягивающих нагрузках, устойчивость к разрыву и количество циклов изгиба до разрушения, демонстрируют положительную корреляцию с содержанием влаги в материале в определенном диапазоне значений,

в то время как прочностные показатели на продавливание и разрывные усилия снижаются при увеличении влагосодержания [31].

Финальное влагосодержание бумажного материала формируется в процессе обезвоживания и термической обработки полотна в бумагоделательной машине и характеризуется неравномерностью распределения как в поперечном, так и в машинном направлениях.

Параметр толщины бумажных материалов регламентируется техническими стандартами не для всех категорий продукции. Однако критическим фактором качества является обеспечение равномерного распределения данного показателя по всей площади материала в продольном и поперечном сечениях. Неравномерность толщины негативно влияет на качество печатного процесса и усложняет наладку полиграфического оборудования. Подобно массе единицы площади и влагосодержанию, толщина полотна может демонстрировать различную степень изменчивости в продольном и поперечном направлениях.

Помимо флуктуаций поверхностной плотности, на вариации толщины полотна воздействуют технологические режимы функционирования формующей, прессовой и сушильной секций БДМ, степень износа рабочих поверхностей прессовых валов, настройки процесса машинного каландрирования и множество дополнительных технологических параметров.

В процессе изготовления бумажных материалов малой плотности (типографской, изоляционной) особую важность представляет поддержание стабильности характеристики толщины по ширине полотна. Существенные вариации данного параметра в поперечном сечении приводят к неравномерному распределению массы при формировании рулонной продукции и провоцируют возникновение структурных нарушений: волнистости, образования складок, точечных искажений. Подобные недостатки не только снижают эстетические свойства материала, ухудшая его коммерческую привлекательность, но и вызывают серьезные проблемы при дальнейшей обработке на раскройном и полиграфическом оборудовании.

Равномерность толщинных показателей бумажной продукции по всему поперечному сечению полотна играет ключевую роль при осуществлении процедур нанесения функциональных слоев, машинного прессования и высокоинтенсивного каландрирования. Главным технологическим инструментом для обеспечения однородности толщины материала в продольном и поперечном измерениях выступает производственный каландр.

Управление толщиной по ширине полотна основывается на локальном изменении давления каландрирования и температурного режима каландровых валов.

Высокоточное управление достигается за счет температурного регулирования верхних каландровых валов посредством подвода холодного или горячего воздуха.

Регулирование технологических параметров по ширине бумажного полотна представляет собой многофакторную техническую проблему. Данный процесс предусматривает контроль трех основных параметров продукции, которые представляют собой вектора с размерностью от 60 до 115 показателей:

- масса 1 м² бумажного полотна (г/ м²);
- влажность бумажного полотна (%);
- толщина бумажного полотна (мк).

Коррекция технологических характеристик в направлении, перпендикулярном движению полотна, реализуется посредством системы актуаторов, распределенных вдоль рабочей зоны производственного агрегата. Для мониторинга всех контролируемых величин применяется унифицированная методология автоматического регулирования, алгоритм которой представлен в графической форме на рисунке 1.3.

Информация о профиле, поступающая от измерительного комплекса, проходит валидацию на достоверность. Затем производится фильтрация профильных показателей с использованием подвижного временного интервала усреднения.



Рисунок 1.3 – Структура системы со стандартным алгоритмом управления [31]

Результаты данного исследования используются для определения и настройки параметров математической модели объекта управления.

Информация о профильных измерениях и модель процесса используются управляющей системой для стабилизации флуктуаций технологических параметров в поперечном направлении бумажного полотна.

1.3 Обзор экономических показателей при эксплуатации систем управления поперечным профилем бумажного полотна

Высокие требования потребителей к качеству бумаги создают предпосылки для постоянного совершенствования систем управления технологическими параметрами по ширине полотна [4].

В первую очередь они связаны уменьшением массы 1 м^2 печатных типов бумаг. Неравномерное распределение толщины и влажности в поперечном и продольном направлениях оказывают большее влияние на качество печати тонких видов бумаг. Уменьшение колебаний массы 1 м^2 бумаги дает значительную

экономии волокнистой суспензии и химикатов, но устойчивый выпуск бумаги с постоянной пониженной толщиной возможен лишь до определенных пределов, которые можно увеличить с помощью систем автоматического управления и контроля поперечным профилем бумажного полотна. Характерными в этом отношении являются сводные данные об экономической эффективности управления профилями толщины, массы 1 м^2 и влажности полотна при одномоментном использовании технических средств для их коррекции:

- снижение брака для тонких бумаг составляет 40-60 %, для журнальных 50-70 % и других видов бумаг 15-30 %;
- сокращение расходов волокна колеблется от 1 до 5 %;
- экономия ресурсов на сушке составляет от 2 до 8 %;
- снижение обрывности полотна на 30-50 % для всех видов бумаг;
- увеличение скорости БДМ обеспечивается на 3-12 %.

Помимо явной экономии материальных ресурсов, системы управления поперечными профилями обеспечивают ряд дополнительных преимуществ. Уменьшение величины 2σ (σ – среднеквадратическое отклонение) поперечных профилей массы 1 м^2 и влажности на 12-60 % обеспечивает производство бумаги более высокого качества, с лучшими печатными свойствами и улучшает качество мелования бумаги.

Контроль массы 1 м^2 поперечного профиля бумажного полотна позволяет уменьшить показатель 2σ на 40-55 %. Так же снижается на 40 % количество дефектов бумаги, на 1-2 % повышается скорость машины. Экономия целлюлозного сырья увеличивается до 1 %, на 15 % в среднем снижается количество обрывов бумажного полотна на бумагоделательных машинах. Управление профилем влажности за счет водовоздушных sprays приводит к снижению значений 2σ на 50 %. Для газетной бумаги происходит повышение средней влажности на 1,0-1,1 %, на 50 % снижается объем брака, на 52 % уменьшается количество обрывов в прессовой части. Применение паровых ящиков для регулирования профиля влажности позволяет уменьшить показатель 2σ в среднем на 50 %.

Использование системы регулирования профилем толщины приводит к снижению показателя 2σ на 40 %. Уменьшается брак на 60 % и число обрывов на 45 %, увеличивается средняя влажность бумаги на 2 % и увеличивается скорость машины в среднем на 0,2 % [6].

1.4 Исследование технологического процесса производства бумаги на Кондопожском целлюлозно-бумажном комбинате

Для анализа системы управления технологическим процессом производства бумаги и более детального рассмотрения этапов производства бумажного полотна в ходе преддипломной практики была изучена бумагоделательная машина № 8 на «Кондопожском ЦБК», изготовленная фирмой «Voith»:

- год пуска – 1980;
- максимальная производительность – 685 т/сутки;
- скорость – 1000 м/мин;
- обрезная ширина на накате – 8400 мм.

Приготовление целлюлозы: сульфитная целлюлоза собственного производства и сульфатная беленая целлюлоза с узла роспуска поступают в бассейн-аккумулятор целлюлозы емкостью 1000 м³ [38].

Из бассейна-аккумулятора целлюлоза с концентрацией до 3,0 % насосом подается на низковакуумный барабанный фильтр для сгущения. Количество массы, подаваемой на сгуститель, регулируется регулятором уровня в ванне фильтра. С концентрацией до 4,5 % целлюлоза после сгущения поступает далее в бассейн для переработанной целлюлозы.

При безобрывном режиме работы БДМ в гауч-мешалку, оснащенную двумя циркуляционными пропеллерными устройствами, непрерывно смываются водой краевые отвалы с сетки. Они разбавляются спрысковой водой до концентрации около 1,2 %.

Насосом суспензия, регулируемая по уровню регулятором уровня, перекачивается на дисковый фильтр. Предусмотрена подача этой суспензии на сгуститель брака.

В обрывность буммашины, то есть когда все бумполотно подается в гауч-мешалку, открывается автоматическая задвижка оборотной воды от насоса. При помощи ручного устройства управления количество воды для разбавления регулируется так, что концентрация откачиваемой массы составляет примерно 3,5 %.

При достижении верхней точки заданного уровня в бассейне автоматически включается насос брака, подающий массу в бассейн жидкого брака 1000 м³. Предусмотрена также возможность подачи брака в аккумулятор брака.

При обрыве в прессовой части бумполотно после гранитного вала падает в бассейн брака прессов, оснащенный двумя разбивательными гарнитурами, одна из которых постоянно находится в эксплуатации, а вторая включается от датчика обрыва.

При срабатывании устройства контроля обрыва автоматически открывается задвижка оборотной воды от насоса. При помощи ручного устройства управления количество воды для разбавления регулируется так, что концентрация откачиваемой массы составляет 3,5 %.

При достижении уровня в бассейне заданной верхней точки, включается насос, подающий брак в гауч-мешалку. Уровень в бассейне брака прессов регулируется регулятором уровня. При повышении уровня в гауч-мешалке включается насос, подающий брак в бассейн жидкого брака емкостью 1000 м³.

После заправки бумполотна автоматически прекращается подача воды для разбавления и останавливается насос.

При возникновении бумажного брака после последнего сушильного цилиндра или у наката он поступает в гидроразбивательную установку, оснащенную тремя постоянно работающими разбивательными гарнитурами.

При повышении уровня в гидроразбивателе приводится в действие насос, подающий массу в аккумулятор сухого брака. Уровень в гидроразбивателе поддерживается постоянным.

Гидроразбиватель постоянно находится в работе для переработки обрезков и сухого брака с продольно-резательного станка (ПРС). При достижении

определенного уровня брак автоматически откачивается насосом в гидроразбивательную установку под накатом.

Из аккумулятора сухого брака насосом с регулированием концентрации примерно до 3,5 % подается в бассейн жидкого брака 1000 м³. Насос работает в автоматическом режиме в зависимости от уровня в бассейне сухого брака.

Весь оборотный брак, получаемый на БДМ, собирается в бассейне жидкого брака 1000 м³, откуда насосами подается на сгуститель марки и далее поступает при концентрации 3,5-4,5 % в аккумулятор брака.

Компоненты бумажной массы: древесная масса, целлюлоза, брак и скоп собираются в смесительном бассейне. Регулирование количества компонентов производится в зависимости от регулирования уровня в смесительном бассейне. При изменении уровня соответственно меняется и количество массы, заданное соотношение компонентов друг другу остается постоянным.

Краситель через дозировочное устройство подается на вход насоса древесной массы. Количество красителя дозируется по норме в зависимости от количества древесной массы, подаваемой в смесительный бассейн.

Насосом масса на 5-10 % большим количеством, чем нужно для работы буммашины, перекачивается в машинный бассейн. Излишек массы возвращается через перелив в машинный бассейн, то есть уровень в машинном бассейне поддерживается постоянным за счет перелива.

После машинного бассейна масса разбавляется и регулируется до концентрации 2,8-3,1 %, при которой она подается к насосу декулатора.

Перед поступлением в напорный ящик бумажная масса разбавляется во всасывающем патрубке насоса декулатора до концентрации 0,7-0,8 %. Разбавление производится подсеточной водой и разными обратными стоками: перелив от декулатора, перелив от напорного ящика.

Бумажная масса насосом через боковой распределительный массопровод и два многотрубных патрубка подается в напорный ящик. Напорный ящик гидродинамический закрытого типа с воздушной подушкой.

Формующая секция включает двухсеточную конструкцию. Бумажная масса из напорного устройства поступает в клинообразное пространство между сетчатыми элементами, которые соединяются в области формующего цилиндра. С момента взаимодействия с сеточными поверхностями происходит активное удаление влаги под воздействием давления, создаваемого при сближении сетчатых элементов. При этом определенный объем жидкости извлекается через верхнюю сетку посредством вакуумирования через кожух формующего цилиндра. Остальная влага отводится через нижнюю сетку под воздействием центробежных сил. Последующее обезвоживание осуществляется на вакуумном сеточном столе и гауч-прессе.

Специальным пересасывающим устройством бумажное полотно отделяется от нижней сетки и транспортируется в прессовую секцию машины.

Из формующей секции бумажное полотно передается в прессовую часть посредством вакуумного пересасывающего устройства. Прессовая секция включает четыре зоны обработки давлением.

По завершении прессования бумажное полотно направляется в сушильную секцию. В данной секции извлечение влаги из бумажного материала осуществляется благодаря контактному взаимодействию с нагретыми поверхностями сушильных барабанов. В состав сушильной части БДМ входит 52 бумагосушильных цилиндра. Сушильная часть подразделяется по приводу на 5 групп и на четыре ступени нагрева по распределению пара. Для нагрева сушильных цилиндров используется пар избыточным давлением 2,5 бар. Влажность бумажного полотна 6-10 %.

На завершающем этапе сушильной секции размещается охлаждающий барабан с подачей холодной воды. При прохождении через данный барабан бумажное полотно подвергается охлаждению, после чего направляется в каландр для обеспечения машинной гладкости поверхности. Конструкция каландра предусматривает работу в шестивальном режиме.

После каландрирования бумажное полотно поступает на барабанный накат с гидравлическим прижимом рулона. Несущий барабан наката имеет максимальным

диаметр 2500 мм, по конструкции напоминает холодильный цилиндр и охлаждается водой.

Намотка бумаги производится на тамбурный валик с гидравлическим прижимом. Для получения равномерной плотности, давление между рулоном и цилиндром наката поддерживается постоянным с помощью пневмоцилиндров, поршни которых соединены с рабочими рычагами, передающими давление на тамбурный вал. Барабан наката из серого чугуна, поверхность желобчатая, шлифованная. Внутри барабана для охлаждения подается свежая вода.

1.5 Обоснование необходимости управления основными технологическими параметрами бумаги по ширине полотна

Масса 1 м² и влажность бумажного полотна являются нормируемыми показателями для абсолютного большинства видов бумаги и картона [12, 13].

При значительных колебаниях массы 1 м² нельзя создать устойчивый технологический режим ее изготовления, увеличивается число обрывов полотна, затрудняется получение ровной и плотной намотке его на накате, возрастает число внутрирулонных дефектов. Излишне высокое значение массы 1 м² приводит к перерасходу сырья для изготовления бумаги, в связи с этим точная стабилизация параметра массы 1 м² бумажного полотна экономически выгодна.

Характер и периодичность колебаний массы 1 м² бумажного полотна в поперечном направлении отличны от продольных колебаний. Проводимая методом дисперсионного анализа оценка колебаний массы 1 м² по длине и ширине полотна выявляет различие дисперсий массы 1 м² в продольном и поперечном направлениях, причем дисперсия в поперечном направлении, как правило, имеет большую величину по сравнению с дисперсией в продольном направлении.

Другой важнейшей характеристикой бумажного полотна и показателем его качества является влажность. Влага – это обязательный компонент капиллярно-пористых материалов, к которым относится бумага. Количество воды, содержащейся в отдельных волокнах, влияет на их прочность, эластичность и

бумагообразующие свойства. Содержание влаги в бумаге связано с ее массой 1 м^2 , прочностью, усадкой и печатными свойствами [1, 6].

Конечная влажность бумаги определяется процессом обезвоживания и сушки полотна на БДМ и также имеет колебания в продольном и поперечном направлениях, которые, как и колебания массы 1 м^2 , вызываются различными возмущающими факторами и носят случайный характер.

Применение современных технологий автоматизации в бумажной промышленности, построенных на базе мощных компьютерных платформ, обеспечивает возможность использования прогрессивных алгоритмов контроля качественных показателей бумажной продукции. Эти алгоритмы основываются на математическом представлении регулируемого процесса: система автоматизации задействует оптимизационные техники для выявления наиболее эффективных управляющих воздействий изначально в математической модели, а впоследствии найденные целесообразные (для актуальных условий) параметры воплощаются в реальном технологическом цикле.

Основной трудностью внедрения таких алгоритмов в системы управления производственными характеристиками является создание модели. Для создания математического описания такого процесса требуется выполнение множественных экспериментальных циклов, занимающих значительное время. В процессе исследований бумагоделательный агрегат генерирует продукцию низкого качества, что обуславливает серьезные материальные потери. Дополнительно созданная математическая модель демонстрирует тенденцию к накоплению погрешностей по причине варьирования режимов работы и свойств технологических систем.

1.6 Выводы к Главе 1

В первой главе диссертационного исследования был проведен комплексный анализ технологических основ производства бумаги, что позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Производство бумаги представляет собой сложный многостадийный процесс, включающий подготовку сырья, формирование бумажной массы, формование бумажного полотна, прессование, сушку и намотку. Каждый из этих этапов характеризуется специфическими технологическими параметрами, оказывающими существенное влияние на качество конечного продукта.

2. Анализ современных технологий производства бумаги показал, что обеспечение стабильного качества продукции требует точного контроля и регулирования множества взаимосвязанных параметров на всех стадиях производственного процесса. Особую сложность представляет управление параметрами в условиях высокоскоростного производства на широкоформатных бумагоделательных машинах.

3. Ключевыми показателями качества бумажного полотна являются масса 1 м^2 , влажность и толщина. Эти параметры взаимосвязаны и требуют комплексного подхода к их регулированию. Установлено, что неравномерность данных показателей по ширине полотна является одной из основных причин снижения качества готовой продукции.

Таким образом, проведенный анализ технологических основ производства бумаги обосновывает необходимость разработки новых подходов к управлению показателями качества по ширине полотна, основанных на применении современных интеллектуальных технологий, что будет рассмотрено в последующих главах диссертационного исследования.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ ПО ШИРИНЕ ПОЛОТНА

2.1 Анализ систем управления технологическими параметрами в поперечном направлении

Система «CD-control» (Cross Direction Control) относится к регулированию параметров бумажного полотна, измеряемыми в направлении, перпендикулярном движению листа, до заданного оператором целевого значения [15].

Управление технологическими параметрами бумаги по ширине движущегося полотна является одной из задач регулирования технологического объекта с пространственно-распределенными параметрами. Эта задача включает в себя перемещение множества исполнительных механизмов для воздействия на профиль, содержащий большое количество измерений. Существует множество ограничений, как со стороны технологического оборудования, так и со стороны оператора. На бумагоделательной машине (БДМ) количество регулируемых элементов в исполнительных механизмах обычно составляет от 50 до 200, а количество измерений в профиле обычно составляет от 300 до 1000.

Система «CD-control» также включает в себя связи между многими измеряемыми свойствами, которые влияют на качество бумажного полотна. Часто система управления «CD-control» влияет на несколько свойств, таких как влажность и толщина.

Согласно приведенному определению, «CD-control» работает с измеряемыми показателями бумажного полотна в геометрическом пространстве, исключая временную составляющую. Во многих случаях целью контроля является достижение значения, наиболее близкого к среднему, но в некоторых случаях (например, на краях бумажного полотна) нужен более сложный вид целевой функции, который может обеспечить лучшее общее качество конечного продукта. Другим ограничением является то, что некоторые исполнительные механизмы иногда могут быть недоступны для целей управления.

Регулирование поперечного распределения бумажной массы реализуется посредством механизмов профильной настройки позиционирования выпускной кромки гидравлического короба. Численность подобных устройств определяется шириной бумагоделательной машины и варьируется в диапазоне 20-60 единиц. Каждый приводной механизм обеспечивает деформацию соответствующего сегмента выпускной кромки гидравлического короба между смежными контрольными точками, воспроизводя принцип ручного регулирования. Для корректировки профиля веса используются электромеханические приводы и форсунки.

На ранних этапах эволюции технологий поперечного профилирования задействовались мануальные механизмы регулирования бумажного полотна через изменение щели кромки гидравлического бака с помощью ручных редукторных устройств, размещаемых на оболочках напорных систем. К концу 1960-х годов американское предприятие «Saint Regis Paper» внедрило систему автоматизированного управления щелью кромки напорного бака.

Дальнейшее усовершенствование данных технологий происходило преимущественно в направлении модернизации исполнительных устройств, отказа от шаговых приводов и внедрения альтернативных приводных решений повышенной надежности.

Канадскими специалистами для аналогичных задач профилирования веса был создан термогидравлический привод, обеспечивающий фиксацию установленной позиции кромки при отключении энергоснабжения или сбоях в системе управления, функционирующий по принципу гидравлического домкрата.

Фирма «Measurex» соединила электрическую систему устройства с микропроцессорным контроллером, осуществляющим термическое воздействие на все стержни кромочной части согласно требуемому профилю открытия. Расширение каждого стержня в процессе нагрева составляет максимум 2 мм. Программная система также мониторит смещения краевых участков прилегающих тяг, предупреждая разрушение выпускной пластины кромки. Предприятием

«Measurex» было выпущено более сотни таких установок для вертикальных и угловых щелевых систем [3].

Другой метод регулировки поперечного профиля внедрен в проектах американской организации «Westvaco». В установке «Hydrotrol» задействованы сопла, установленные последовательно с определенным промежутком на дистанции 0,5-1,2 м от края напорного бака. Через сопла выполняется увлажнение волокнистого покрытия на сетке для улучшения распределения массы волокон в участке после напорного бака. Организация «Measurex» сконструировала электрогидравлический интерфейс для установки «Hydrotrol».

Наиболее распространенным примером систем управления является «Valmet DNA» финской компании «Valmet Automation», где механизм представляет собой высокоточный редуктор с электроприводом. Аналогичные системы разработаны американской «AccuRay» («AccuRay 1180 MicroPlus») и австрийской «Devron Engineering» (Auto-Slice).

В современных напорных коробах серии SymFlo компании «Valmet» регулирование граммажа осуществляется интеллектуальными клапанами подачи разбавляющей воды перед потокораспределителем, расположенными поперек потока массы. Обобщенная концепция автоматизированного управления поперечным профилем массы 1 м^2 направлена на минимизацию расхождений между фактическими и целевыми значениями в различных зонах поперечного сечения по ширине бумагоделательной машины, общее число которых не превышает 900 точек [33].

2.2 Анализ системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна «Asea Braun Boveri»

Для более детального изучения системы «CD-control» была рассмотрена автоматическая система управления технологическим процессом (АСУ ТП) «AccuRay 1190» фирмы «Asea Braun Boveri» (ABB), установленная на БДМ № 8 «Кондопожского ЦБК». Схема АСУ ТП изображена на рисунке 2.1.

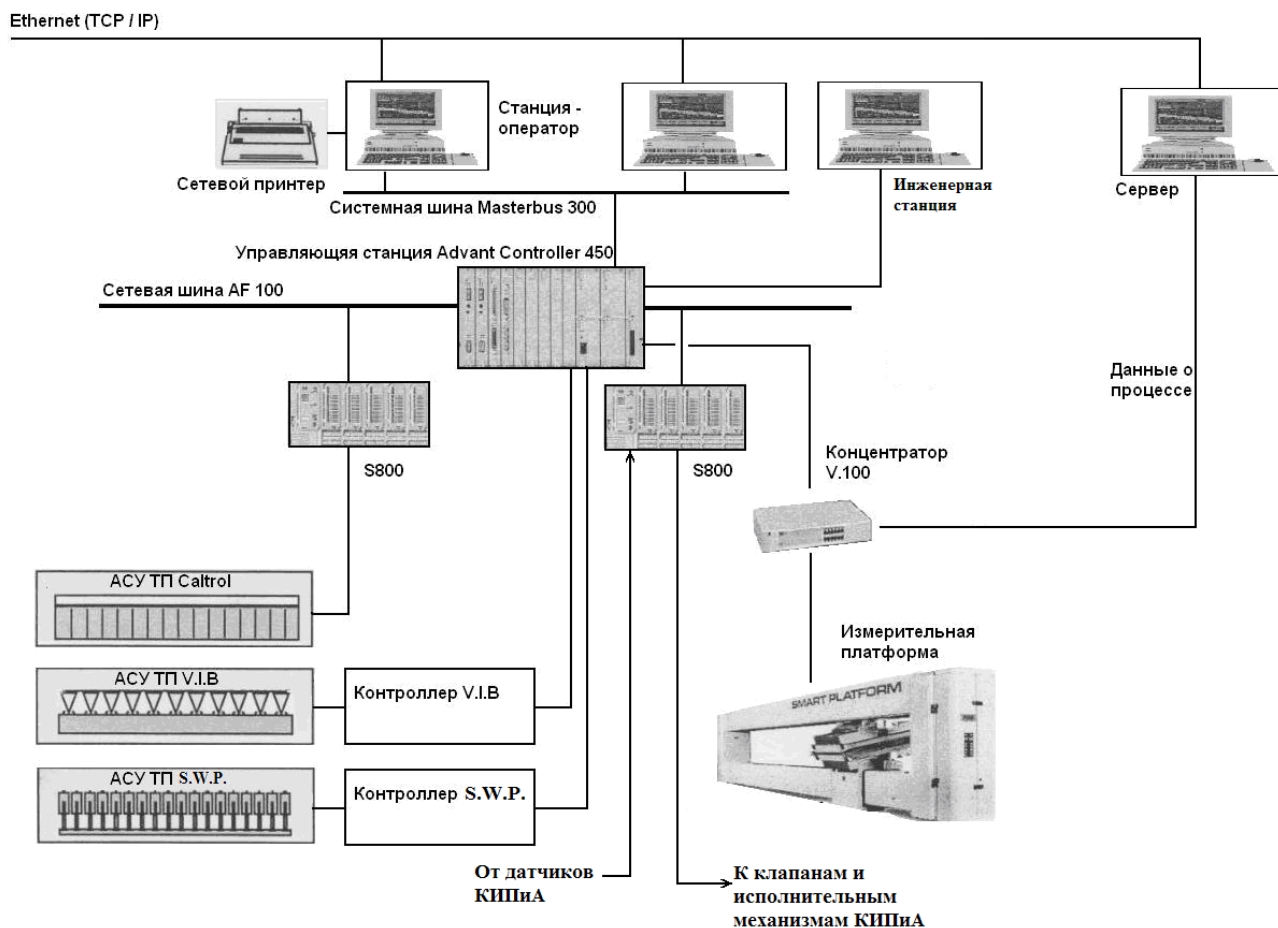


Рисунок 2.1 – Схема системы «AssuRay 1190» [17]

Система автоматического управления по технологическому принципу разделена на следующие отделения:

1. Система регулирования подготовительного отдела (управление композицией):

- регулирование поступления в машинный бассейн древесной массы, целлюлозы, бумажного брака, красителя исходя из уровня в бассейне, который является главным регулятором системы дозирования всех компонентов;
- регулирование концентрации древесной массы, целлюлозы, бумажного брака.

2. Система регулирования напорного ящика:

Регулирование общего напора в напорном ящике. Общий напор зависит от соотношения скоростей «струя-сетка». Система регулирует соотношение скоростей «струя-сетка» при постоянной скорости БДМ за счет изменения общего

напора. Сигнал управления системы подается на регулятор оборотов двигателя смесительного насоса службы электриков.

3. Система управления массой 1 м^2 в поперечном направлении «Smart Weight Profiler» (SWP):

Регуляция массы метра квадратного бумажного материала осуществляется с помощью губы напорного ящика в 64 зонах [17].

4. Система регуляции бумажного полотна в поперечном направлении относительно бумагоделательной машины «V.I.B»:

Система осуществляет управление параметром влажности за счет регулирования расхода воды и давления воздуха в 85 водовоздушных спрысках [18].

5. Система управления толщиной бумаги в поперечном направлении «Caltrol»:

Толщина бумаги регулируется за счет нагрева каландрового вала отдельно в 114 зонах электрическими грелками мощностью 1,7 кВт каждая. Данная подсистема является системой тонкой регулировки при условии нормальной работы системы управления работой каландровой батареи.

АСУ ТП «AccuRay 1190» производит:

- отображение скоростей восьми приводных групп (сетки, прессовой части, сушильных групп, каландровой батареи, наката). Данное деление сушильных групп сделано в соответствии с системой управления скоростями службы электриков;

- анализ скоростей и разности скоростей между отдельными группами. В момент обрыва выдается рапорт скоростей за последние 2 минуты с шагом 10 секунд;

- измерение веса 1 м^2 , толщины, влажности бумаги. Датчики находятся в перемещаемых по ширине полотна измерительных головках сканирующего устройства (сканера);

- сбор и отображение данных по выработке БДМ, показателей среднеквадратичного отклонения (2σ) по основным технологическим параметрам бумажного полотна.

Регулирование технологических параметров по ширине бумажного полотна системой «CD-control» включает управление следующих линеек параметров:

- масса 1 м² бумажного полотна (г/ м²);
- влажность бумажного полотна (%);
- толщина бумажного полотна (мк).

Управление профилем веса бумажного полотна осуществляется системой «Smart Weight Profiler» [17], её сетевая архитектура представлена на рисунке 2.2.

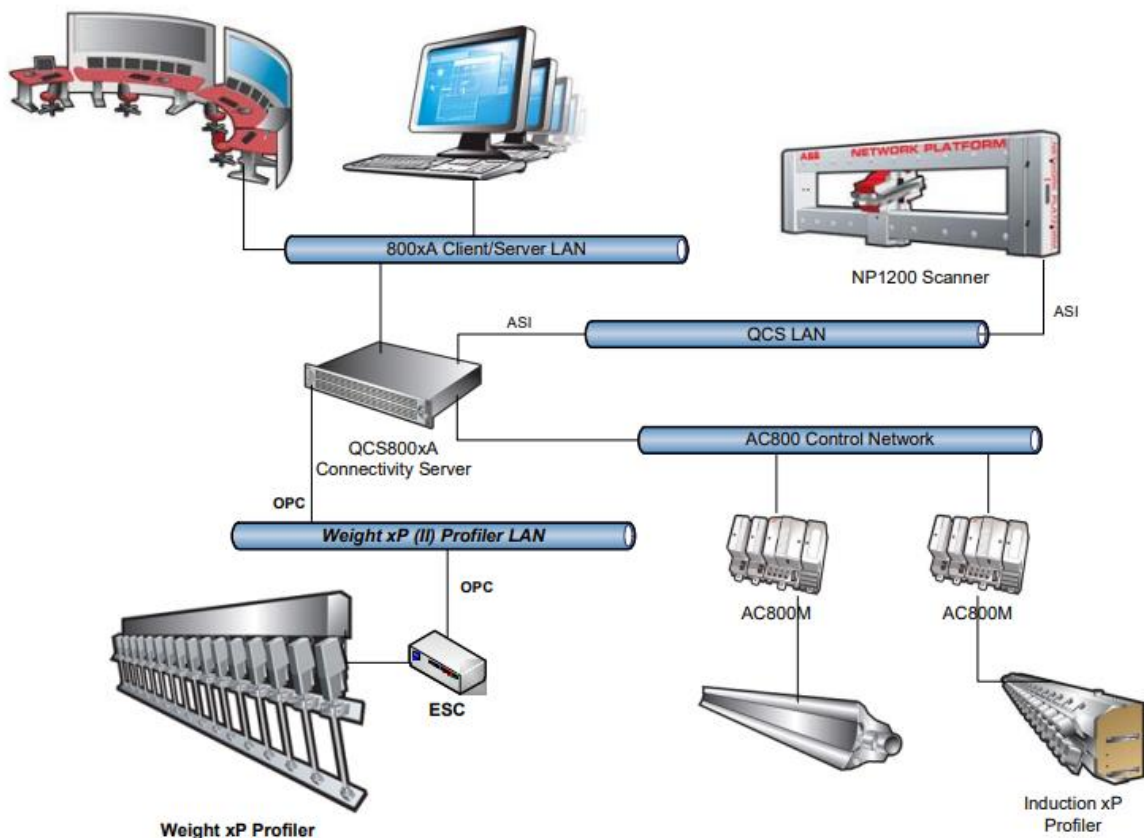


Рисунок 2.2 – Сетевая архитектура профиля веса [17]

Сетевая архитектура состоит из следующих компонентов:

- Комплекс контроля качественных показателей бумажного материала QCS (Quality Control System) на базе сканирующего оборудования создан для динамического мониторинга и корректировки параметров полотна в ходе производственного процесса в продольной и поперечной плоскостях (масса 1м², влажность, толщина, прозрачность);

- LAN (Local Area Network) – локальная сеть;
- 800×А локальная сеть клиент/сервер;

- управляющая сеть AC800 (AC800M);
- контроллер системы управления и ввода-вывода AC800M;
- локальная сеть QCS (QCS LAN);
- локальная сеть Weight xP;
- OPC (Open Platform Communications);
- ESC (Embedded System Controller) – встроенный системный контроллер.

Система SWP управляет профилем верхней губы за счет актуаторов, работающих за счёт давления воздуха. Положение каждого двигателя измеряется как положительное или отрицательное отклонение от уровня пластины датчиками линейных перемещений.

Шаговые двигатели и датчики линейных перемещений подключены к устройствам последовательного ввода-вывода (SIO). Модуль SIO представляет собой микроконтроллер 68332, имеющий 128 Кб памяти EEPROM для программного обеспечения с возможностью её перепрограммирования. Один модуль SIO управляет восемью шаговыми двигателями и принимает сигналы с восьми датчиков линейных перемещений. Все модули SIO соединяет с центром обработки (AccuRay Smart Processing Center – ASPC) один последовательный кабель. Для подключения модулей SIO в ASPC существует 2 терминала выходной мощности, к каждому из которых может быть присоединено до 10 модулей SIO.

Центр обработки, управляя приводами верхней губы, регулирует вес бумажного полотна в 64-х зонах. Основным достоинством системы SWP является быстрое и плавное изменение профиля бумаги по весу.

Для управления и контроля профилем влажности в поперечном направлении предназначена система «V.I.B» [18].

Принцип работы системы заключается в управлении увлажнением в каждой зоне бумажного полотна. Всего 85 зон. На рисунке 2.3 изображена общая схема работы системы «V.I.B».

Показания датчика влажности, расположенного на измерительной платформе (сканере), преобразованные в цифровой сигнал, поступают в главный контроллер «Advant Controller».

Производится сравнение заданного параметра с полученными, по каждой зоне. Если их значения выше или ниже исходного, то генерируется соответствующий сигнал контроллеру «V.I.B».

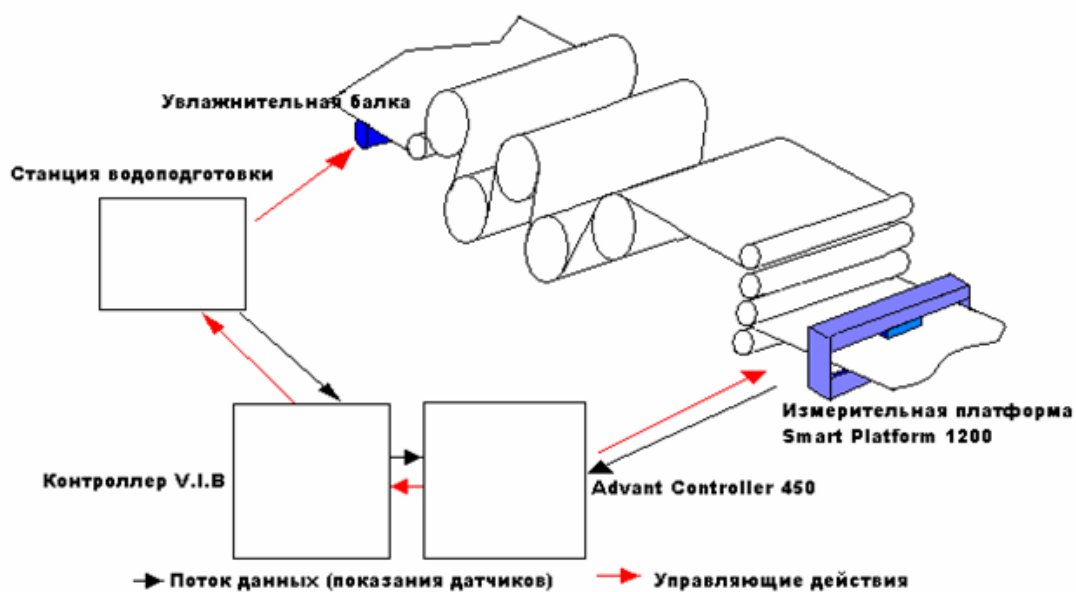


Рисунок 2.3 – Общая схема системы «V.I.B» [18]

Контроль толщины бумаги первоочередная задача бумажного производства. Для её решения применяется автоматизированная система «Caltrol». Схема системы «Caltrol» изображена на рисунке 2.4.

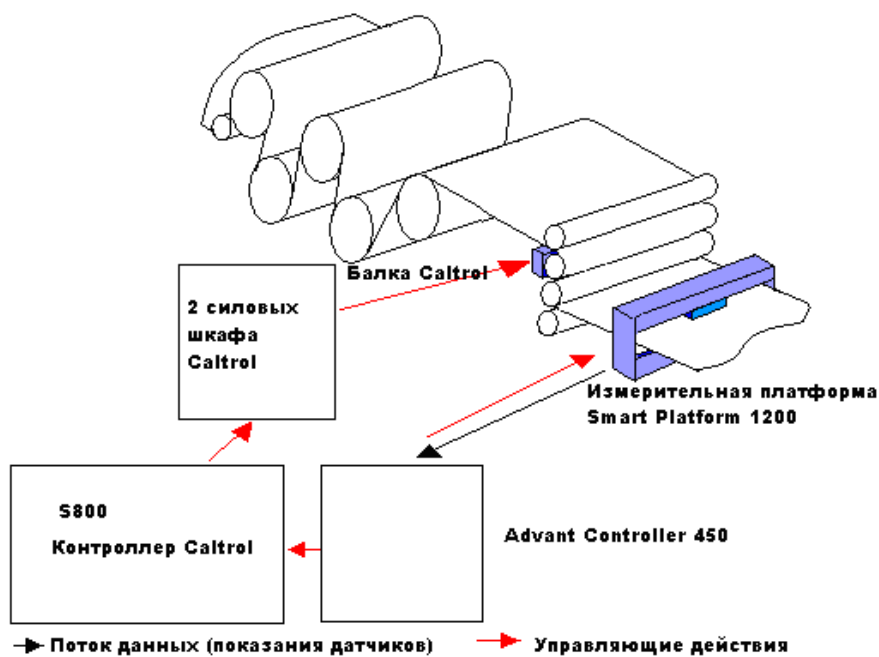


Рисунок 2.4 – Схема системы «Caltrol» [18]

Показания датчика толщины, расположенного на измерительной платформе, поступают в главный контроллер, который вычисляет отклонение толщины бумажного полотна от нормы.

От него контроллер «Caltrol» получает сигнал о необходимости изменения толщины в одной из зон бумажного полотна. С помощью электронных реле, расположенных в силовом шкафу, контроллер управляет термоэлементами (грелками), находящимися на балке «Caltrol». Всего 114 грелок. При обдуве какой-либо зоны каландрового вала горячим воздухом, происходит небольшое увеличение диаметра вала в этой зоне, и как следствие увеличение давления на бумагу.

2.3 Анализ системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна «Valmet»

Технологическое подразделение Metso Automation, функционирующее в рамках концерна Valmet, специализируется на создании современных систем промышленной автоматизации для целлюлозно-бумажного сектора. Данная компания разрабатывает инновационные технологии автоматического контроля и регулирования для предприятий по производству бумаги и переработке древесного сырья.

Их системы управления качеством бумаги включают в себя комплексные инструменты для мониторинга и регулировки критически важных параметров, таких как вес, толщина и влажность, по ширине полотна. Эти системы помогают производителям обеспечивать высокое качество продукции, минимизировать отходы и повысить общую эффективность производства.

Система управления качеством бумаги Metso Automation включает в себя несколько ключевых компонентов, обеспечивающих её высокую эффективность и надежность.

Датчики и измерительные устройства

Metso IQ Scanners: высокоточные сканеры, устанавливаемые поперёк полотна бумаги, измеряют ключевые параметры, такие как вес, толщина и

влажность, с высокой скоростью и точностью. Эти данные используются для непрерывного мониторинга качества продукции.

Metso IQ Sensors: специальные сенсоры для измерения различных параметров бумаги, включая влагу, температуру и плотность. Сенсоры обеспечивают точные данные в реальном времени, что критически важно для управления качеством [14].

Центральный контроллер

Metso IQ System: интеллектуальная система управления, обрабатывающая данные с датчиков и сканеров. Контроллер использует продвинутое программное обеспечение для анализа данных, оптимизации процесса и принятия решений по регулировке производственных параметров.

Metso IQ Insight: платформа для визуализации данных и мониторинга процесса в реальном времени. Она предоставляет операторам полную картину производственного процесса, включая исторические данные и тенденции, что позволяет принимать обоснованные решения [15].

Автоматические регуляторы

Metso IQ Controls: актуаторы и приводы, которые вносят необходимые корректировки в процесс производства на основе данных от центрального контроллера. Эти регуляторы могут изменять натяжение полотна, регулировать подачу сырья и корректировать другие параметры для обеспечения равномерного качества бумаги.

Metso IQ Moisturizer: система управления влажностью, которая использует специальные увлажнители для поддержания оптимального уровня влажности по всей ширине полотна, предотвращая коробление и другие дефекты.

Интерфейс оператора

Metso IQ User Interface: удобный и интуитивно понятный интерфейс для операторов, предоставляющий доступ к данным о состоянии процесса, аналитике и инструментам управления. Операторы могут быстро реагировать на любые изменения в процессе и принимать меры для обеспечения стабильного качества продукции [16].

Система управления по технологическому принципу разделены на следующие отделения:

1. Подготовительный отдел.

В подготовительном отделе АСУ ТП:

- регулирует расходы древесной массы, целлюлозы, брака, красителя;
- поддерживает уровни: машинного бассейна, бассейнов древесной массы, расходной целлюлозы, сгущенной целлюлозы, расходного брака, гауч-бассейна, гидроразбивателя мокрого брака, бассейна избыточной оборотной воды, бассейна осветленной воды, гидроразбивателя сухого брака;
- поддерживает заданное соотношение компонентов смешанной массы: древесной массы, целлюлозы, брака и красителя.
- поддерживает заданные значения концентраций: сгущенной целлюлозы, расходной целлюлозы, сгущенного брака, расходного брака, древесной массы, смешанной массы;
- отражает в виде мгновенных значений расходы полуфабрикатов, также и сульфатной целлюлозы, и красителя, уровни жидкого и сгущенного брака.

Управление подготовительным отделом осуществляется со станции управления, установленной в размольно-подготовительном отделе, также возможно управление со станций управления, расположенных в пультовых прессовой и сушильной части [17].

2. Напорный ящик.

АСУ ТП управляет общим напором в напорном ящике. Общий напор зависит от соотношения скоростей «струя-сетка». При нормальном режиме работы бумагоделательной машины скорость сетки поддерживается постоянной. Скорость вытекания массы на сетку (скорость струи) регулируется путем изменения общего напора, который регулируется изменением числа оборотов двигателя смесительного насоса. А также АСУ ТП поддерживает уровень в напорном ящике согласно заданного значения, который регулируется путем изменения давления воздушной подушки.

3. Система управления массой 1 м² бумажного полотна в машинном направлении

АСУ ТП поддерживает заданное значение сухого веса, массы 1 м² бумажного полотна изменяя расход смешанной массы, путем изменения положения регулировочного клапана.

4. Система управления скоростью бумагоделательной машины

Основная скорость – скорость сетки. Остальные скорости зависят от основной. На бумагоделательной машине № 7 существует цифровая система управления скоростью «Siemens». Цифровая система регулирует скорость десяти приводов. Так же возможно управление скоростью машины от системы АСУ ТП. Скорость машины изменяется по скорости сетки, при этом адаптируется работа подготовительного отдела.

5. Система управления влажностью бумаги в машинном направлении

Влажность регулируется путем изменения давления пара в третьей сушильной группе. Во время обрыва бумаги АСУ автоматически снижает давление пара до заданного уровня, для предотвращения перегрева сушильных цилиндров. Контролируется работа пароконденсатной системы БДМ такие как:

- перепады между сушильными группами 1-2, 2-3;
- регулирует уровни сборников конденсата 1, 2, 3 и общий;
- регулируется вакуум 1 сборника конденсата.

5. Система управления массой 1 м² бумажного полотна в поперечном направлении «TERMATROL»

Верхняя губа напорного ящика выполнена из гибкой стальной полосы, которая разделена на 59 зон. Регулировка массы 1 м² бумажного полотна производится за счет изменения размера щели между нижней и верхней губами (при изгибании верхней) отдельно по каждой из 59 зон.

6. Система управления влажностью бумажного полотна в поперечном направлении «IQAQUAPRO»

Влажность бумаги в поперечном направлении регулируется путем доувлажнения пересушенной бумаги в 116 зонах по ширине бумажного полотна. Над каждой зоной стоит специальный распылительный модуль.

7. Система регулирования толщины бумаги в поперечном направлении «IQINJECTION»

Толщина бумаги регулируется за счет нагрева одного из каландровых валов отдельно в 116 зонах индукционными грелками.

8. АСУ производит измерение веса 1 м^2 , толщины, влажности бумаги

Датчики находятся в перемещаемых по ширине бумажного полотна головках сканирующего устройства (сканера).

2.4 Технология измерения параметров по ширине бумажного полотна

Одной из главных частей системы «CD-control» является сканирующее устройство, движущееся поперёк бумажного полотна (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Сканирующее устройство [19]

На подвижных головках сканера расположены датчики для измерения основных параметров: вес 1 м^2 , влажность и толщина бумажного полотна. Измерительные устройства вычисляют значение того или иного параметра по всей ширине бумаги [19]. Платы-контроллеры обрабатывают его и, через сетевой модуль, передают главному контроллеру.

Приборы для измерения веса, влажности и толщины – главные элементы сканера. Поэтому ниже они представлены более детально.

Для измерения веса бумаги применяется радиоизотопный датчик, схема которого изображена на рисунке 2.6.

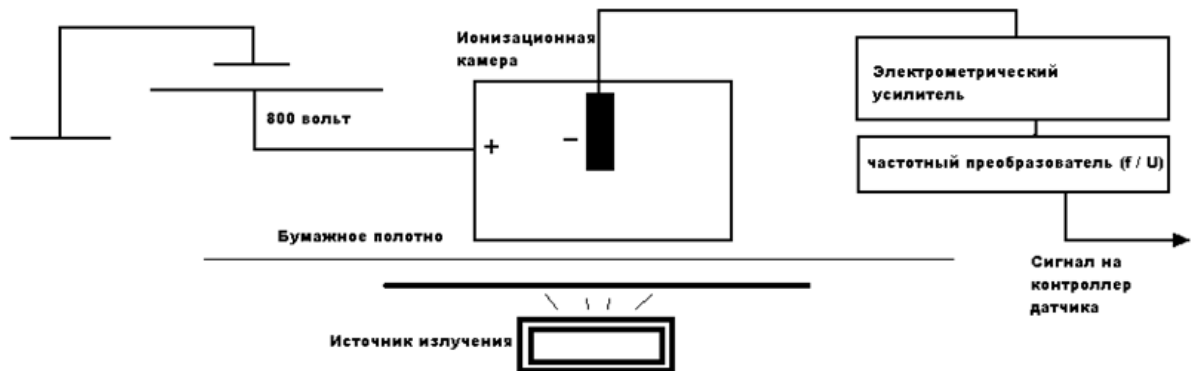


Рисунок 2.6 – Схема датчика веса [19]

Датчик веса определяет степень поглощения электронов, испускаемых радиоактивным источником, бумажным листом, помещённым между источником излучения и детектором.

Измерение производится путём сравнения измерительного и эталонного сигналов детектора.

Для измерения влажности бумаги используется инфракрасный датчик фирмы АВВ.

Работа датчика основана на явлении высокого поглощения водой, на длине волны $\lambda=1,9$ микрона, инфракрасного излучения.

На длинах волн $\lambda=1,7-1,8$ микрона поглощение становится минимальным.

Волокна бумаги поглощают эти волны примерно одинаково. Поэтому количество имеющейся воды можно определить путём сравнения относительного поглощения на указанных длинах волн.

Схема датчика влажности представлена на рисунке 2.7. Датчик состоит из источника излучения (проекторной лампы), приёмника и специального фильтра. Свет от источника фильтруется с целью удаления большей части видимого излучения и модулируется по амплитуде при помощи вращающегося металлического диска (прерывателя).

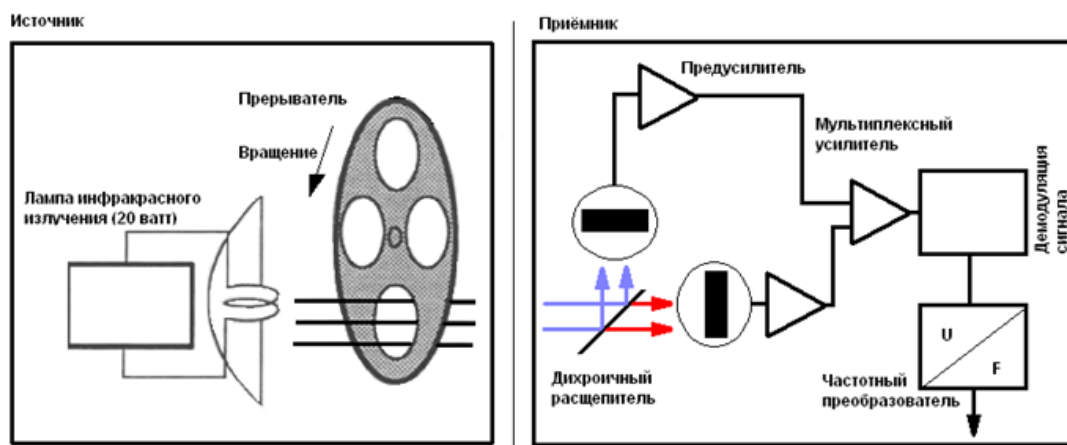


Рисунок 2.7 – Схема датчика влажности [19]

Для измерения толщины бумаги предназначен контактный датчик. Чувствительными элементами датчика являются специальные пластины, расположенные между бумажным полотном. Верхняя пластина выполнена из ферромагнитного материала, а нижняя содержит в себе катушку индуктивности.

Пластины прижимаются к бумаге воздушными потоками. Управление воздухом осуществляется с помощью клапанов – соленоидов.

Изменение толщины листа бумаги вызывает увеличение расстояния между верхней и нижней пластинами (рисунок 2.8). Тем самым, изменяется величина магнитного потока, проходящего через катушку L и, как следствие, индуктивность катушки.

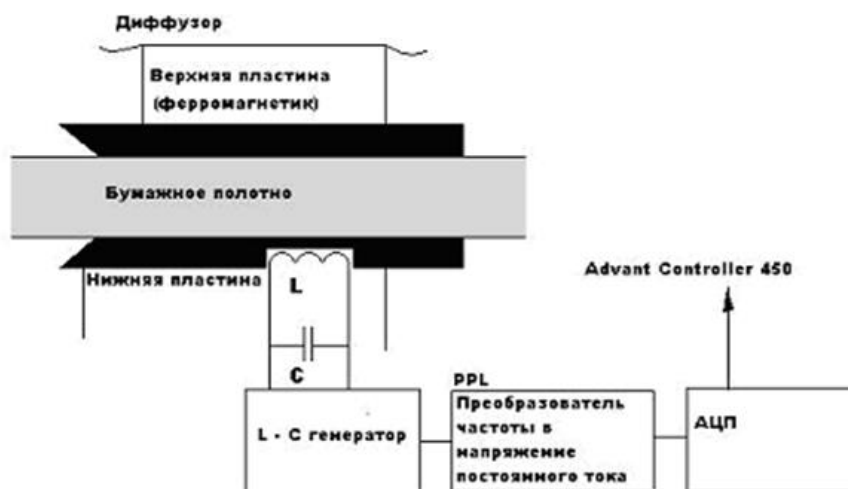


Рисунок 2.8 – Принцип работы датчика толщины [19]

2.5 Анализ алгоритма управления технологическим процессом производства бумаги

MD-control (Machine Direction Control) – это система управления качеством бумаги в продольном направлении (по направлению движения полотна бумаги в машине). Данная система играет ключевую роль в обеспечении равномерного и стабильного качества бумаги, контролируя параметры, такие как вес, толщина, влажность и натяжение полотна, в продольном направлении.

MD-control включает в себя несколько основных компонентов: датчики, центральный контроллер и исполнительные механизмы.

Изменение индуктивности катушки влияет на выходную частоту L-C генератора, входящего в состав колебательного контура [75].

Датчики измеряют различные параметры бумаги на определённых участках производственного процесса. В MD-control могут использоваться датчики веса, толщины, влажности и натяжения. Например, датчики веса устанавливаются перед и после каждой секции, чтобы отслеживать изменения в массе бумаги по длине полотна. Датчики толщины могут быть контактными или бесконтактными и измеряют толщину полотна, передавая данные в реальном времени [15].

Контроллер получает данные от датчиков и анализирует их для выявления отклонений от заданных параметров. Он сравнивает текущие значения с целевыми и, при необходимости, посылает команды на корректировку технологических параметров. Центральный контроллер использует сложные алгоритмы для обработки данных и принятия решений, обеспечивая высокую точность и надёжность управления.

Исполнительные механизмы выполняют команды контроллера, внося необходимые изменения в процесс производства. Например, для корректировки массы бумаги могут изменяться скорости подачи материала, давления в вальцах или натяжение полотна. Исполнительные механизмы включают в себя сервоприводы, пневматические и гидравлические системы, которые обеспечивают быстрые и точные реакции на команды контроллера [20].

Принцип работы MD-control заключается в непрерывном измерении параметров бумаги и оперативной корректировке производственного процесса для поддержания стабильных характеристик продукции. Процесс начинается с установки датчиков на ключевых участках производственной линии, которые собирают данные о параметрах бумаги в реальном времени. Эти данные передаются в центральный контроллер, где они анализируются.

Центральный контроллер сравнивает текущие значения параметров с целевыми и определяет, есть ли отклонения. Если отклонения обнаружены, контроллер отправляет команды на исполнительные механизмы для внесения корректировок. Например, если датчик толщины обнаруживает, что бумага становится тоньше на определённом участке, контроллер может увеличить давление в вальцах, чтобы исправить это отклонение. Аналогично, если датчик влажности фиксирует превышение содержания влаги, контроллер может скорректировать параметры сушки.

MD-control также учитывает временные задержки и динамику изменений параметров, что позволяет системе предсказывать будущие отклонения и предпринимать превентивные меры. Это значительно улучшает качество управления и снижает количество брака.

При машинном управлении задаются необходимые параметры для той бумаги, которую необходимо сделать, а именно: вес, влажность и толщина. Управление в машинном направлении по результатам полученных измерений сканирования использует современный алгоритм управления на основе моделирования, для обеспечения автоматического управления в машинном направлении.

Управляемыми величинами являются основной вес, влажность и непрозрачность. Динамическая связь, обратная связь, и упреждающее управление объединены, чтобы обеспечить наиболее быстрые и точные действия управления в целях получения наибольшей однородности продукта.

Управление расходом сухой массы поддерживает расход сухого волокна в соответствии с заданием и с учетом изменяющихся показателей концентрации

общего расхода массы. Задача управления расходом сухой массы вычисляет требуемое регулирование общего расхода таким образом, чтобы обеспечить заданный расход сухого волокна, и таким образом поддержать заданный сухой вес продукта на накате бумажной машины.

На рисунках 2.9-2.11 представлены модели системы при машинном управлении.

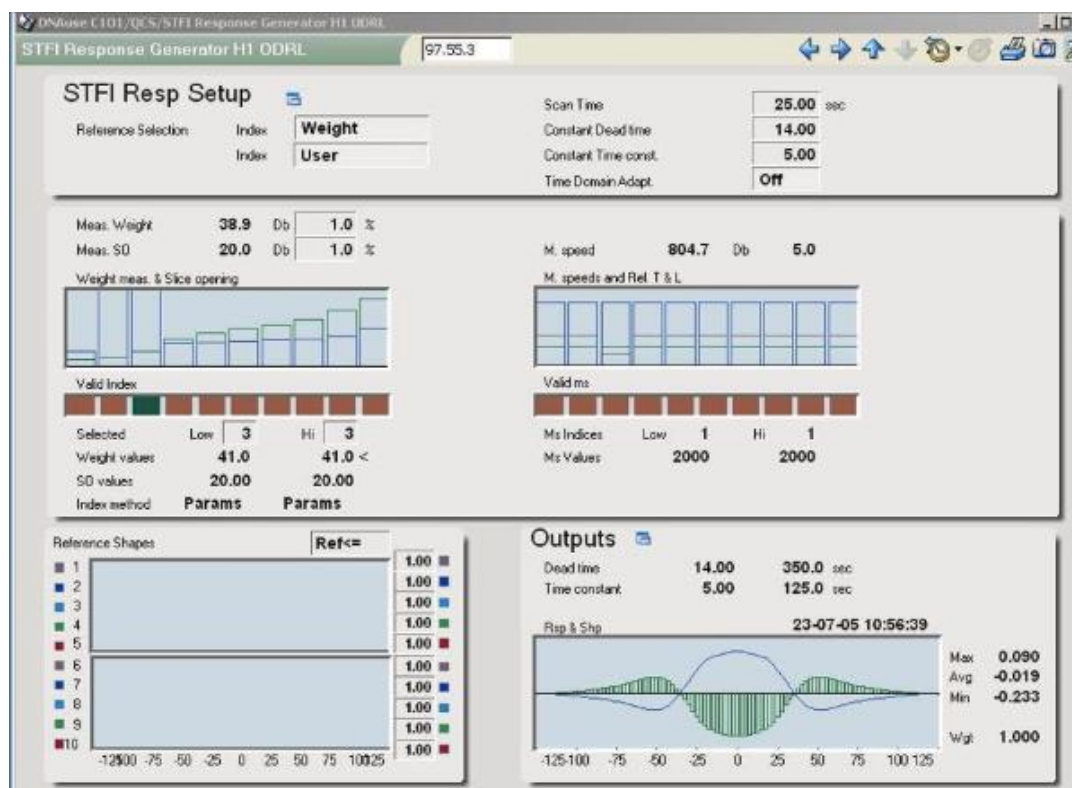


Рисунок 2.9 – Модель сухого веса при машинном управлении
(составлено автором)

Это критически важно для поддержания высокого качества продукции и оптимизации производственного процесса.

CD-control системы состоят из нескольких ключевых компонентов, которые работают вместе для достижения целей управления качеством.

Сканеры (IQ Scanners): устанавливаются поперёк полотна и перемещаются, измеряя параметры в различных точках ширины полотна.

Датчики (IQ Sensors): измеряют конкретные параметры, такие как вес, толщина и влажность бумаги, в реальном времени.

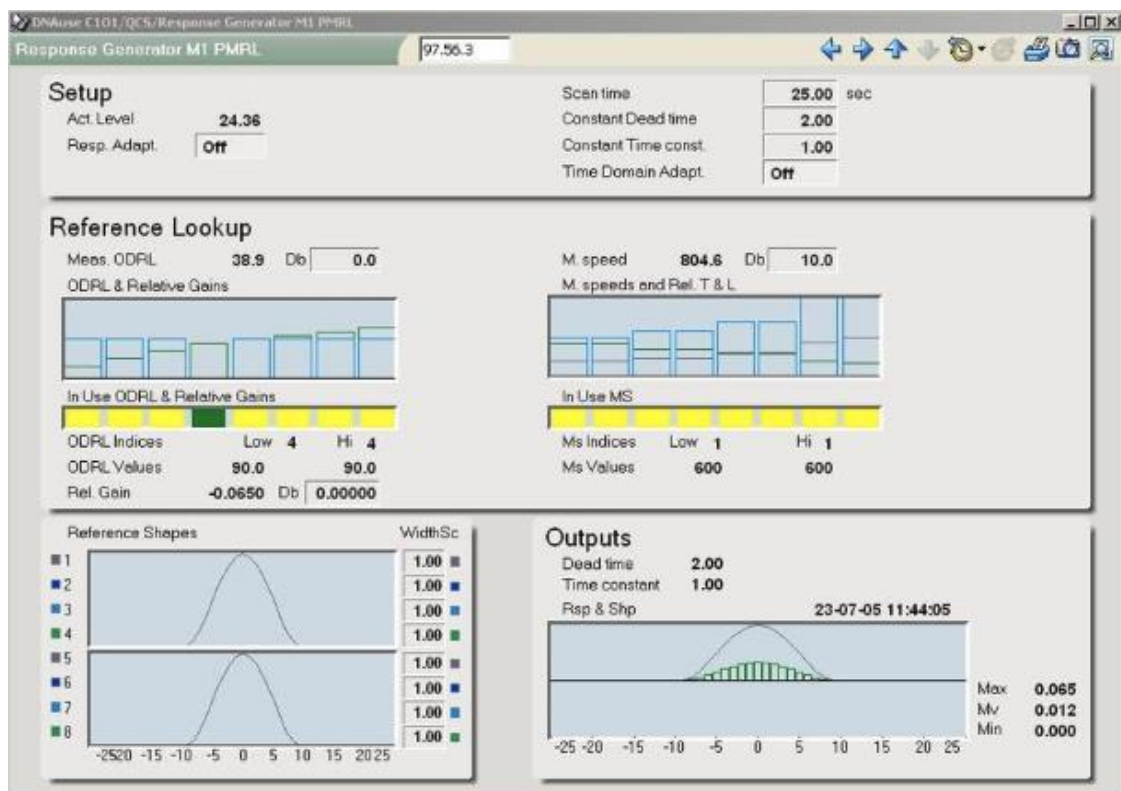


Рисунок 2.10 – Модель влажности при машинном управлении
(составлено автором)

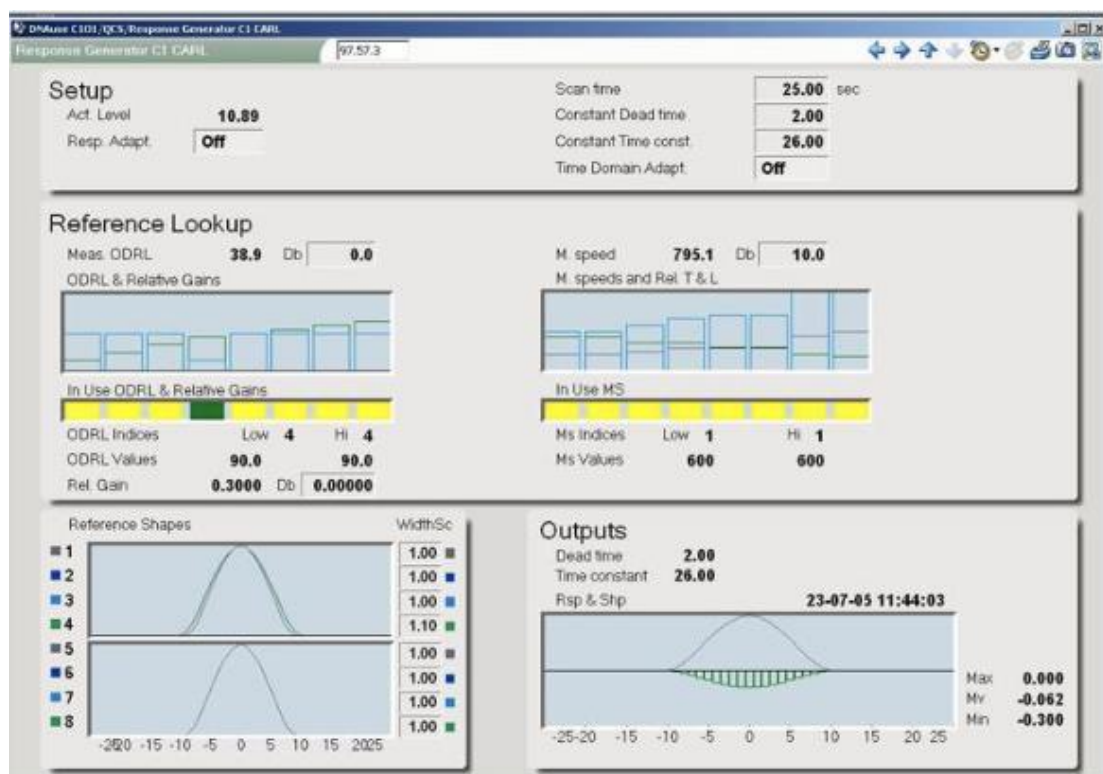


Рисунок 2.11 – Модель толщины при машинном управлении (составлено автором)

На рисунке 2.12 представлены графики толщины, влажности и веса в машинном управлении.

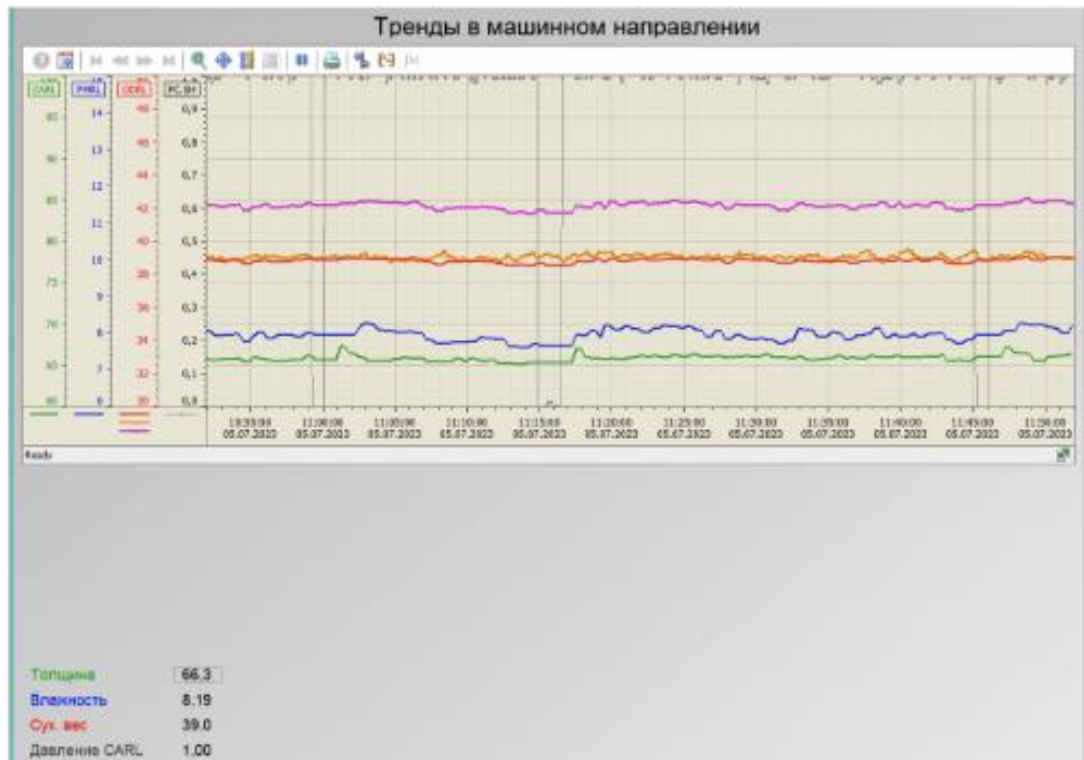


Рисунок 2.12 – Графики в машинном управлении (составлено автором)

CD-control (Cross Direction Control) – это система управления технологическим параметрами бумажного полотна по ширине бумагоделательной машины. Основная цель CD-control – обеспечить равномерное распределение таких параметров, как вес, толщина и влажность бумаги, по всей ширине полотна.

Центральный контроллер (IQ System): обрабатывает данные, полученные от датчиков, и принимает решения по регулировке параметров.

Автоматические регуляторы (IQ Controls): исполнительные устройства, вносящие корректировки в производственный процесс.

Интерфейс оператора (IQ User Interface): позволяет операторам мониторить процесс и управлять системой.

CD-control системы работают на основе непрерывного цикла измерений, анализа и регулировки, чтобы поддерживать равномерное качество бумаги по всей ширине полотна [21].

Сканеры и датчики, установленные поперёк полотна, собирают данные о весе, толщине и влажности бумаги в разных точках ширины полотна. Датчики могут использовать различные технологии измерения, такие как радиометрия, инфракрасное излучение или контактные методы.

Данные с датчиков передаются в центральный контроллер в реальном времени. Контроллер анализирует полученные данные и выявляет отклонения от заданных параметров, затем использует алгоритмы статистического анализа и предсказательной аналитики для обработки данных. Система определяет, где происходят отклонения и насколько они значительны [22].

На основе анализа данных контроллер принимает решения по корректировке производственного процесса. Решения могут включать изменение натяжения полотна, регулировку подачи сырья, изменение параметров сушки и т.д.

Затем автоматические регуляторы вносят необходимые изменения в производственный процесс. Это могут быть актуаторы, управляющие натяжением полотна, или системы увлажнения, регулирующие влажность.

В это время операторы следят за процессом через интерфейс оператора. А система обеспечивает обратную связь, предоставляя данные о текущем состоянии процесса и результатах внесённых изменений.

Если при измерении толщины бумаги сканер, расположенный поперёк полотна и постоянно измеряющий ее, в одной области обнаруживает, что бумага тоньше или толще, чем в других частях полотна, система автоматически определяет это отклонение. В случае неравномерного веса бумаги система может корректировать подачу целлюлозной массы в определённые области, чтобы сбалансировать вес по ширине полотна [37].

Поперечное управление на БДМ регулируется с помощью актуаторов.

Задача управления весом в поперечном направлении вычисляет задание для приводов актуаторов линейного типа, которые изменяют положения пластины выпускной щели в заданном месте для оптимизации поперечного профиля веса. Разработанные стратегии управления работают по алгоритму SmoothSlice, чтобы минимизировать колебания веса по профилю в течение всего времени работы управления. На управлении весом находится 64 актуаторов, расстояние между каждым из них 12 см. Отображение веса по профилю представлено на рисунке 2.13.

Задача управления влажностью в поперечном направлении вычисляет задание для актуаторов управления, чтобы оптимизировать профиль влажности.

Развитые стратегии управления работают по алгоритму SmoothSlice, чтобы минимизировать колебания влажности по профилю в течение всего времени работы управления. На управлении влажностью находится 85 актуаторов, расстояние между каждым из них 6 см.

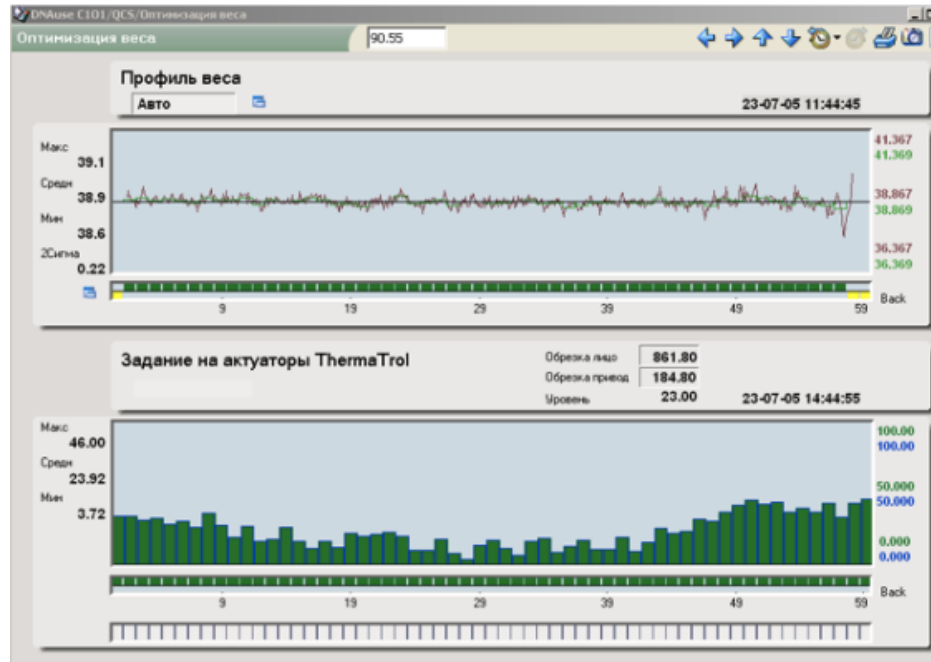


Рисунок 2.13 – Отображение веса по профилю (составлено автором)
Отображение влажности по профилю представлено на рисунке 2.14.



Рисунок 2.14 – Отображение влажности по профилю (составлено автором)

Задача управления толщиной в поперечном направлении вычисляет задание для актуаторов управления нагревом батареи каландров для оптимизации профиля

толщины. Разработанные стратегии управления работают по алгоритму SmoothSlice, чтобы минимизировать колебания толщины по профилю. На управлении толщиной находится 114 актуаторов, расстояние между каждым из них 6 см. Отображение толщины по профилю представлено на рисунке 2.15.

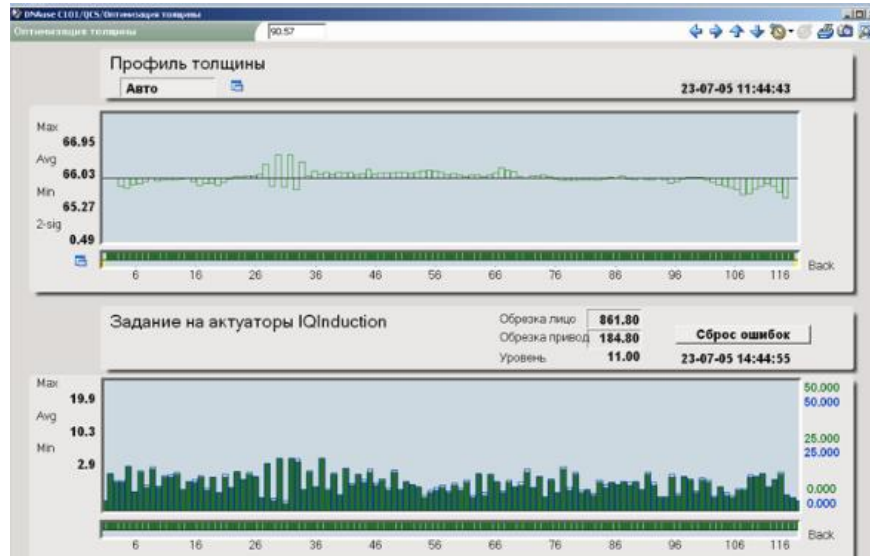


Рисунок 2.15 – Отображение толщины по профилю (составлено автором)

На рисунке 2.16 представлены графики толщины, влажности и веса в поперечном управлении.

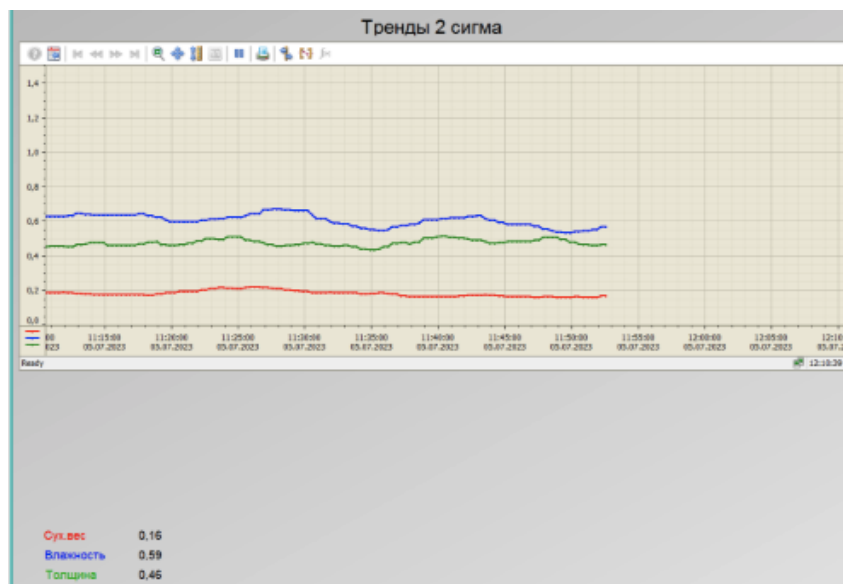


Рисунок 2.16 – Графики в поперечном управлении (составлено автором)

Если говорить о сходствах CD и MD-control, можем сказать, что они стремятся к улучшению качества продукции, минимизации дефектов и снижению производственных издержек. Измерение CD и MD-control представлены на рисунке 2.17.

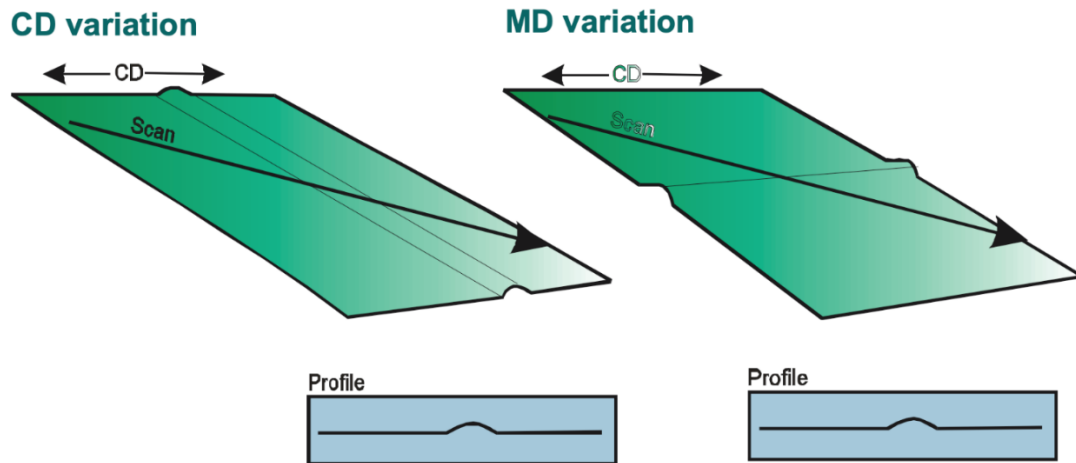


Рисунок 2.17 – Измерение CD и MD-control [31]

Также обе системы направлены на поддержание стабильных параметров бумаги, используют высокоточные датчики для измерения параметров, контроллеры для обработки данных, анализа и принятия решений по корректировке процесса, исполнительные устройства для внесения изменений в производственный процесс.

Основные различия: системы управляют параметрами бумаги в разных направлениях. CD-control использует сканеры, перемещающиеся поперёк полотна, чтобы измерять параметры в различных точках ширины. Регулировка может включать изменение натяжения полотна, регулировку подачи сырья и использование увлажнителей. MD-control использует датчики, расположенные вдоль производственной линии, для непрерывного измерения параметров по направлению движения полотна. Регулировка может включать изменение скорости машины, регулировку подачи сырья и параметров сушки [71].

Для контроля профиля удельной массы, геометрических параметров и влажности разработан алгоритм «OptiProfile» от предприятия «Valmet Automation». Схематическое представление алгоритма приведено на рисунке 2.18.

Алгоритм «OptiProfile» разработан компанией «Valmet Automation». Данное решение осуществляет управление профилем сухого веса бумажного полотна. Его основная задача обеспечить снизить общую погрешность регулирования.

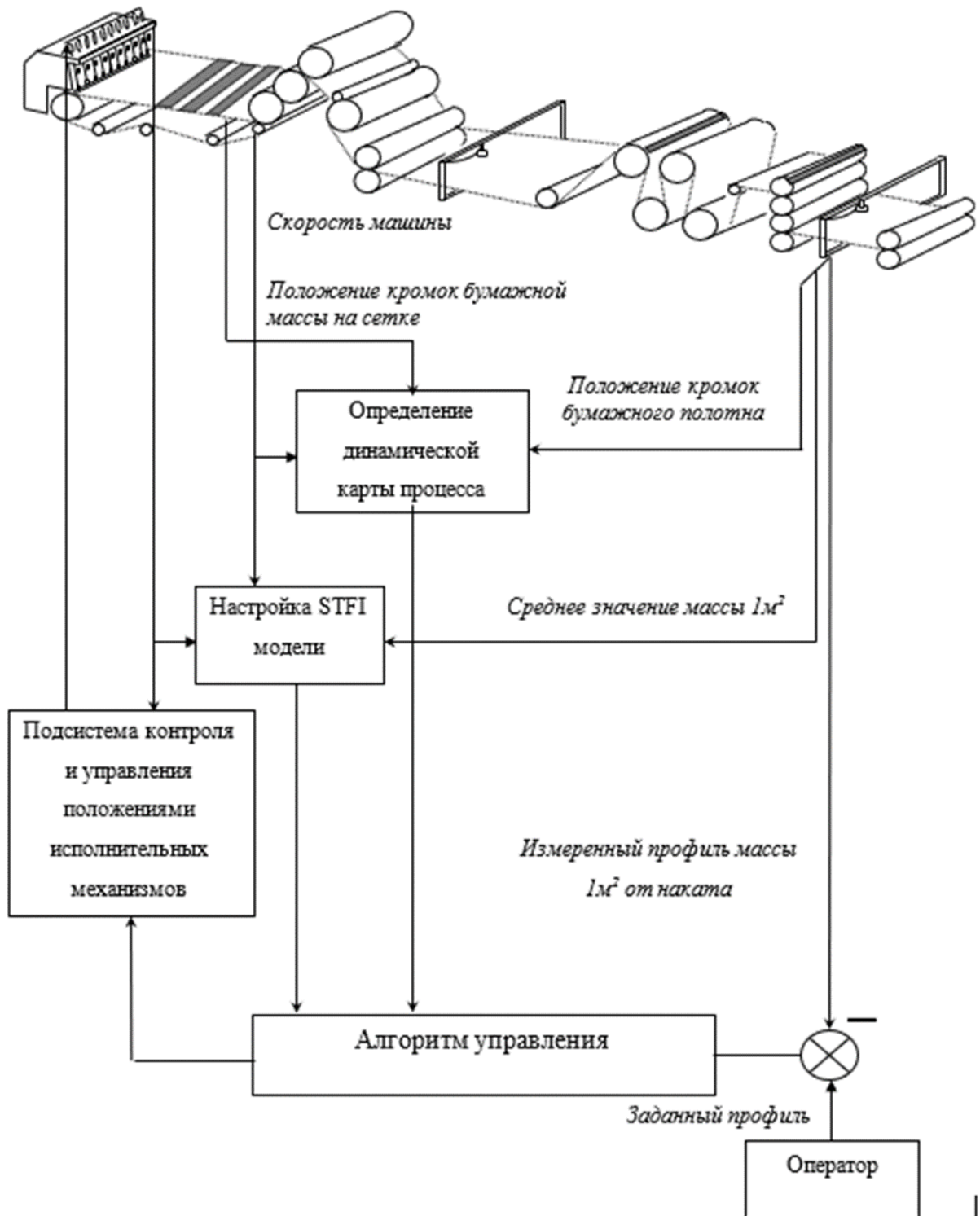


Рисунок 2.18 – Схема системы управления массой 1 м² бумаги в соответствии с алгоритмом «OptiProfile» [82]

Сама погрешность включает в себя сумму отклонений по управлению канала сухого веса, толщины и влажности. Ошибка вычисляется по формуле (2.1) [20]:

$$\text{Error} = W_1 \cdot W_e + W_2 \cdot M_e + W_3 \cdot C_e, \quad (2.1)$$

где W_1, W_2, W_3 – коэффициенты ошибок регулирования;

W_e , M_e , C_e – ошибки регулирования параметров массы 1 м^2 , влажности и толщины [6].

Ошибки регулирования параметров массы 1 м^2 , влажности и толщины бумажного полотна вычисляются следующими выражениями (2.2, 2.3, 2.4):

$$W_e = W_p - W_t, \quad (2.2)$$

$$M_e = M_p - M_t, \quad (2.3)$$

$$C_e = C_p - C_t, \quad (2.4)$$

где W_p , M_p , C_p – измеренные значения параметров массы 1 м^2 , влажности и толщины бумажного полотна;

W_t , M_t , C_t – значения параметров массы 1 м^2 , влажности и толщины бумажного полотна [6].

STFI модель отражает связь реакции изменения величины показателя при изменении положения исполнительного механизма (рисунок 2.19).

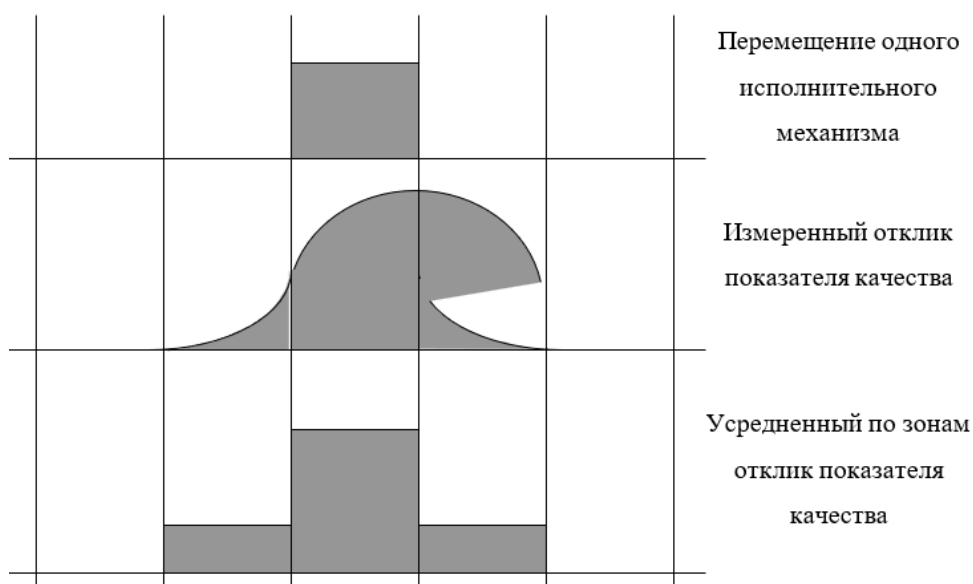


Рисунок 2.19 – Схема откликов применительно к традиционному алгоритму регулирования технологическими параметрами бумажного полотна [82]

Внедрение таких систем обеспечило возможность повышения скоростных режимов бумагоделательных агрегатов с параллельным улучшением качества выпускаемой продукции. При этом повышается их точность по ширине полотна (количество контрольных и управляющих точек). Кроме того, ведущие компании постоянно усовершенствуют управляющие системы этих механизмов для

обеспечения минимальных отклонений качественных параметров профиля бумаги [6].

2.6 Выводы к Главе 2

Во второй главе диссертационного исследования был проведен детальный анализ современных систем управления бумагоделательными машинами, представленных ведущими мировыми производителями, такими как ABB и Valmet. На основании проведенного исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Комплексный анализ систем управления ABB и Valmet показал, что данные системы представляют собой высокотехнологичные решения, обеспечивающие автоматизацию процессов управления бумагоделательными машинами на всех этапах производства. Однако, несмотря на высокий уровень технического исполнения, эти системы имеют ряд ограничений, связанных с принципами организации управления параметрами качества бумаги.

2. Исследование существующих систем управления показало, что традиционные подходы к регулированию параметров качества бумаги основаны на независимом управлении каждым показателем, что не учитывает их взаимного влияния и приводит к недостаточно эффективным результатам. Такой подход характерен как для системы ABB, так и для системы Valmet, что свидетельствует о системном ограничении существующих технологий.

3. Анализ факторов, влияющих на формирование профиля качества по ширине бумажного полотна, выявил, что на распределение массы, влажности и толщины оказывают влияние как конструктивные особенности бумагоделательной машины, так и технологические параметры процесса. При этом зоны влияния различных исполнительных механизмов часто перекрываются, что создает дополнительные сложности при управлении.

4. Исследование эффективности существующих систем управления в условиях производства различных видов бумажной продукции выявило, что точность поддержания заданных параметров качества снижается при увеличении

скорости работы бумагоделательной машины и ширины бумажного полотна, что указывает на необходимость совершенствования алгоритмов управления.

Таким образом, проведенный анализ современных систем управления бумагоделательными машинами обосновывает необходимость разработки новой концепции управления, основанной на применении интеллектуальных технологий и обеспечивающей комплексную оптимизацию показателей качества бумаги по ширине полотна, что будет рассмотрено в последующих главах диссертационного исследования.

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ С ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ПРИМЕРЕ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

3.1 Постановка задачи совершенствования системы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на примере бумагоделательной машины

Совершенствование систем управления параметрами качества бумаги в поперечном направлении представляет собой актуальную задачу, основанную на сложности процесса производства бумаги и взаимосвязи различных качественных показателей. Процесс производства бумаги включает в себя множество переменных, таких как влажность, плотность, толщина и другие характеристики бумажной массы, каждая из которых оказывает влияние на конечное качество продукции.

Система «CD-control» представляет собой комплексный механизм, ориентированный на взаимосвязанное управление параметрами производства бумаги. В основе этой системы лежит предположение о существовании зависимостей профилей качественных показателей от изменения положения исполнительных механизмов. На основе анализа этих зависимостей строятся математические модели, позволяющие прогнозировать изменения качества бумаги при изменении управляемых параметров.

На схеме, представленной на рисунке 3.1, отображена зависимость между профилями качественных показателей и изменениями положений исполнительных механизмов. Опираясь на эти зависимости, было выявлено семь моделей взаимосвязей. Однако, учитывая сложность управления взаимосвязанными параметрами и наличие ограничений на управляющие воздействия, возникает необходимость в построении более точных математических моделей.

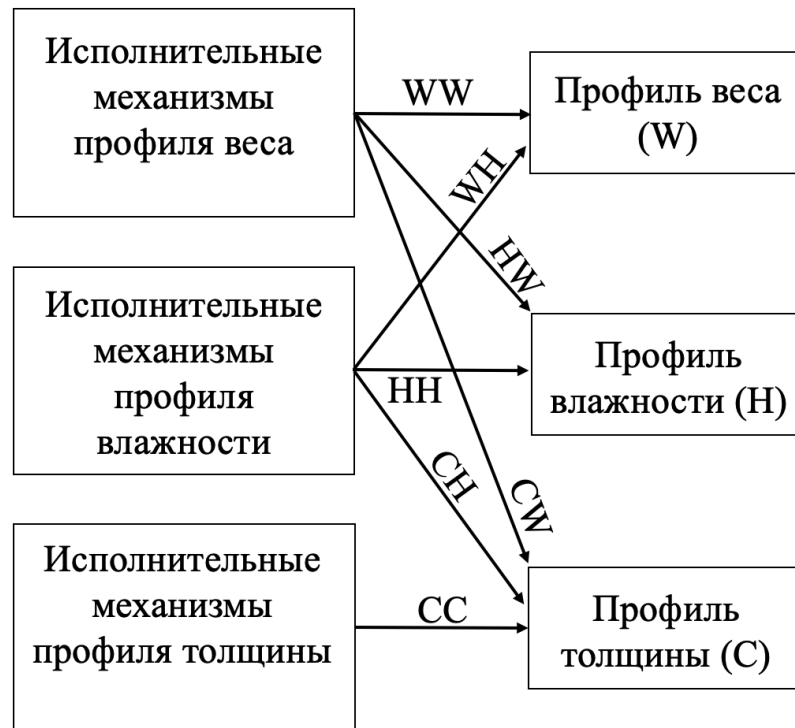


Рисунок 3.1 – Концептуальная модель системы взаимосвязанного управления качеством бумаги (составлено автором)

В связи с сложным управлением взаимосвязанных параметров и набором ограничений на управляющие воздействия необходимо иметь как можно более точную модель. Для этого реализованы более качественные модели по трем каналам управления [6].

3.2 Обработка экспериментальных данных для построения математических моделей

В рамках данной работы была проведена серия экспериментов для исследования влияния перемещений актуаторов на технологические параметры по ширине бумагоделательной машины.

Примеры данного эксперимента представлены на рисунках 3.2-3.7.

Для выявления общих тенденций и закономерностей все графики были наложены друг на друга (рисунок 3.8), после чего было вычислено их среднее значение и выведена STF_I модель (рисунок 3.9).



Рисунок 3.2 – График влияния изменения положения исполнительного механизма [6]



Рисунок 3.3 – График влияния изменения положения исполнительного механизма [6]



Рисунок 3.4 – График влияния изменения положения исполнительного механизма [6]



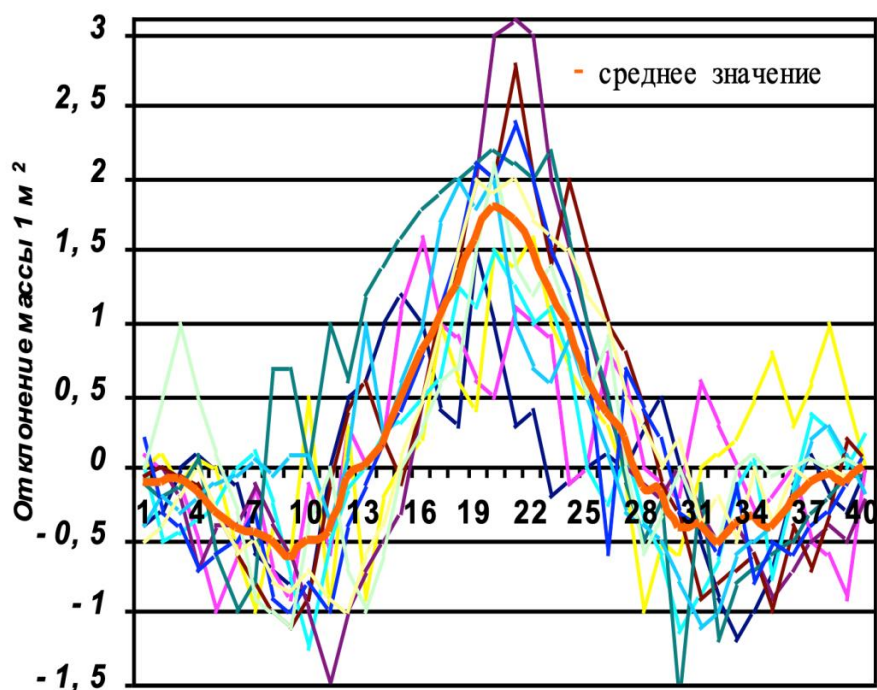
Рисунок 3.5 – График влияния изменения положения исполнительного механизма [6]



Рисунок 3.6 – График влияния изменения положения исполнительного механизма [6]



Рисунок 3.7 – График влияния изменения положения исполнительного механизма [6]



Ширина зоны влияния одного исполнительного механизма.

Рисунок 3.8 – Наложенные друг на друга графики [6]

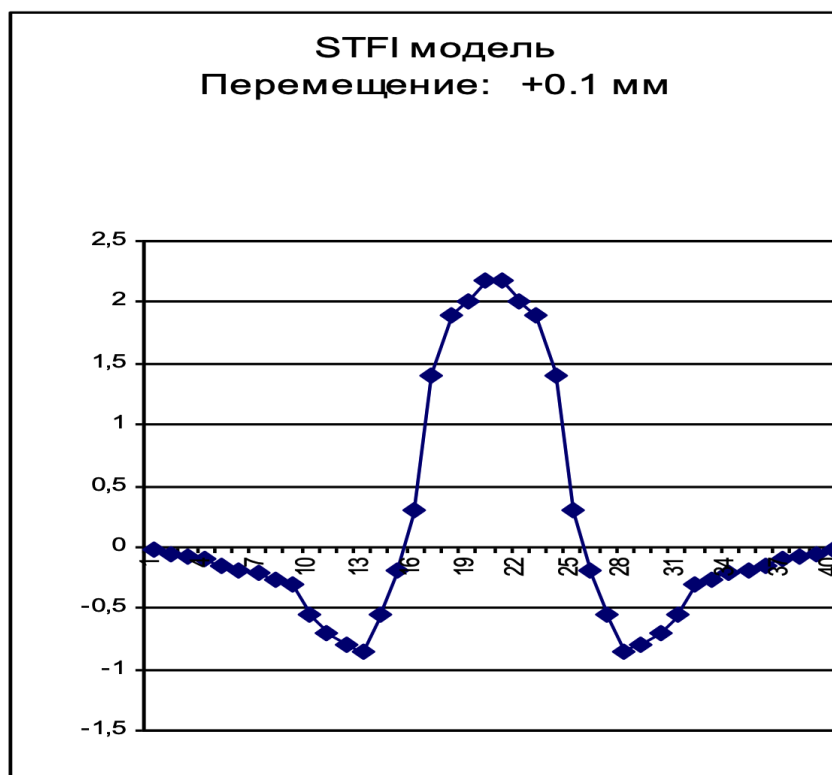


Рисунок 3.9 – Модель влияния изменения положения исполнительного механизма
(составлено автором)

По результатам выполненного исследования определены функциональные зависимости между изменением координат исполнительных механизмов и флуктуациями значений технологических параметров процесса производства

бумаги. Разработана универсальная модель, пригодная для описания основных параметров процесса производства бумаги, отличающаяся только численными коэффициентами.

3.3 Разработка математических моделей для системы управления технологическими параметрами бумаги в поперечном направлении

Одним из важнейших вопросов, связанных с разработкой автоматизированных систем управления качеством бумаги по ширине полотна, является построение математической модели технологического объекта с пространственно-распределенными параметрами по каналам управления.

Предлагается аппроксимировать кривые следующей зависимостью по формуле

$$(3.1): \Delta y_l = \begin{cases} A_y e^{-\alpha|l-m|} \cos(\omega(l-m)) \Delta X_n & \text{при } -c \leq l \leq c \\ 0 & \text{при } c \leq l \leq -c, \end{cases} \quad (3.1)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра;

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

n – координата исполнительного механизма по ширине машины: $n = 1, 2, 3, \dots$;

l – координата параметра относительно n -го исполнительного механизма: $l = \dots -2, -1, 0, +1, +2$;

m – величина сдвига максимального значения параметра;

A_y – максимальный отклик от исполнительного механизма, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра);

ω – частота;

c – зона влияния;

α – коэффициент затухания [18].

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие формулы моделей.

Управление массой 1 м² с помощью основных исполнительных механизмов регулирования массы 1 м² (WW) рассчитывается по формуле (3.2):

$$\Delta y_l = 0,06e^{-0,035|l-0,1|} \cos(0,4(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.2)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n-го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.10.

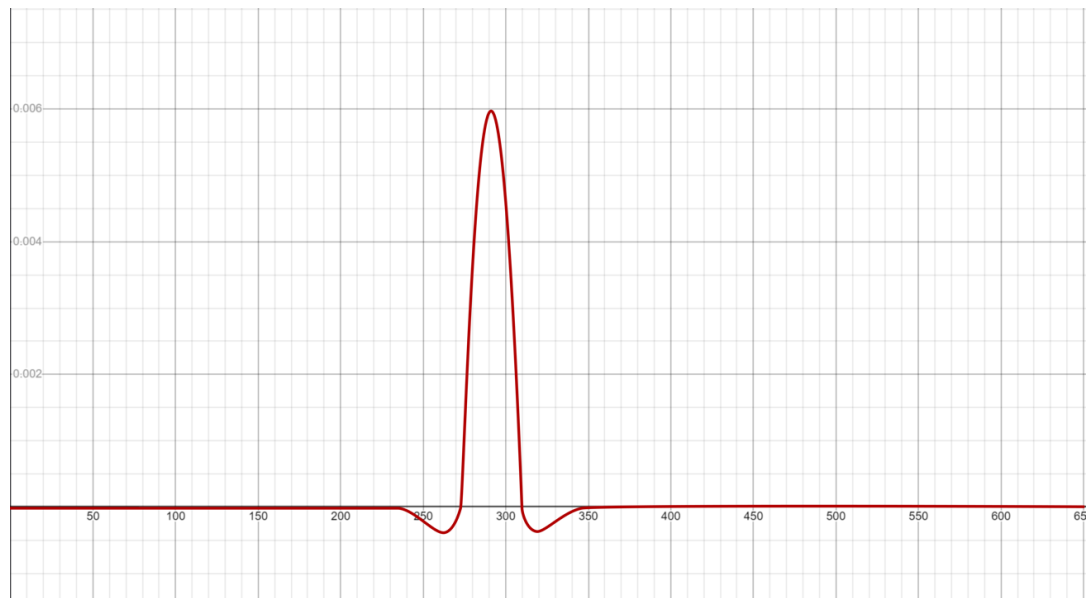


Рисунок 3.10 – График для WW (составлено автором)

Управление массой 1 м² с помощью основных исполнительных механизмов регулирования влажности (WH) рассчитывается по формуле (3.3):

$$\Delta y_l = 0,38e^{-0,04|l-0,1|} \cos(0,01(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.3)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n-го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.11.

Управление влажностью с помощью основных исполнительных механизмов регулирования влажности (HH) рассчитывается по формуле (3.4):

$$\Delta y_l = 0,3e^{-0,3|2l-0,1|} \cos(0,01(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.4)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n-го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

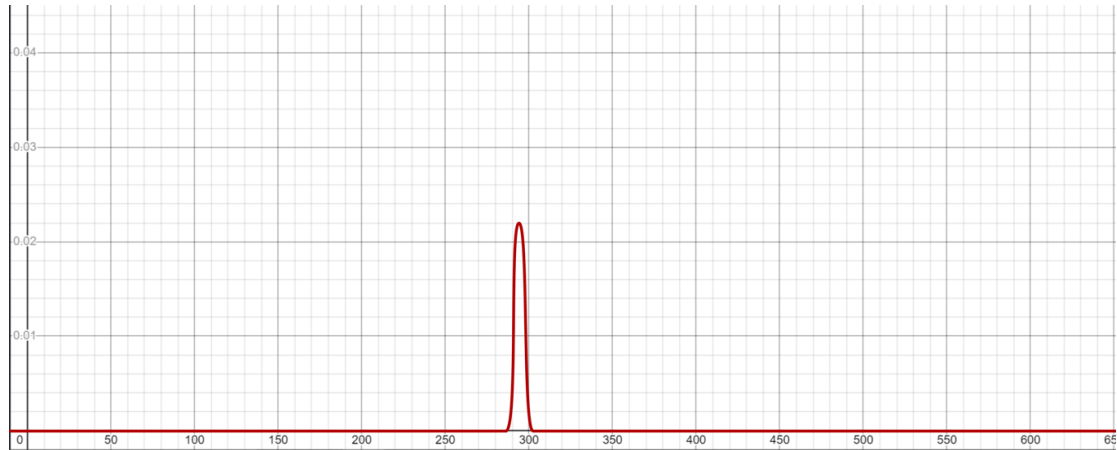


Рисунок 3.11 – График для WH (составлено автором)

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.12.

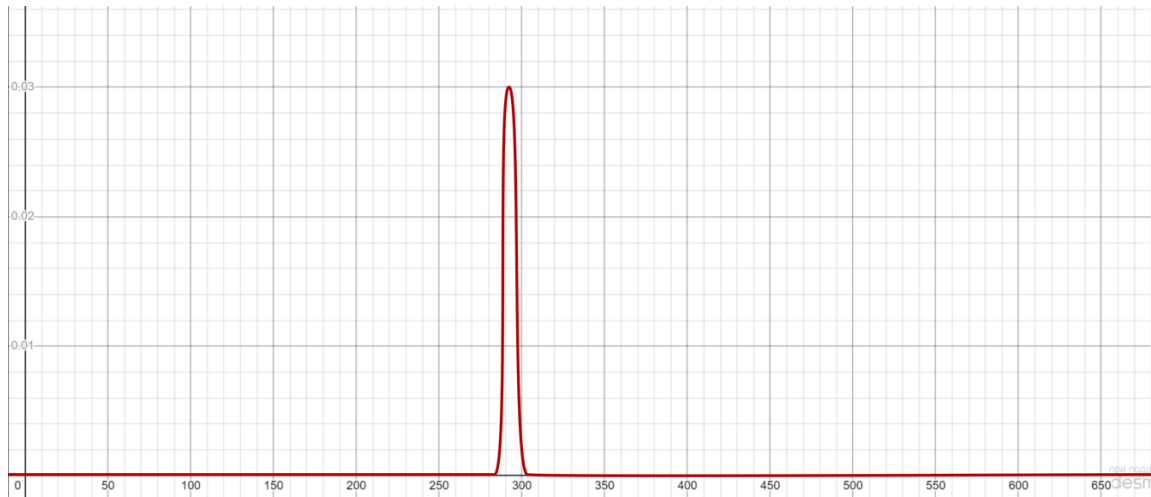


Рисунок 3.12 – График для HH (составлено автором)

Управление влажностью с помощью основных исполнительных механизмов регулирования массы 1 м² (HW) рассчитывается по формуле (3.5):

$$\Delta y_l = 0,1e^{-2|l-0,1|} \cos(1,1(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.5)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n -го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.13.

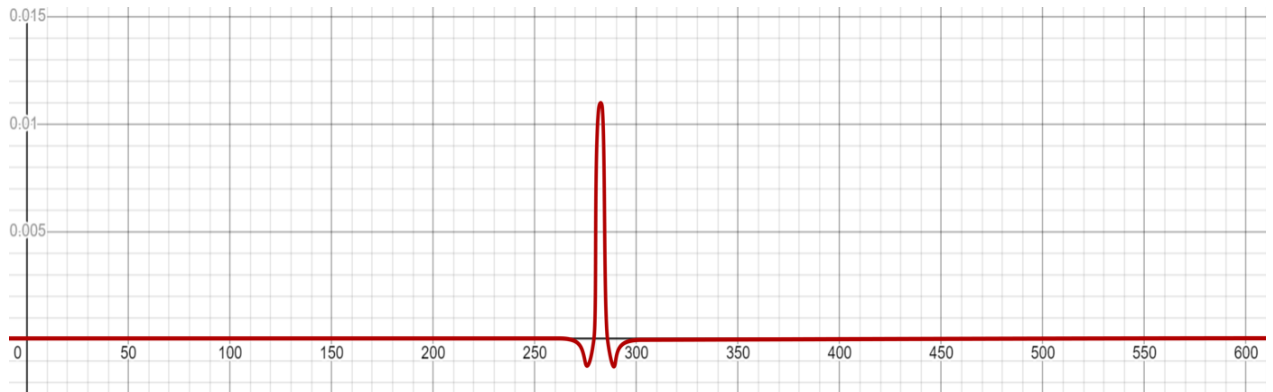


Рисунок 3.13 – График для HW (составлено автором)

Управление толщиной с помощью основных исполнительных механизмов регулирования толщины (СС) рассчитывается по формуле (3.6):

$$\Delta y_l = 1,85e^{-3|l-0,1|} \cos(0,5(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.6)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м² / мк / % (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n -го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.14.

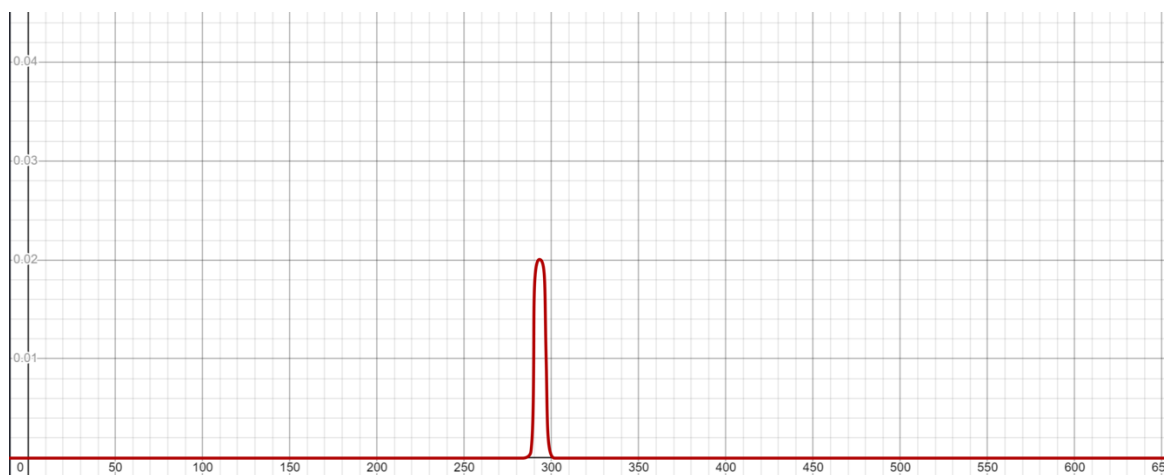


Рисунок 3.14 – График для СС (составлено автором)

Управление толщиной с помощью основных исполнительных механизмов регулирования массы 1 м^2 (CW) рассчитывается по формуле (3.7):

$$\Delta y_l = 0,05e^{-1,3|l-0,1|} \cos(1,1(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.7)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м^2 / мк / $\%$ (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n -го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.15.

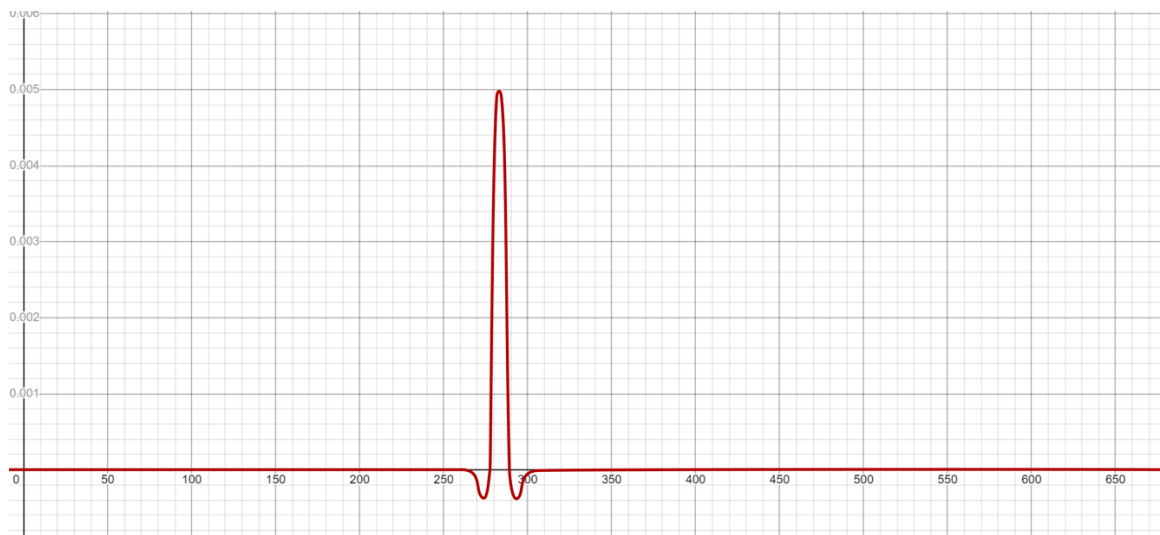


Рисунок 3.15 – График для CW (составлено автором)

Управление толщиной с помощью основных исполнительных механизмов регулирования влажности (CH) рассчитывается по формуле (3.8):

$$\Delta y_l = 0,9e^{-0,5|l-0,1|} \cos(0,01(2l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3.8)$$

где Δy_l – изменение технологического параметра бумаги, г/м^2 / мк / $\%$ (в зависимости от рассчитываемого параметра);

l – координата параметра относительно n -го исполнительного механизма:

$$l = \dots -2, -1, 0, +1, +2;$$

ΔX_n – изменение положения исполнительного механизма;

График, полученный по данной формуле, представлен на рисунке 3.16.

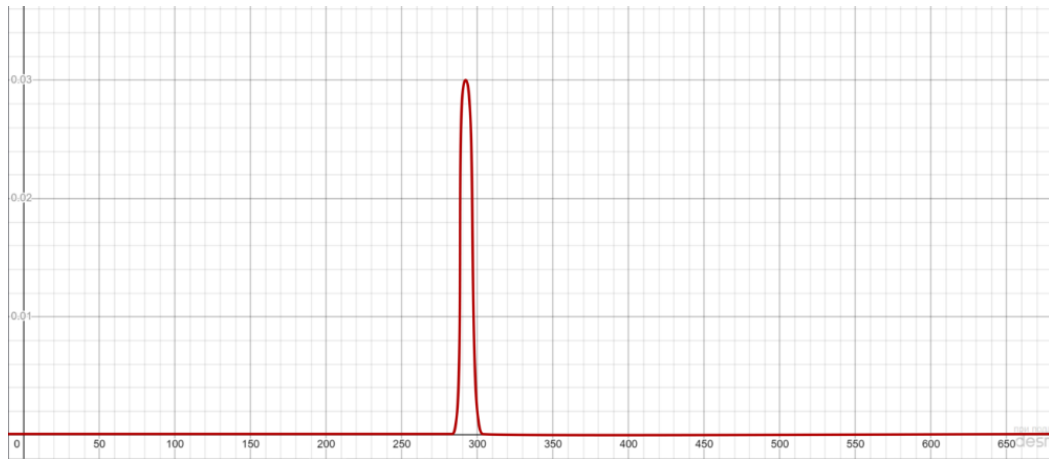


Рисунок 3.16 – График для СН (составлено автором)

В результате исследования были получены семь моделей управления с помощью программных продуктов MATLAB и Desmos Studio [5, 34].

3.4 Выводы к Главе 3

В третьей главе диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Проведен комплексный анализ показателей качества бумаги в поперечном направлении полотна. Сбор экспериментальных данных осуществлялся в условиях действующего производства, что обеспечило высокую степень достоверности полученной информации и позволило учесть реальные производственные факторы, влияющие на качество бумажного полотна.

2. Выполнена многоэтапная обработка экспериментальных данных, включающая фильтрацию шумов, что позволило сформировать базу данных для последующего моделирования. Применение современных методов статистического анализа обеспечило высокую достоверность результатов обработки.

3. На основе обработанных экспериментальных данных разработаны математические модели, описывающие взаимосвязь между управляющими воздействиями и показателями качества бумаги в поперечном направлении.

4. Разработанные математические модели создают теоретическую основу для проектирования интеллектуальной системы управления показателями качества

бумаги в поперечном направлении, учитывающей взаимосвязь параметров и обеспечивающей комплексную оптимизацию процесса.

Таким образом, в результате проведенных исследований получены математические модели, адекватно описывающие процесс формирования показателей качества бумаги в поперечном направлении. Эти модели являются необходимым фундаментом для разработки эффективной системы управления, способной обеспечить высокое качество бумажной продукции при оптимальном использовании ресурсов.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ БУМАГИ

4.1 Особенности функционирования и эксплуатации исполнительных механизмов

Особенности функционирования и эксплуатации исполнительных механизмов были проанализированы в результате исследования бумагоделательной машины №7 Кондопожского ЦБК. Управление массой метра квадратного бумажного материала происходит с помощью автоматизированной системы управления «TERMATROL».

Регулировка массы 1 м^2 бумажного полотна производится за счет изменения размера щели между нижней и верхней губами (при изгибании верхней) отдельно по каждой из 59 зон.

К верхней губе подсоединены стержни, которые представлены на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Стержни Equilex на БДМ № 7 (фото автора)

Стержни Equilex состоят из полого металлического цилиндра, который содержит сменный внутренний нагревательный элемент. Нагревательный элемент представляет собой нихромовую проволоку, которая проходит по всей длине. По

всей длине имеются керамические изоляторы, которые надеты на саму проволоку и изолируют элемент от электрического контакта со стержнем. Металлический цилиндр изолирован от попадания воды и бумажного полотна. Когда к внутреннему нагревательному элементу подается питание, температура повышается, в результате чего стержень нагревается за счет передачи тепла от нагревательного элемента к стержню. Когда стержень из нержавеющей стали нагревается, он подвергается тепловому расширению и перемещает верхнюю губу вниз, уменьшая вытекание бумажной массы из щели напорного ящика. Циклический нагрев поддерживает положение верхней губы, при уменьшении нагрева стержни остывают и втягиваются, тем самым приподнимая верхнюю губу и увеличивая щель напорного ящика. Нагрев происходит циклически, период цикла составляет 10 с., где данное время – это 100 % положение актуатора. Меняя время нагрева, меняется длина стержня и положение верхней губы.

Нагревательный элемент представлен на рисунке 4.2.

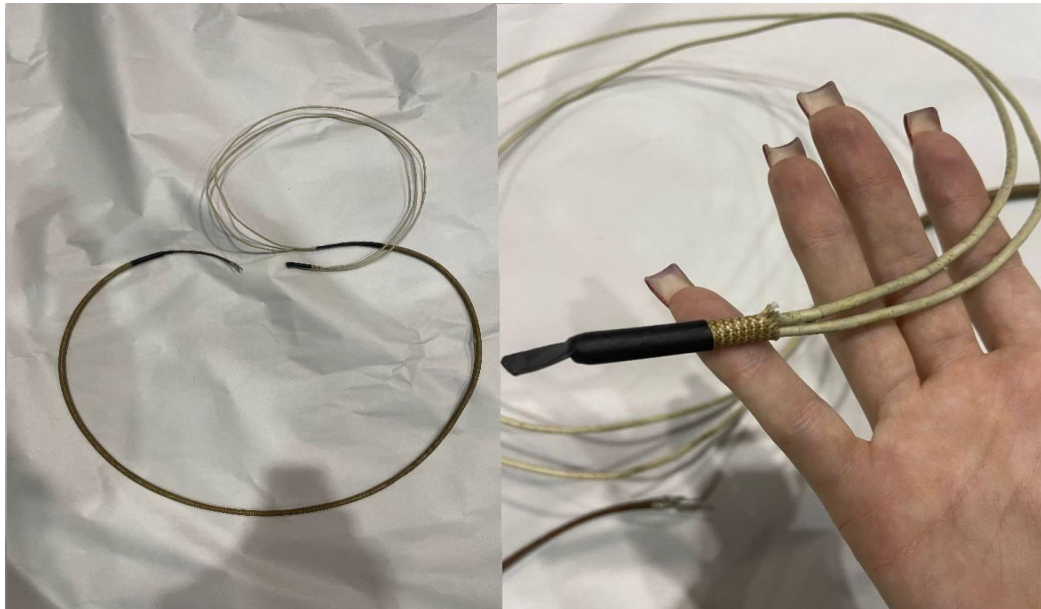


Рисунок 4.2 – Нагревательный элемент (фото автора)

Циклическое управление осуществляется с помощью реле, то есть подается напряжение, происходит замыкание контакта и тем самым начинается нагрев стержня. В зависимости от задания актуатора на системе (%), генерируется дискретный выход (24 вольта). Выход генерирует определенную длину импульса, который подается на реле управления питания нагревания стержня.

Самое важное ограничение для данных актуаторов представляет собой перепады высоты напускной щели. Разница между соседними актуаторами не должна превышать 10 %, в противном случае это может привести к искривлению верхней губы [24].

Из-за ограничения на разницу между актуаторами, а также достигая максимального уровня задания актуатора система не всегда может регулировать напускную щель, в таком случае машинист осуществляет ручное управление положения верхней губы с помощью механизмов «барашков», далее предаёт управление системе автоматизации. «Барашки» для ручного управления представлены на рисунке 4.3.



Рисунок 4.3 – «Барашки» для ручного управления (фото автора)

Также установлено значение среднего уровня положения актуаторов, и хоть у системы есть допустимый диапазон отклонений, она все равно стремится к среднему значению.

Ограничения актуаторов в системе управления представлены на рисунке 4.4.

Управления влажностью бумажного полотна в поперечном направлении осуществляется с помощью системы управления «IQAQUAPRO».

The screenshot shows the 'Actuator Handler for H1' window with a status bar at 97.55.12. The interface is divided into several sections for parameter configuration:

- Position Limits:** Maximum Position (50.000 %), Minimum Position (0.000 %), Change Limit (30.000 %), Difference Limit (10.000 %), Bending Limit (30.000 %).
- Alarm Settings:** Zone Max Limit Alarm (Off), Zone Min Limit Alarm (Off), Difference Limit (1st Order) (On), Bending Limit (2nd Order) (Off).
- Control Parameters:** Enable Level Hold (On), Manual Level Hold (Off), Available/Auto (Auto only), Average/Extremum (Average), Minimum/Maximum (Minimum), Holding Level (23.000 %), Level Change (0.038 %).
- Break Settings:** Break Target (0.000 %), Ramp Deadband (15.000 %), Break Ramp Step (100.000 %), Recovery Ramp Step (25.000 %).
- Reference and Safety:** Break Reference (Setpoint), Break Safety Enable (Off), Restore after Break (Off), Break Active (Off).
- Control Action:** Control Connected (On), Control Reference (Setpoint), Control Action Limit (5.000 %).

Рисунок 4.4 – Ограничения актуаторов по весу (составлено автором)

Настройки управления веса представлены на рисунке 4.5.

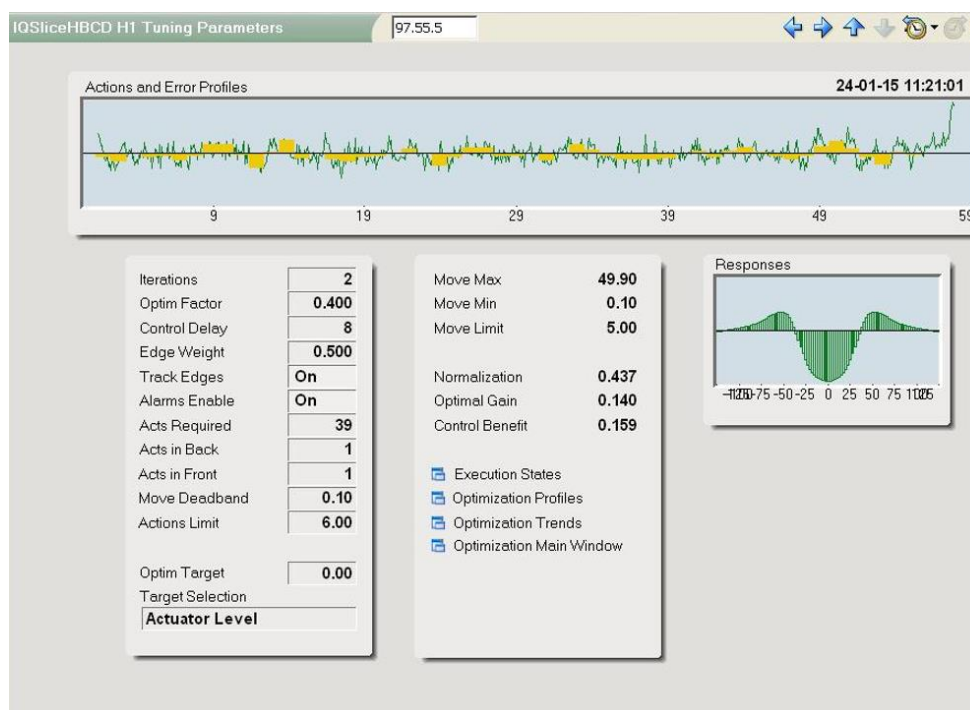


Рисунок 4.5 – Настройки управления веса (составлено автором)

Влажность бумаги в поперечном направлении регулируется путем доувлажнения пересушенной бумаги в 116 зонах по ширине бумажного полотна. Над каждой зоной стоит специальный спрысковый модуль.

Система IQAQUAPRO присоединяется к бумагоделательной машине с помощью опорных стержней на ее торцах. Опорные стержни соединяются с

механизмом отведения, который используется для перемещения увлажнителя из рабочего положения в положение технического обслуживания и наоборот.

Управление механизмом отведения должно быть организовано так, чтобы перемещение со стороны подачи и со стороны привода происходило ровно и одновременно. Движущийся механизм обеспечивает компенсацию теплового расширения штанги. Точка неподвижного крепления располагается на штанге опрыскивателя со стороны привода. Но на БДМ № 7 перемещение увлажнителя не используется, так как в этом нет необходимости.

Форсунки воздухонепроницаемого уплотнения предотвращают попадание на бумажное полотно в зоне увлажнения постороннего ламинарного потока воздуха и выравнивают потоки воздуха в зоне увлажнения.

Излишки аэрозоля удаляются из зоны увлажнения с помощью камеры, встроенной в штангу.

Количество воды, регулируемое исполнительным устройством, и сжатый воздух подаются в пневмоводяную форсунку. Сжатый воздух превращает воду в мелкодисперсный аэрозоль в головке форсунки [11].

Воздухонепроницаемые форсунки представлены на рисунке 4.6.

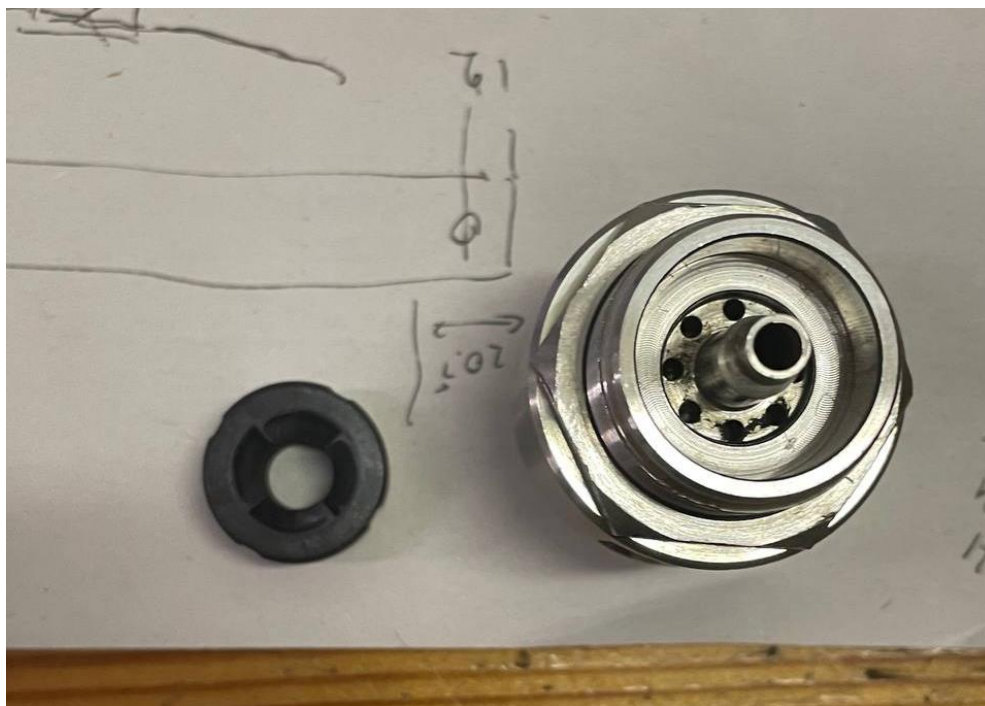


Рисунок 4.6 – Форсунки воздухонепроницаемого уплотнения (фото автора)

Блок исполнительных устройств, который представлен на рисунке 4.7, разделен на три функциональных субузла: шкаф исполнительного устройства (2), шкаф электрооборудования (1) и шкаф подачи воды (3).

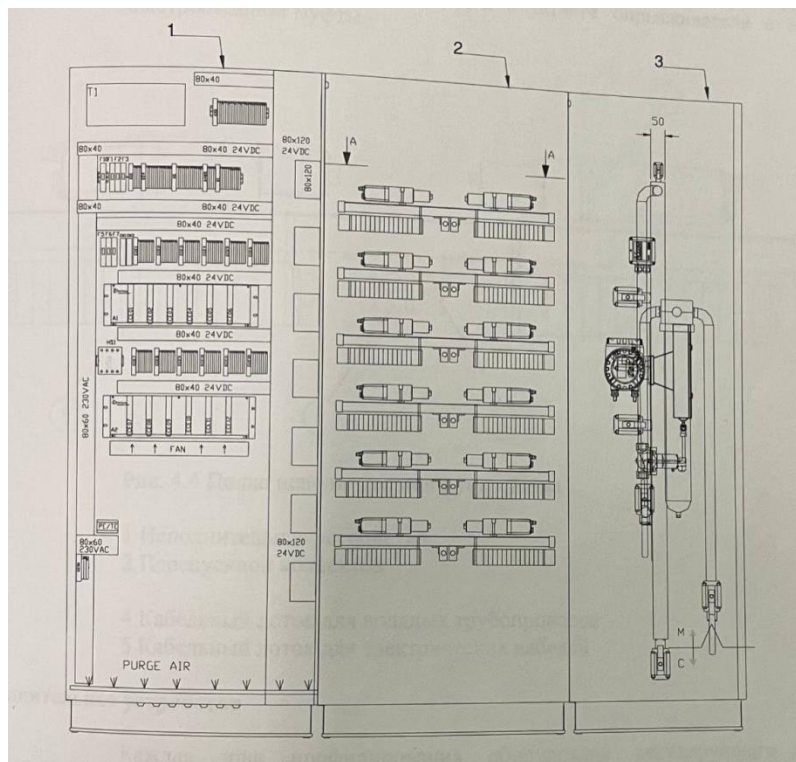


Рисунок 4.7 – Блок исполнительных устройств [19]

Исполнительные устройства располагаются на выдвижных лотках для облегчения их техобслуживания. Каждый лоток, состоящий из шестнадцати исполнительных устройств, содержит перепускной водяной коллектор, из которого вода подается к каждому исполнительному устройству.

Электрические провода и водяные трубопроводы проложены в траке лотка исполнительного устройства. От шкафа исполнительных устройств водяные трубки от исполнительных устройств подведены к штанге опрыскивателя.

Каждая зона профилирования оборудована регулирующим водяным шаговым двигателем с электромеханическим исполнительным устройством ЕМА-5000, представленный на рисунке 4.8 [8].

Когда шток клапана перемещается, внутри цилиндрической полости образуется зазор. Кривая управления клапана линейная, поэтому количество воды, протекающее через клапан, прямо пропорционально перемещению штока клапана. Перемещение штока исполнительного устройства измеряется импульсным

датчиком в исполнительном устройстве. Максимальный выход штока соответствует 300 импульсам. Из этого следует, что шток может иметь 300 различных положений.



Рисунок 4.8 – Электромеханическое устройство ЕМА-5000 (фото автора)

Управление исполнительными устройствами осуществляют платы управления ЕСЕ. Одна плата используется для управления восьмью исполнительными устройствами, а также для считывания импульсного сигнала обратной связи. Платы управления ЕСЕ исполнительными устройствами расположены в шкафу электрооборудования.

Перепускной водяной входной коллектор исполнительного устройства располагается в шкафу подачи воды, из него поток воды разделяется и подается к перепускным коллекторам на лотках исполнительного устройства.

Запорные вентили перепускных коллекторов на лотках исполнительного устройства располагаются в шкафу подачи воды [24].

В шкафу подачи воды также имеется перепускной коллектор приборного воздуха, который используют для охлаждения электроники в корпусах исполнительных устройств и в шкафу электрооборудования.

Датчик-расходомер в главной водяной магистрали шкафа подачи воды показывает общий расход воды в системе увлажнителя. Другой датчик-расходомер

подключен параллельно главной волной магистрали и предназначен для измерения расхода воды в одном исполнительном устройстве.

Станция водоподготовки питает систему увлажнителя необходимой водой при надлежащей температуре и давлении. Вода поступает на станцию водоподготовки и проходит систему фильтрации при помощи фильтров, а также нагревания при помощи теплообменника за счет горячей воды. Температура нагрева регулируется с помощью клапана [25].

На каждом фильтре установлены датчики перепада давления, которые сигнализируют оператору о засорение определенного фильтра.

Засоренный фильтр можно изолировать от остального контура на время замены картриджа фильтра, не нарушая нормальное функционирование системы увлажнения.

Нагретая вода подается в накопительный бак. Управление уровнем воды в баке реализовано с помощью датчика уровня, который работает с помощью давления, и автоматического клапана. С помощью насоса, установленного на станции, вода перекачивается из бака в перепускной коллектор шкафа подачи воды блока исполнительных устройств через фильтр. На станции водоподготовки имеется резервный насос, предусмотренный на случай возможной неисправности основного насоса [67].

На станции воздухоподготовки сжатый воздух подают в пневмоводяные форсунки. На станции воздухоподготовки установлены одна воздушодувка, регулируемая преобразователем частоты для формирования требуемого давления. Воздушодувка соединена с главным пневмопроводом, который направляет произведенный воздух в штангу опрыскивателя. Главный пневмопровод оборудован предохранительным клапаном, который предотвращает повышение давления в пневмопроводе в условиях возможных неисправностей. Предохранительный клапан устраняет перегрузку воздушодувок в состоянии неисправности.

Управляемая потоком воздуха задвижка установлена со стороны впуска воздухоудвки для предотвращения протекания воздуха в обратном направлении в камеру воздухоудвки при ее выключении.

Ограничения актуаторов: влажность должна быть 8 %, по перепадам между актуаторами никаких ограничений нет (рисунок 4.9).

The screenshot displays the 'Handler for M1' control interface. At the top, there is a status bar with the text 'Handler for M1' and a numerical value '97.56.12'. Below this, the interface is organized into several panels with various settings:

- Position Limits Panel:**
 - Maximum Position: 99.000 %
 - Minimum Position: 0.000 %
 - Change Limit: 100.000 %
 - Difference Limit: 100.000 %
 - Bending Limit: 20.000 %
- Zone Limits Panel:**
 - Zone Max Limit Alarm: Off (Zones: 1)
 - Zone Min Limit Alarm: Off (Zones: 1)
 - Difference Limit (1st Order): Off
 - Bending Limit (2nd Order): Off
- Control Settings Panel:**
 - Enable Level Hold: On
 - Manual Level Hold: Off
 - Available/Auto: Auto only
 - Average/Extremum: Average
 - Minimum/Maximum: Minimum
 - Holding Level: 25.000 %
 - Level Change: -0.157 %
 - Control Connected: On
 - Control Reference: Feedback
 - Control Action Limit: 25.000 %
- Break Settings Panel:**
 - Break Target: 0.000 %
 - Ramp Deadband: 15.000 %
 - Break Ramp Step: 100.000 %
 - Recovery Ramp Step: 35.000 %
 - Break Reference: Feedback
 - Break Safety Enable: On
 - Restore after Break: On
 - Break Active: Off

Рисунок 4.9 – Ограничения актуаторов по влажности (составлено автором)

Настройки управления влажности представлены на рисунке 4.10. Регулирование толщины бумаги в поперечном направлении осуществляется с помощью системы «IQINUCTION».

Толщина бумаги регулируется за счет нагрева одного из каландровых валов отдельно в 116 зонах индукционными грелками.

Система «IQINUCTION» регулирует толщину бумажного полотна с помощью балки, в которую встроены катушки, представленные на рисунке 4.11. Регулирование происходит за счет индукционного нагрева, индукционной катушки и силового индукционного блока.

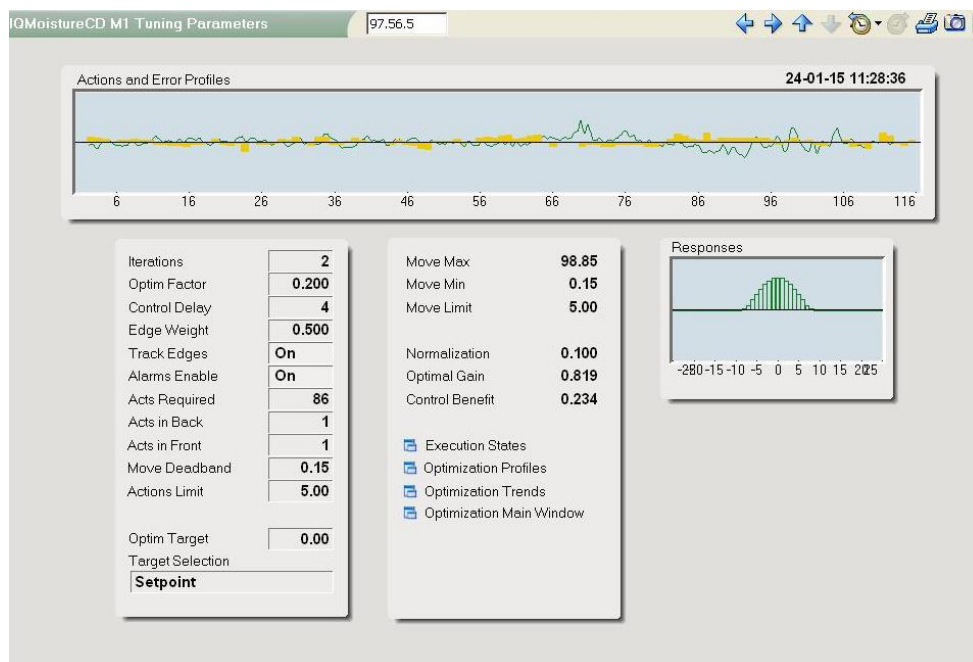


Рисунок 4.10 – Настройки управления влажности (составлено автором)

Индукционная балка классифицируется как стационарное высокочастотное устройство, использующее радиочастоты для возбуждения нагрева во вращающемся валу. Изделие не имеет вращающихся частей, но использует пневматические возвратные системы для подачи/возврата к/от вала. Продукт соответствует Классу 2 по EN55011.

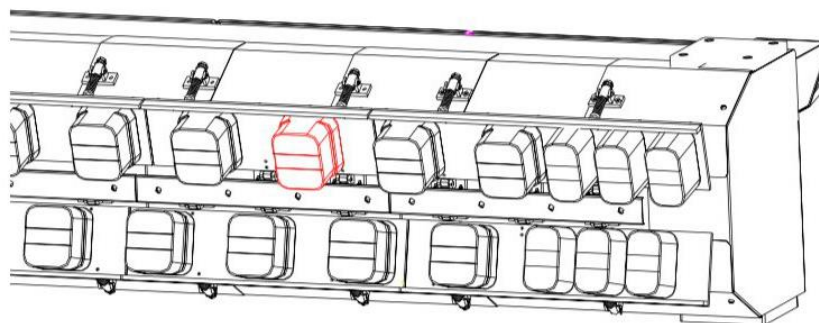


Рисунок 4.11 – Катушки на балке [25]

Силовой индукционный модуль представлен на рисунке 4.12. Силовой Модуль индукционного блока – это полупроводниковый 17-38 КГц источник питания, способный выдавать до 4 КГц энергии. Модуль использует IGBT технологию для высокой эффективности включения. К модулю подается 208 В 3 Фазы и затем конвертируются в 480 В. Во время работы модуля нельзя касаться его отверткой или другим инструментом. Логика безопасности в системе контроля обеспечивает отключение силового модуля, если дверца балки открыта.

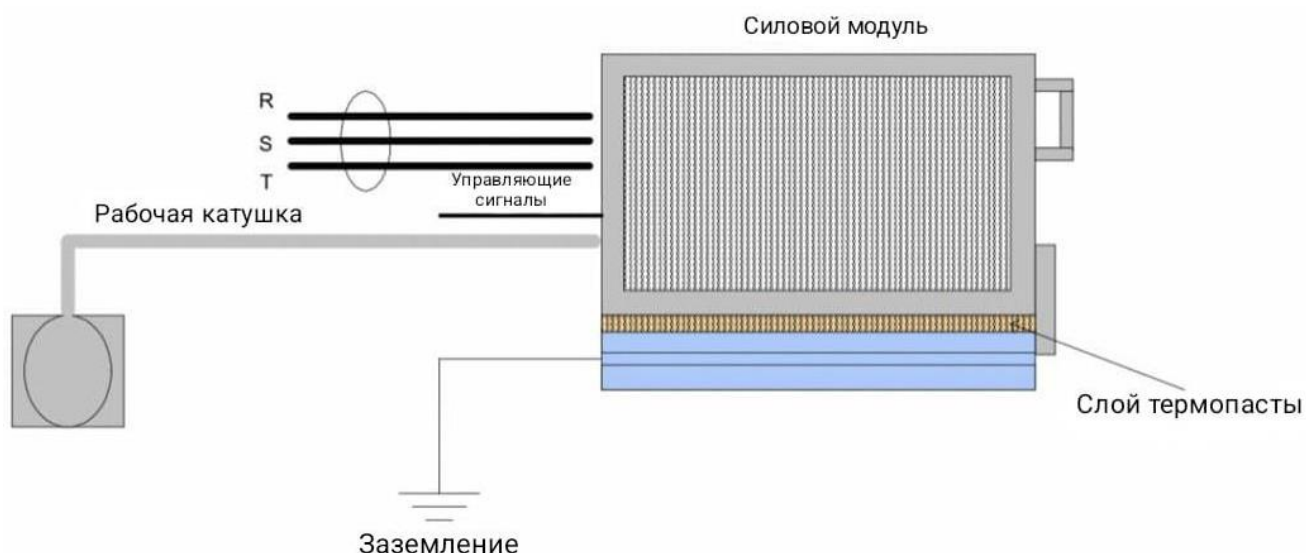


Рисунок 4.12 – Силовой индукционный модуль [25]

Индукционный нагрев является технологией, при которой электрический ток высокой частоты, выработанный источником энергии, передается на индукционные катушки, которые генерируют интенсивное магнитное поле. Когда индукционные катушки перемещаются в непосредственную близость к металлу, магнитные поля индуцируют генерирующие тепло электрические токи в металле. В случае системы индукционного нагрева, нагрев используется для контроля диаметра расширения вала каландра в зоне прямо под индукционной катушкой. Регулирование диаметра вала каландра в большом количестве узких зон вдоль его длины позволяет контролировать зазор между валами каландра, таким образом и толщину бумажного полотна [44].

Индукционные катушки смонтированы и прикреплены к индукционной балке. Конструкция представлена на рисунке 4.13. На балке инверторов, установленной внизу, имеется 20 блоков преобразователя частоты. Каждый блок отвечает за 6 катушек индукционного нагрева. Каждая индукционная катушка соединена при помощи силового кабеля, с повышенной изоляцией. Обе балки герметичны, очищаются воздухом и охлаждаются водой с помощью станции водоподготовки, на которой установлен теплообменник. Балка использует индукционные катушки для эффективной передачи тепловой энергии на вал каландра (рисунок 4.13).



Рисунок 4.13 – Катушки на индукционной балке на БДМ № 7 (фото автора)

Каждая катушка привода отвечает за нагрев четко определенной ширины каландра, называемой зоной. Чтобы индукционная система функционировала эффективно, балка позиционируется и настраивается так, чтобы рабочие индукционные катушки находились на расстоянии от 3 до 4 мм от поверхности вала каландра. Для целей безопасности, обязательно требуется отведение балки от поверхности вала, когда происходит обрыв бумажного полотна. Поэтому используются пневматические цилиндры, для отвода балки от поверхности вала.

Для создания магнитных полей на участках используются токи высокой частоты. Эти токи генерируются электроникой в силовых модулях, способных производить до 4 кВт энергии нагрева вала. Для каждой шести индукционных катушек, установленной вдоль поверхности вала каландра, существует свой силовой модуль внутри балки инверторов, оснащенный собственным выключателем, смонтированным внутри балки. Силовые модули с электроникой представлены на рисунке 4.14.

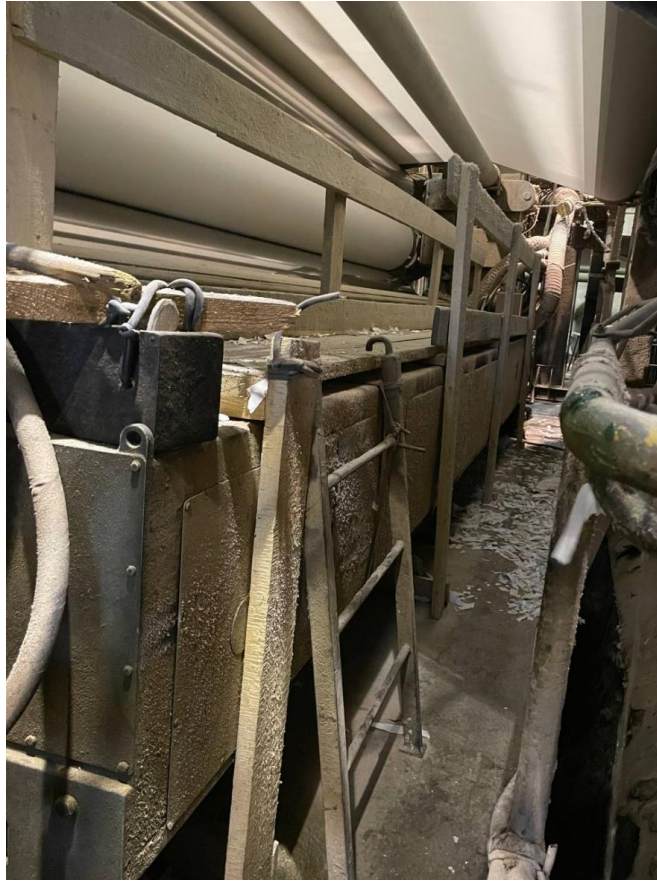


Рисунок 4.14 – Силовые модули с электроникой на БДМ № 7 (фото автора)

Для балки инверторов и балки катушек индукционного нагрева необходимо охлаждение, для защиты от перегрева катушек, а также IGBT (преобразователи высокой частоты) модулей. Охлаждение и подача воды организуется на станции водоподготовки. На которой установлен насос для подачи воды, а также клапан для регулировки давления воды. При помощи теплообменника и клапана, вода охлаждается до температуры 30 °С. Также в балку инверторов и балку катушек подается воздух под давлением, для создания давления подпора (защита от попадания пыли и грязи), а также как дополнительное охлаждения.

Помимо силовой части в блоке инвертора еще находится электроника, которая не предназначена для работы в таких условиях. В связи с этим, периодически, модули электроники выходят из строя.

Из-за удаленности балки катушек и балки инверторов, они соединяются трехметровым силовым кабелем. Сами кабели расположены близко, и генерируют электромагнитные поля, которые мешают работе друг другу. В более современных системах индукционного нагрева, такой проблемы нет. Поскольку расстояние от

катушки до силовой части минимально и составляет несколько сантиметров, в результате неудачной конструкции индукционный нагрев не может работать в полную силу. Установлено ограничение на максимальную работу актуаторов не выше, чем 19 %, что очень мало для нормального управления толщиной. В то время как на других БДМ значения устанавливаются от 60 до 80 %. Ограничения актуаторов представлены на рисунке 4.15 [3].

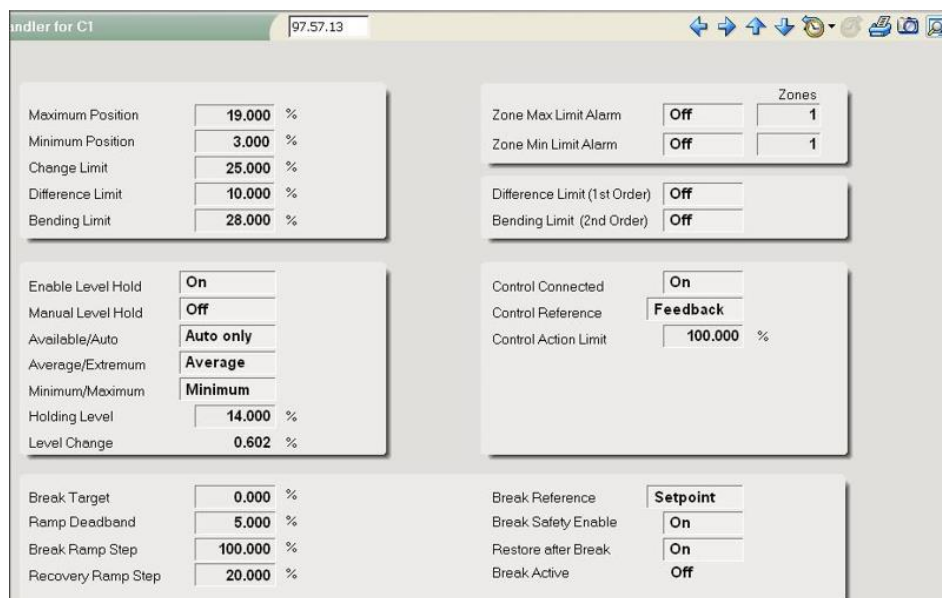


Рисунок 4.15 – Ограничения актуаторов по толщине (составлено автором)

Настройки управления толщины представлены на рисунке 4.16.

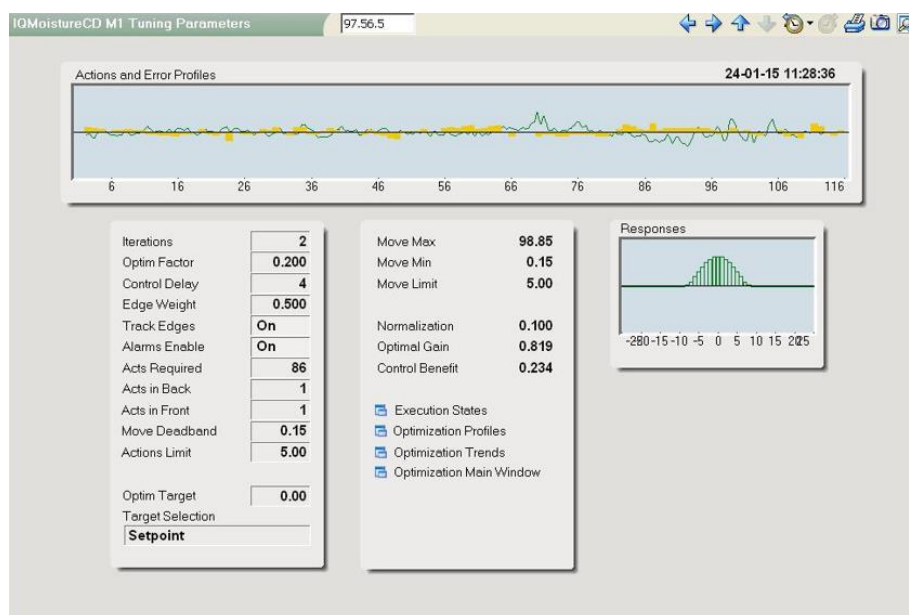


Рисунок 4.16 – Настройки управления толщины (составлено автором)

Управление весом считается практически безотказной и долго служащей системой. Но, как и у любых механизмов, у нее иногда изнашиваются некоторые

составляющие. Например, металл, из которого сделаны стержни, со временем может изнашиваться, такой процесс является неизбежным. Для предотвращения аварий требуется регулярно осматривать его состояние, чтобы своевременно решить проблему.

К задней части стержней установлена клеммная коробка. Требуется подбирать качественный термостойкий пластик, так как в этом месте очень высокие температуры. Также возможно попадание на них воды и бумажной массы, что может привести к замыканию.

В контуре управления влажностью одним из главных факторов, влияющих на качество работы системы, является качество воды, подаваемой по трубкам. Для избегания отказов приборов требуется устанавливать качественные фильтры, а также регулярно чистить бак с водой. Так как различная грязь и примеси проходят через трубки диаметром 6 мм, и в случае, когда вода стоит в этой трубке, грязь начинает засыхать, и дальнейшая подача воды на бумажное полотно становится затруднительной.

Нужно регулярно проверять состояние и качество резиновой манжеты для ограничения прохождения воды в самом двигателе, иначе он будет пропускать воду на балку увлажнителя в закрытом состоянии и может выйти из строя.

Конструкция для управления толщиной в целом считается не очень удачной, так как блок конвертера помимо силовой части, которая преобразует ток, содержит еще и электронику. Вокруг балки с этими блоками всегда очень высокие температуры до 70 °С, а также снизу поступает пар, который вырабатывается от переработки брака. Из-за этого платы выходят из строя и их приходится заменять.

Также балка с катушками подвергается повреждению из-за близкого нахождения к валу. Если несвоевременно заметить, что полотно не пошло дальше на накат, а стало наматываться на этот вал, то бумажное полотно будет давить на балку и погнуть ее.

Балка должна двигаться и иметь возможность подвода и отвода. Осуществляется это с помощью линейных подшипников, которые надо своевременно смазывать. В противном случае подшипник может сломаться.

Несоблюдение бережливого использования оборудования и механизмов может привести к ухудшению качества выпускаемой продукции [32].

4.2 Алгоритм формирования управляющих воздействий

В результате исследования были разработаны алгоритмы выбора исполнительных механизмов.

Алгоритм выбора исполнительного механизма по каналу управления весом, в результате которого выбирается исполнительный механизм с наибольшим запасом по диапазону перемещения представлен на рисунке 4.17.

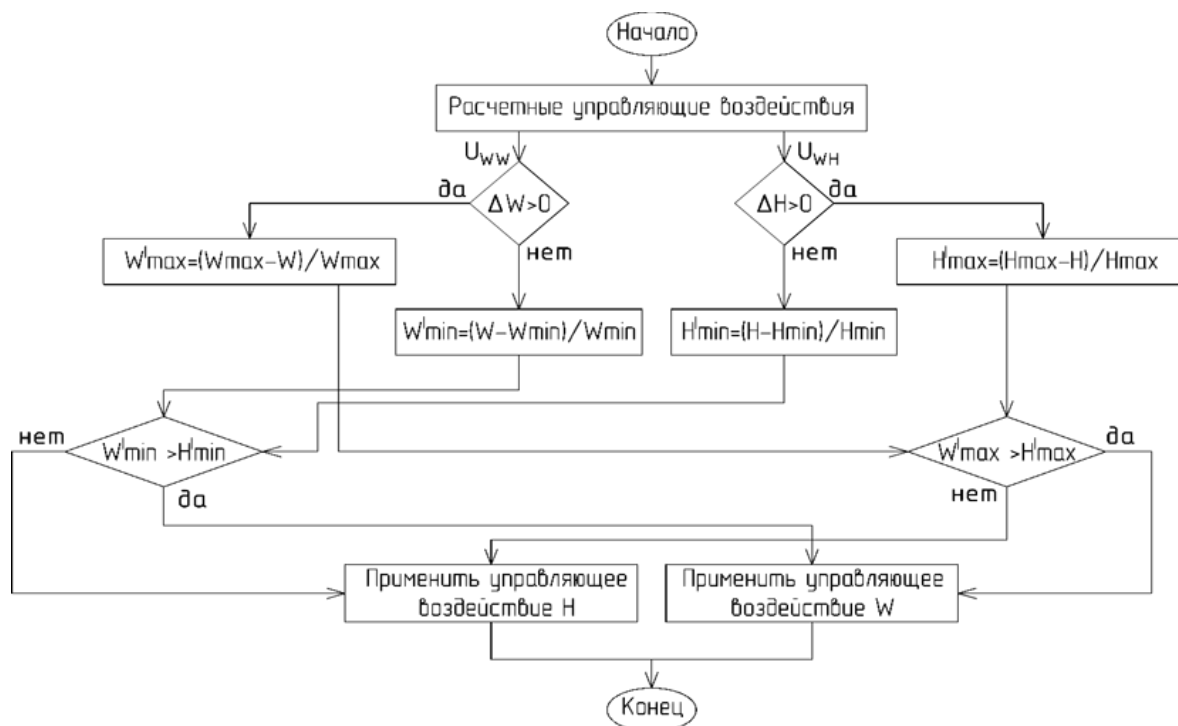


Рисунок 4.17 – Алгоритм выбора исполнительного механизма по каналу управления весом (составлено автором)

Аналогичным образом составлен алгоритм выбора исполнительного механизма по каналу управления влажностью и представлен на рисунке 4.18

Алгоритм выбора исполнительного механизма по каналу управления толщиной представлен на рисунке 4.19. Он усложнен, так как на профиль толщины влияют три параметра: вес, влажность и толщины.

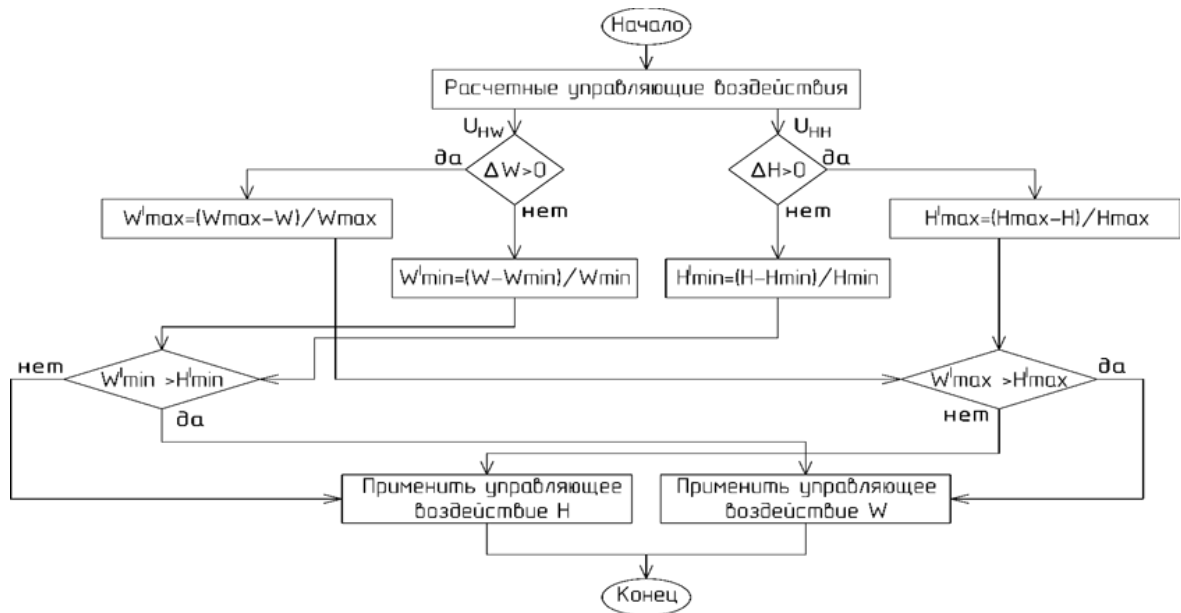


Рисунок 4.18 – Алгоритм выбора исполнительного механизма по каналу управления влажностью (составлено автором)

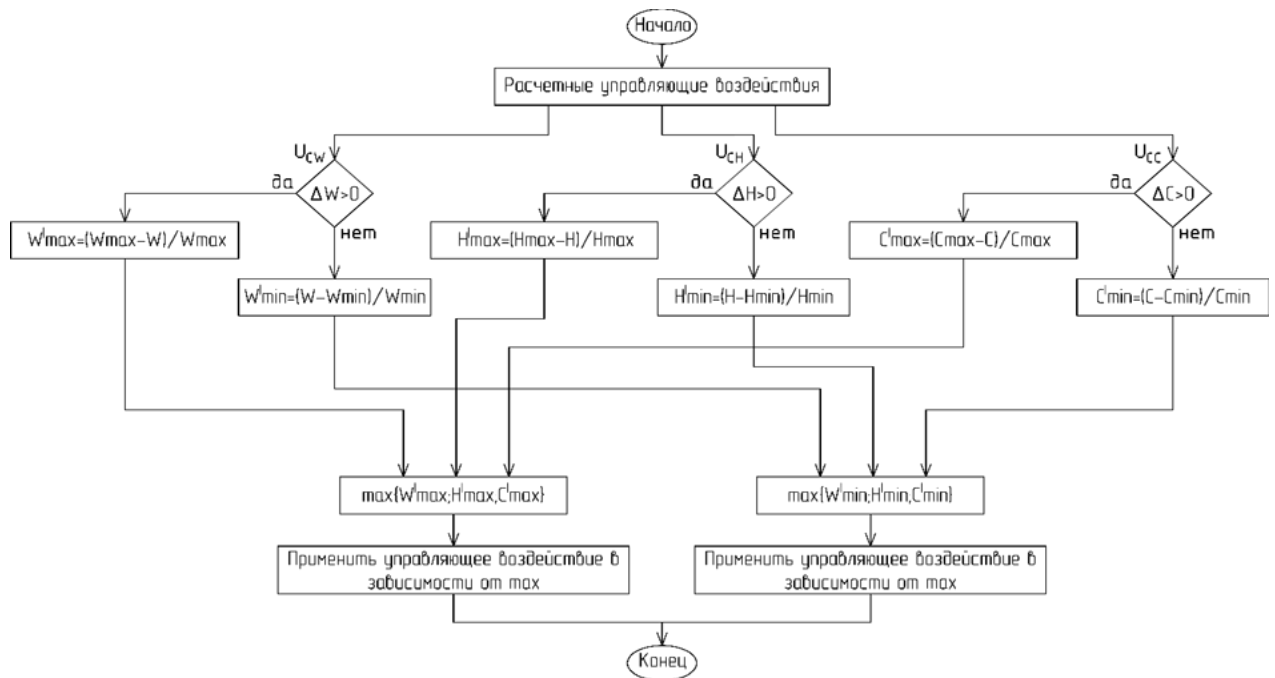


Рисунок 4.19 – Алгоритм выбора исполнительного механизма по каналу управления толщиной (составлено автором)

Для реализации системы управления показателями качества бумаги по ширине бумажного полотна был разработан общий алгоритм выбора исполнительных механизмов (рисунок 4.20).

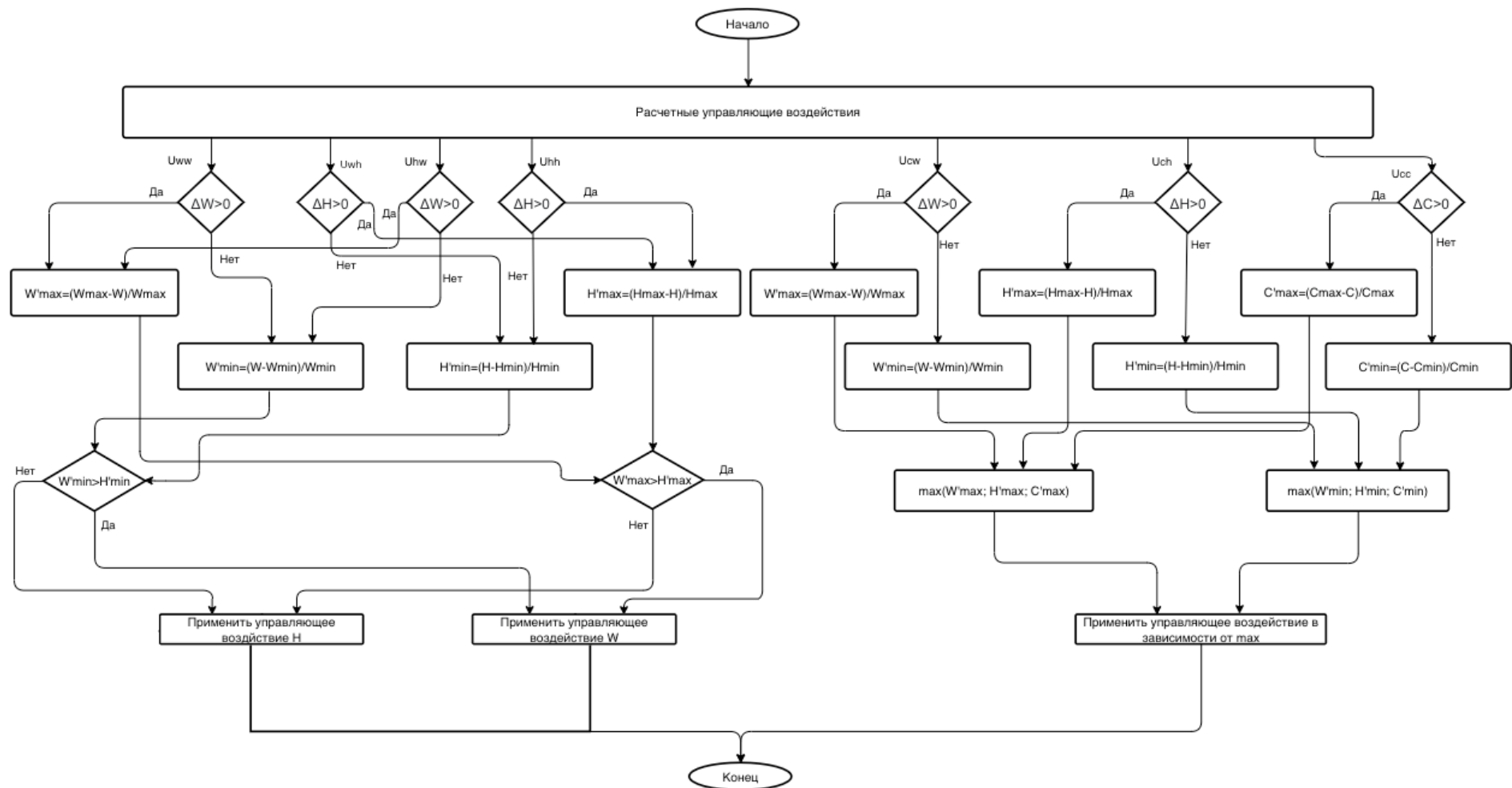


Рисунок 4.20 – Алгоритм взаимосвязанного управления (составлено автором)

Алгоритм контроля положений исполнительных механизмов представляет собой систему взаимосвязанного управления, состоящую из семи моделей. Он нужен для того, чтобы система при достижении ограничения между перепадами соседних актуаторов у одного из параметров могла регулироваться с помощью исполнительных механизмов другого параметра. Регулирование осуществляется не моментально и с небольшим шагом изменения параметров.

У каждого из актуаторов есть запас по действию, и когда исполнительные механизмы находятся на границе своего положения, они не способны реализовать свои функции управления. Естественно управление самим параметром является самым эффективным, но не всегда возможным. Система взаимосвязанного управления справляется с данной задачей с помощью регулирования параметров по трем каналам управления.

В алгоритме представлены три параметра: вес, влажность и толщина. Если увеличить параметр веса или влажности, соответственно происходит увеличение толщины. Также изменение параметров веса и влажности влияют друг на друга. Но изменение толщины никак не может повлиять на изменение других параметров, поэтому выделяется только семь моделей взаимосвязанного управления параметрами качества бумаги.

В начале алгоритма в левой части представлено управление параметром веса 1г/м^2 бумажного полотна. Можно увидеть, что управление весом происходит за счет изменения положения исполнительных механизмов веса в большей степени и исполнительных механизмов влажности в меньшей степени. Данные показатели сравниваются с нулем для того, чтобы определить необходимое управляющее воздействие (в меньшую или большую сторону), после этого вычисляются их максимальные и минимальные значения и затем сравниваются. Так как сравниваются разные параметры в формулах нахождения максимума и минимума, то необходимо сделать из них приведенные величины. Из этого сравнения система делает выбор каким параметром регулировать вес.

Аналогично, параметр влажности может регулироваться исполнительными механизмами влажности и веса. Показатели сравниваются с нулем, находятся

максимум и минимум и затем сравниваются снова. Исходя из этого сравнения выбирается управляющее воздействие, которое следует применить

Параметр толщины может регулироваться исполнительными механизмами толщины, влажности, веса. Принцип нахождения максимумов и минимумов такой же, как и у предыдущих контуров управления. Применение управляющего воздействия осуществляется исходя из выбранного максимума среди трех параметров [3,6].

4.3 Выводы к Главе 4

В четвертой главе диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Проведен детальный анализ строения исполнительных механизмов бумагоделательной машины, влияющих на эффективность управления параметрами качества бумаги.

2. Предложен инновационный подход к формированию управляющих воздействий, основанный на принципе минимизации суммарного перемещения исполнительных механизмов при достижении заданного профиля качества. Это позволяет снизить износ оборудования и увеличить срок его службы.

3. Разработан алгоритм координированного управления исполнительными механизмами, обеспечивающий согласованное изменение параметров, влияющих на различные показатели качества бумаги. Алгоритм учитывает взаимное влияние механизмов и предотвращает возникновение конфликтных ситуаций при управлении.

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан алгоритм для системы управления параметрами качества бумаги, учитывающий ограничения исполнительных механизмов и обеспечивающий оптимальный выбор управляющих воздействий. Предложенные алгоритмы создают основу для построения эффективной системы управления, способной обеспечить высокое качество бумажной продукции при рациональном использовании ресурсов и минимизации износа оборудования.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА БУМАГИ ПО ШИРИНЕ ПОЛОТНА НА ОСНОВЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

5.1 Структура и топология нейросетевых регуляторов

Архитектура нейросетевого контроллера базируется на принципах прямого распространения сигнала с применением алгоритма обратного распространения градиента для процедуры обучения. Стратегия подготовки нейросетевого контроллера основывается на применении нейросетевой модели объекта управления.

Нейросетевая модель демонстрирует потенциал искусственных нейронных сетей и может применяться для предсказания характеристик профиля бумажного полотна. В рассматриваемой системе автоматизации БДМ для производства печатной бумаги на АО «Кондопожский ЦБК» регулирование толщины осуществляется посредством термического воздействия на каландровый вал в 114 независимых зонах с использованием электронагревательных элементов.

Для решения задач прогнозирования профильных характеристик бумаги возможно применение более детализированных моделей, однако для целей управления достаточно использовать модель с дискретизацией на 114 контрольных точек.

При исключении динамических характеристик объекта нейросетевой контроллер функционирует как инверсная нейросетевая модель с 114 выходными каналами.

Следовательно, архитектура нейросетевого контроллера для зависимостей «масса-толщина», «влажность-толщина», «толщина-толщина» соответствует структурам, представленным на рисунках 5.1, 5.2, 5.3. С целью обеспечения локализации синаптических соединений в процессе обучения, связи между входным и скрытым слоями воспроизводят инвертированную область воздействия регулировочных механизмов. Данный подход существенно оптимизирует процесс обучения за счет сокращения вычислительных операций.

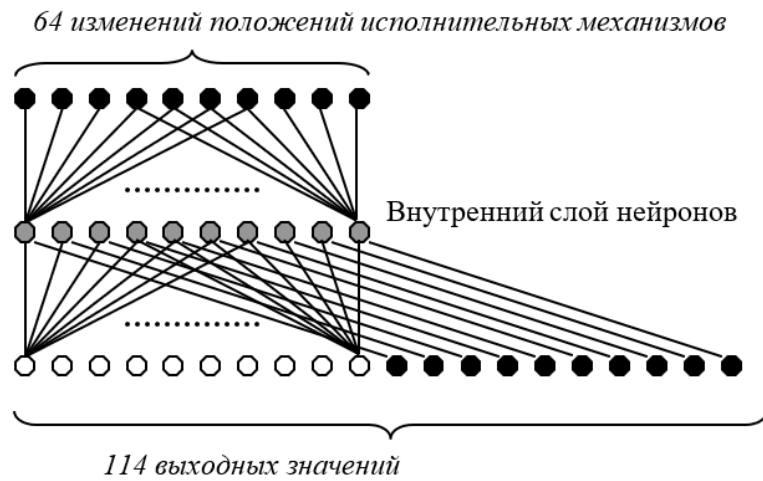


Рисунок 5.1 – Топология нейронного регулятора (зависимость вес – толщина)
(составлено автором)

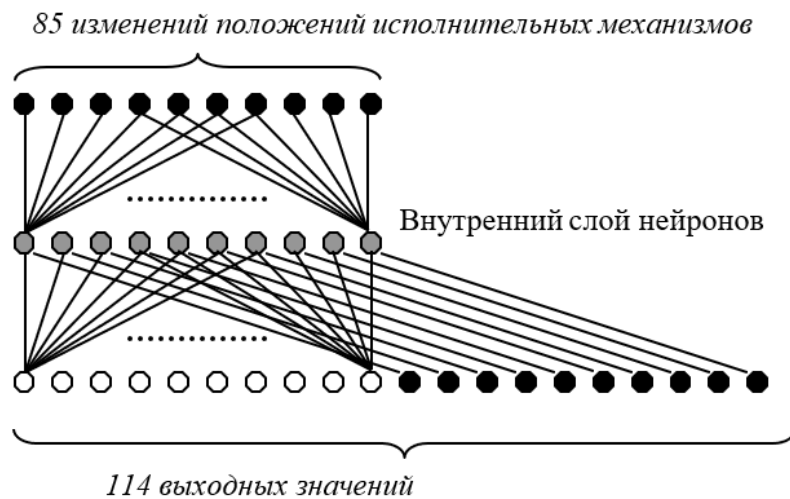


Рисунок 5.2 – Топология нейронного регулятора (зависимость влажность – толщина) (составлено автором)

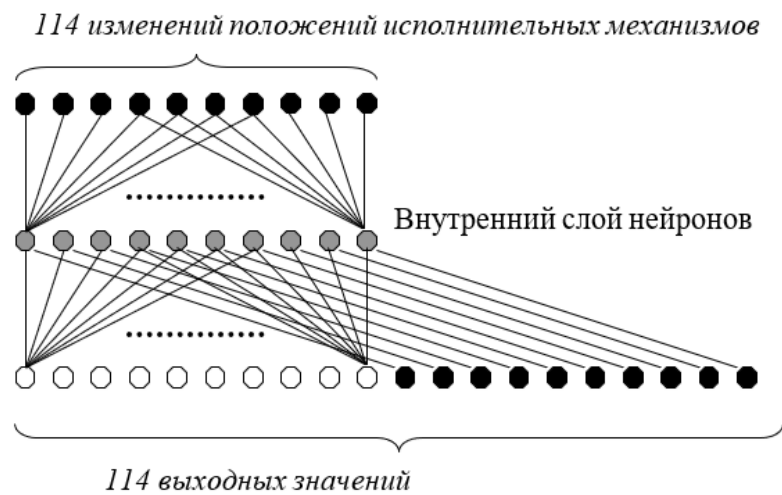


Рисунок 5.3 – Топология нейронного регулятора (зависимость толщина – толщина) (составлено автором)

Алгоритм подготовки нейросетевого контроллера основывается на первоначальном формировании нейросетевой модели. По завершении процесса обучения весовые коэффициенты нейронной модели фиксируются и остаются неизменными. На следующем этапе к обученной нейронной модели добавляются дополнительные слои регулирующего контроллера.

В рассматриваемой конфигурации связи между выходным слоем нейросетевого регулятора и входным слоем нейросетевой модели устанавливаются параллельным способом, характеризуются единичными коэффициентами и остаются неизменными (выполняя функцию передачи информации без модификаций) [6].

5.2 Анализ процесса обучения нейросетевых регуляторов

Процедура адаптации нейросетевых управляющих элементов реализовывалась посредством систематического варьирования объема обучающих данных в тренировочных массивах. Формирование указанных массивов осуществлялось на основе структурированных примеров, характеризующихся определенной архитектурой входных и выходных параметров.

Структура каждого обучающего примера предполагала размещение на входных уровнях нейросетевой архитектуры значений управляющих воздействий исполнительных устройств, в то время как выходные слои содержали соответствующие измеренные величины, регистрируемые сканирующими измерительными системами. Данная конфигурация обеспечивала корректное отображение причинно-следственных связей между управляющими сигналами и результирующими параметрами технологического процесса.

В пределах скрытых слоев архитектуры искусственных нейронных сетей реализуется функционирование основных вычислительных алгоритмов, где происходит селекция и применение соответствующих функций активации для преобразования входных сигналов.

Данные промежуточные уровни нейросетевой структуры представляют собой вычислительные узлы, в которых осуществляется обработка

информационных потоков посредством специализированных математических процедур. В рамках этих слоев выполняется критически важный процесс определения оптимальной трансформирующей функции, которая обеспечивает нелинейное преобразование взвешенных входных данных.

Архитектурные компоненты внутренних слоев функционируют как интеллектуальные процессорные элементы, где каждый нейрон производит вычисления согласно заложенным алгоритмическим принципам. Механизм выбора активационной функции в данных слоях определяет характер математических операций, применяемых для трансформации сигналов, поступающих от предыдущих уровней сетевой структуры.

Процессы, протекающие в скрытых слоях нейросетевой архитектуры, включают в себя комплексную обработку информации, где алгоритмические процедуры осуществляют селекцию наиболее подходящих преобразующих операторов для достижения оптимальных результатов функционирования всей системы.

Оптимизация процесса обучения достигалась путем применения специализированных алгоритмических методик тренировки, основанных на тщательной калибровке коэффициентов скорости адаптации. Указанные параметры определяли интенсивность модификации синаптических весов нейронной сети в процессе итеративного обучения, что непосредственно влияло на эффективность конвергенции алгоритма к оптимальному решению.

В ходе проведенного экспериментального исследования осуществлялся комплексный эмпирический подбор всех критических настроечных параметров системы. Критерием оптимальности служило достижение минимального значения среднеквадратичного отклонения между целевыми и фактически получаемыми выходными характеристиками нейросетевого регулятора. Данный подход позволил определить наиболее эффективную конфигурацию системы управления, обеспечивающую максимальную точность регулирования контролируемых параметров технологического процесса

Перед определением оптимального алгоритма обучения нейронной сети требуется установить объем обучающего набора данных, необходимый для корректной аппроксимации целевой функции. Анализ приведенных графиков (рисунок 5.4) демонстрирует, что расширение тренировочного массива свыше 1000 элементов не способствует улучшению характеристик переходного режима. Данное явление обусловлено стремлением нейросети идентифицировать паттерны в случайных флуктуациях процесса в ходе обучения [6].

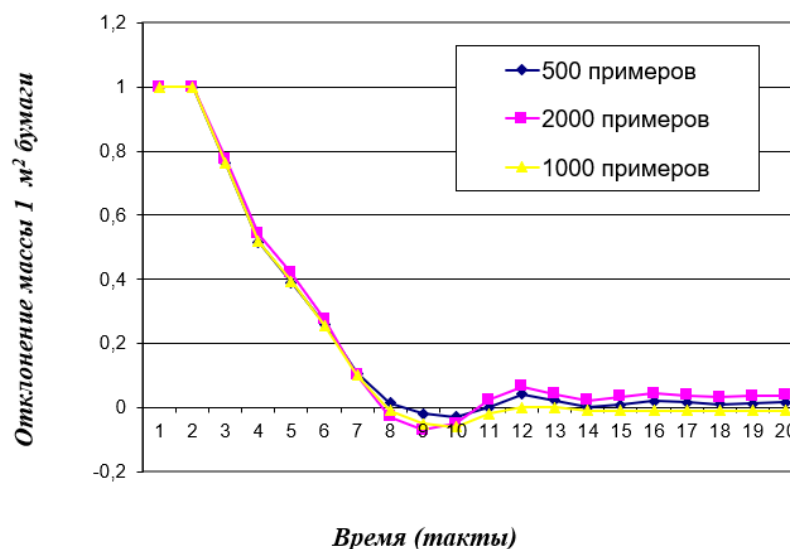


Рисунок 5.4 – Динамические характеристики системы для единичного канала управления при разных обучающих выборках (составлено автором)

Сопоставительный анализ различных методов обучения нейронных сетей, включающих алгоритм Back-Propagation (обратного распространения ошибки), Quick Propagation и Extend Delta-Bar-Delta, продемонстрировал, что наиболее качественные характеристики переходного режима обеспечивает классический алгоритм обратного распространения ошибки (графическое представление на рисунке 5.5).

Настройные величины метода обучения нейронной архитектуры составляют коэффициенты расчетного выражения для адаптации весовых параметров сети по формуле (3.9):

$$\Delta w_{ij}^{(n)}(t) = Momentum \cdot \Delta w_{ij}^{(n)}(t-1) + LearningRate \cdot \delta_j^{(n)} \cdot y_i^{(n-1)} \quad (3.9)$$

где $\Delta w_{ij}^{(n)}(t)$, $\Delta w_{ij}^{(n)}(t-1)$ - значения коэффициента связи i -го нейрона; слоя $(n-1)$ с j -ым нейроном слоя n на t и $(t-1)$ тактах обучения;

$\delta_j^{(n)}$ - ошибка обучения j-го нейрона n-го слоя;

$y_i^{(n-1)}$ - выход i-го нейрона (n-1) слоя.

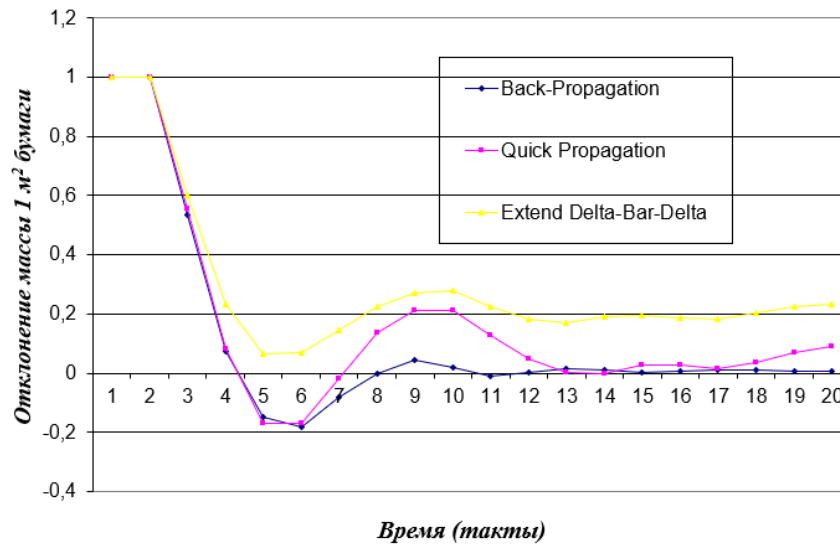


Рисунок 5.5 – Динамические характеристики системы для единичного канала управления при применении различных алгоритмов обучения (составлено автором)

В ходе экспериментального исследования процедуры настройки нейросетевых регуляторов были эмпирически установлены коэффициенты скорости обучения (рисунок 5.6).

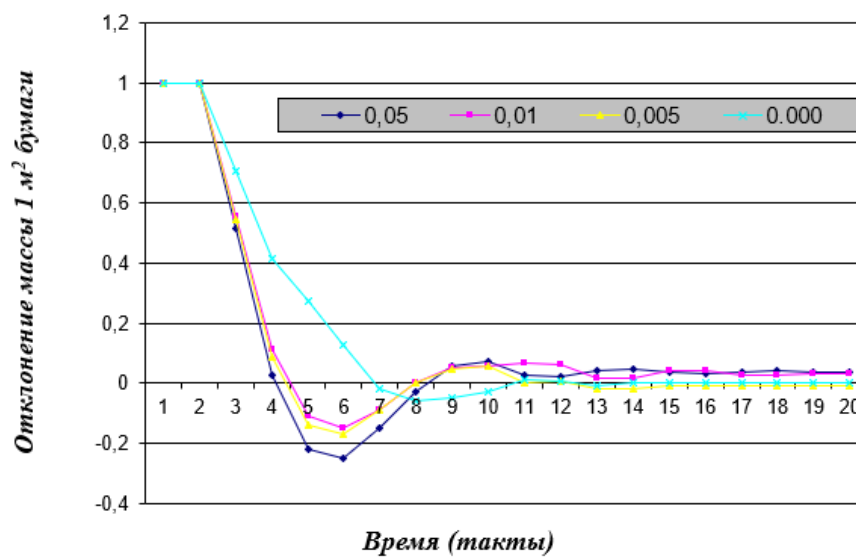


Рисунок 5.6 – Динамические характеристики системы для единичного канала управления при изменении коэффициентов скорости обучения нейронного регулятора (составлено автором)

Также в процессе обучения нейросетевых регуляторов была выбрана преобразующая функция синуса, так как данная функция показала наилучшие характеристики по параметрам усредненной ошибки.

В ходе проведенного экспериментального исследования была осуществлена разработка и реализация семи специализированных нейросетевых управляющих элементов, предназначенных для автоматического регулирования технологических параметров производственного процесса. Каждый из созданных регулирующих компонентов характеризуется специфической архитектурной конфигурацией, при которой количественные параметры нейронных элементов входного слоя находятся в прямом соответствии с общим числом исполнительных устройств, распределенных в трансверсальном направлении технологического оборудования.

Архитектурная организация выходного уровня каждого нейросетевого контроллера определяется количественными характеристиками функциональных зон, в пределах которых осуществляется модификация показателей качества целлюлозного материала. Данное соответствие обеспечивает оптимальное распределение управляющих воздействий по всей ширине производственного агрегата и гарантирует точность регулирования технологических параметров в каждой контролируемой области.

Программная реализация разработанных нейросетевых регуляторов была выполнена с использованием специализированной интегрированной среды разработки NeuralWorks Professional II/PLUS, которая представляет собой профессиональный инструментарий для создания и тестирования искусственных нейронных сетей различной сложности и назначения.

Топологическая структура каждого из созданных нейросетевых управляющих элементов представляет собой многослойную архитектуру, состоящую из трех функциональных уровней: входного слоя для приема и первичной обработки сигналов, скрытого промежуточного слоя для выполнения нелинейных преобразований входной информации, и выходного слоя для формирования управляющих команд.

Процедура обучения разработанных нейросетевых структур осуществлялась посредством применения классического алгоритма обратного распространения ошибки (Back Propagation), который обеспечивает итеративную корректировку весовых коэффициентов синаптических связей на основе минимизации функции ошибки между желаемыми и фактическими выходными значениями сети.

5.3 Построение структуры системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна

В рамках исследования была разработана системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна на основе нейросетевых регуляторов (рисунок 5.7).

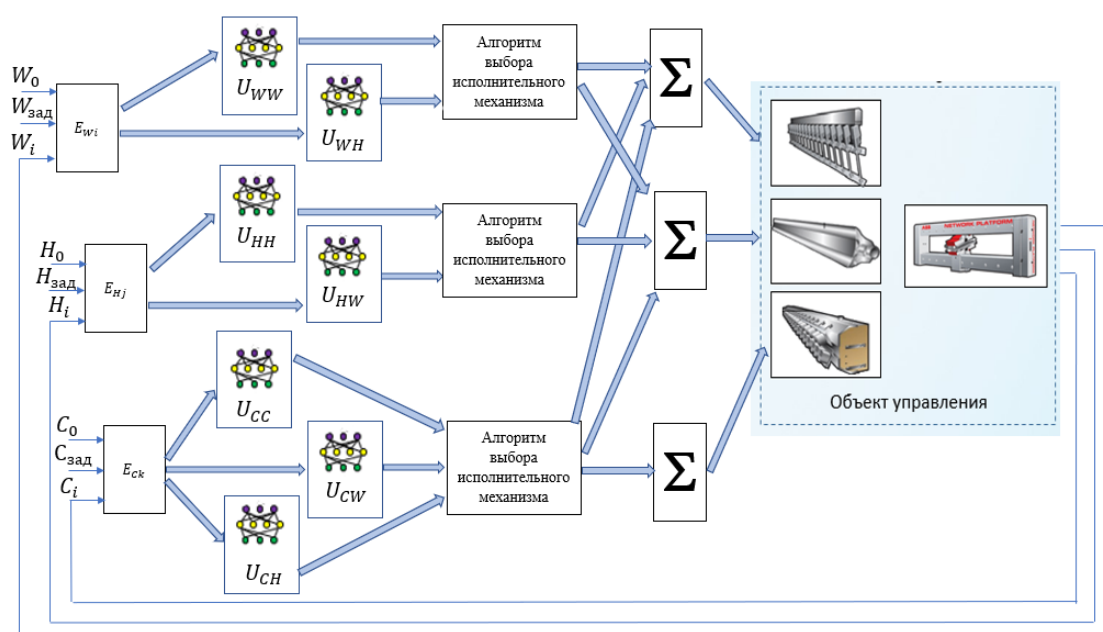


Рисунок 5.7 – Структура системы управления качественными показателями бумажного полотна (составлено автором)

Разработанная система управления показателями качества бумаги представляет собой алгоритмический комплекс, функционирующий на основе нейросетевого регулирования. Структура системы включает следующие ключевые компоненты:

1. Модуль инициализации входных параметров: система оперирует тремя векторами заданных значений: $W_{зад}$ (размерность 64), $H_{зад}$ (размерность 85) и $C_{зад}$ (размерность 114), соответствующих целевым значениям веса 1 м^2 , влажности и толщины бумажного полотна. Начальные значения параметров (W_0, H_0, C_0)

импортируются из внешних источников данных и инициализируют текущие значения параметров (W , H_j , C_k).

2. Вычисление векторов ошибок: Производится расчет отклонений текущих значений от заданных для каждого параметра: $E_{W_i} = W_{\text{зад}} - W_i$, $E_{H_j} = H_{\text{зад}} - H_j$, $E_{C_k} = C_{\text{зад}} - C_k$.

3. Нейросетевое регулирование: система включает семь нейронных регуляторов: U_{WW} , U_{WH} (веса 1 м^2), U_{HH} , U_{HW} (для влажности), U_{CC} , U_{CW} , U_{CH} (для толщины), реализующих адаптивное управление параметрами качества бумаги.

Нейронные регуляторы написаны в программной среде NeuralWorks Professional II/PLUS. Структура нейронных регуляторов представляет собой трехслойную сеть, для обучения был использован алгоритм Back Propagation. Топология и график обучения представлен на рисунке 5.8.

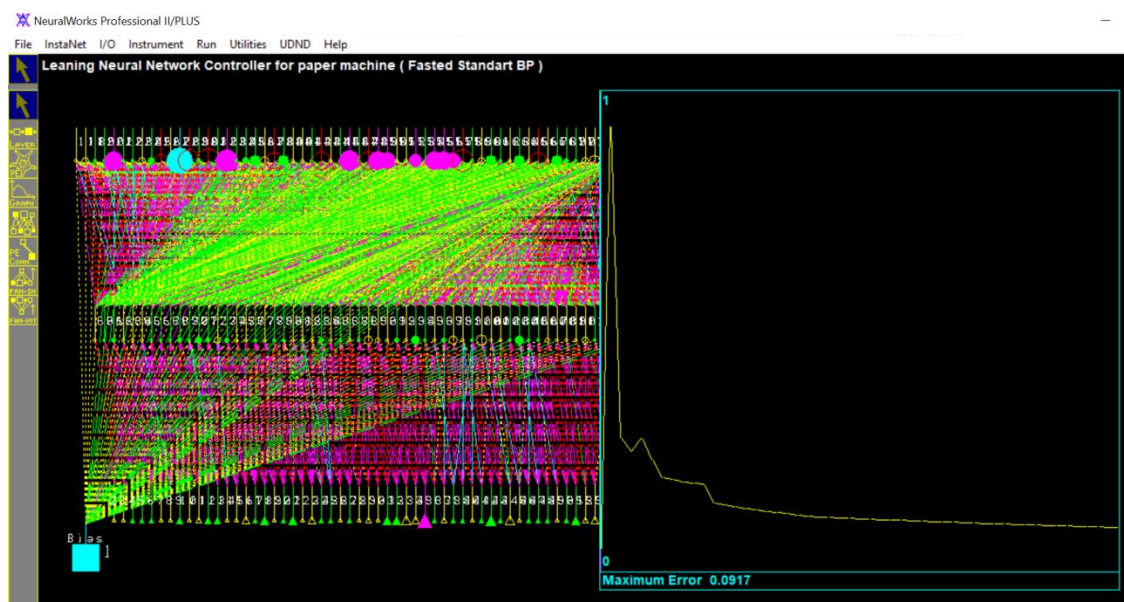


Рисунок 5.8 – Интерфейс программы Neural Works Pro II PLUS
(составлено автором)

4. Обработка выходных сигналов: осуществляется масштабирование выходов нейронных регуляторов, после чего реализуется алгоритм выбора исполнительного механизма.

5. Формирование управляющих воздействий: вычисляются управляющие воздействия U_W , U_H , U_C путем линейной комбинации выходов соответствующих нейронных регуляторов с учетом весовых коэффициентов.

6. Для функционирования системы управления технологическими параметрами по ширине бумагоделательной машины на основе нейросетевых регуляторов был разработан алгоритм (рисунок 5.9) [60].

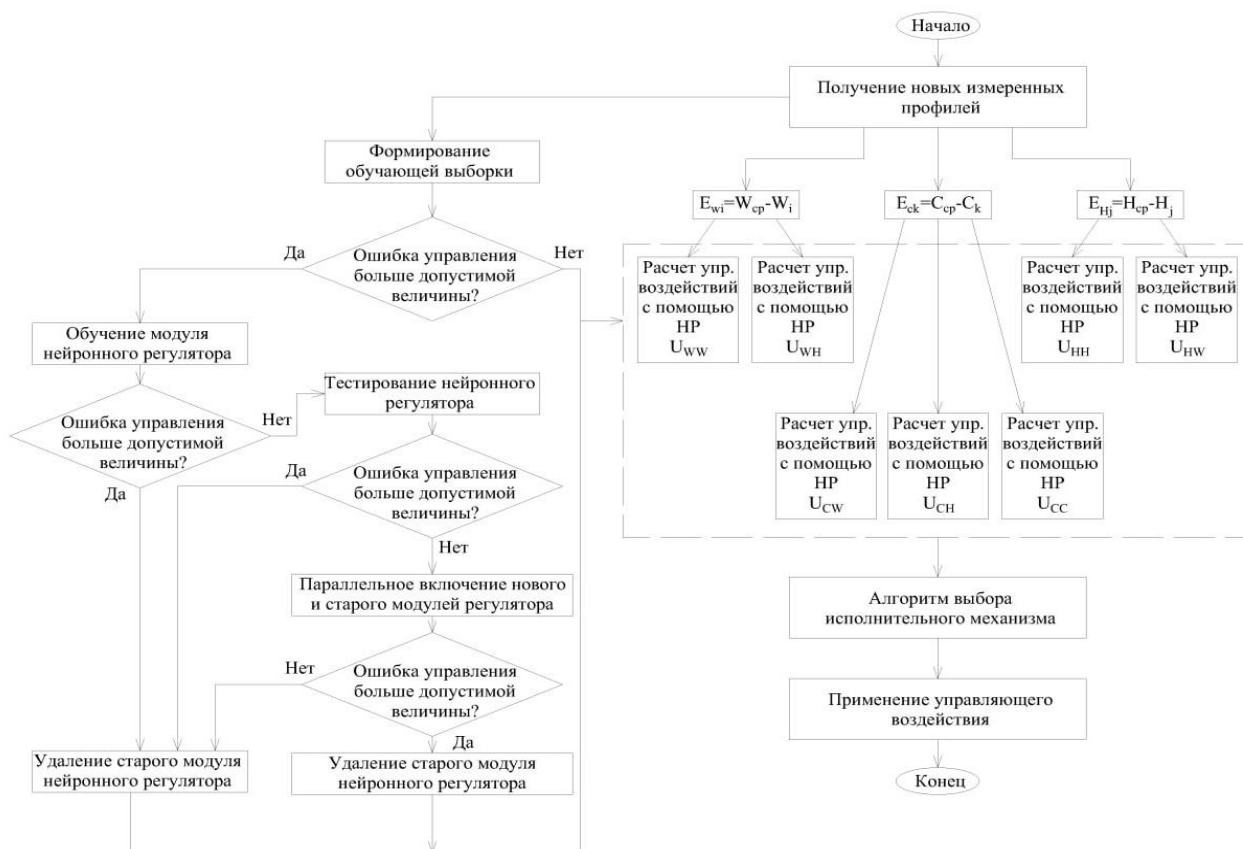


Рисунок 5.9 – Алгоритм функционирования системы управления технологическими параметрами по ширине бумагоделательной машины (составлено автором)

5.4 Реализация системы управления технологическими параметрами бумаги по ширине полотна на основе нейросетевых регуляторов

В результате исследования была реализована система управления показателями качества бумаги по ширине бумажного полотна. Данная программа была написана на языке Python с помощью фреймворка Matplotlib 3.10.3 documentation.

При запуске программы осуществляется работа предложенной структуры (рисунок 5.7). Производится построение графиков показателей качества бумаги по ширине полотна (рисунок 5.10) и сохранение результатов в базу данных для последующего анализа и оптимизации процесса управления.

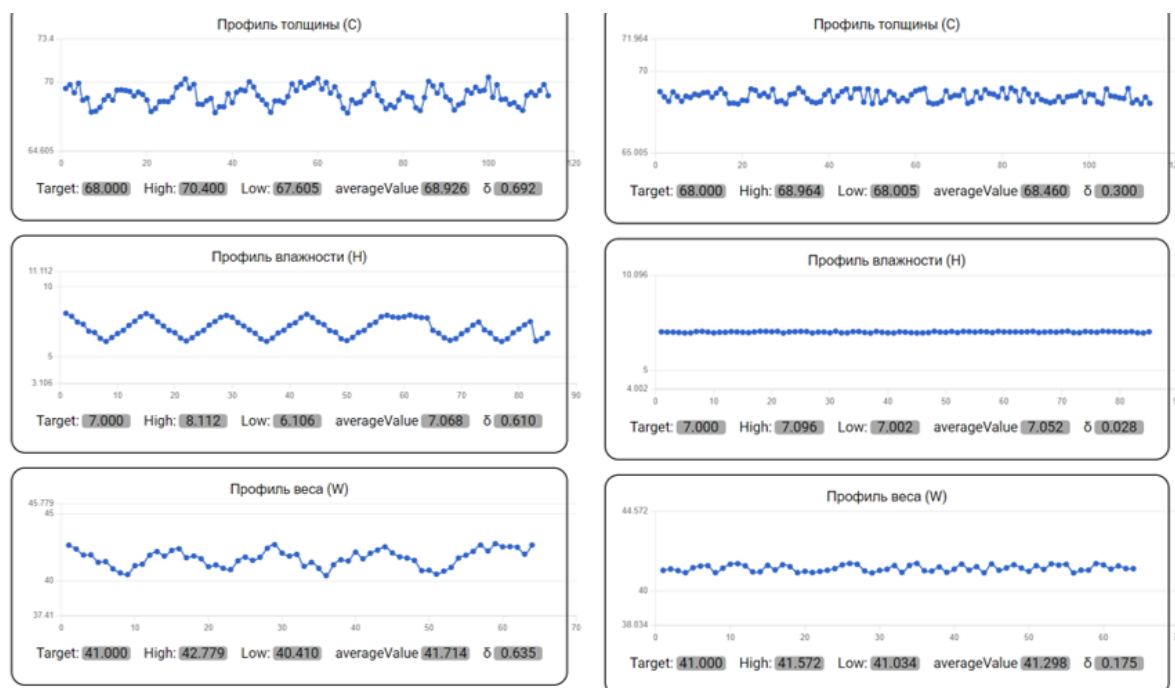


Рисунок 5.10 – Графики показателей качества бумаги по ширине полотна
(составлено автором)

Представленные графики демонстрируют сравнительный анализ качественных показателей по ширине бумажного полотна до и после применения разработанной системы управления.

На левой части графиков отображены исходные значения контролируемых параметров, характеризующие начальное состояние технологического процесса. Правая часть графиков иллюстрирует динамику изменения качественных показателей в результате функционирования системы управления. Визуальное сопоставление позволяет провести количественную и качественную оценку достигнутых улучшений по каждому из контролируемых параметров.

Анализ представленных графиков позволяет сделать следующие выводы:

1. Наблюдается значительное снижение амплитуды колебаний контролируемых параметров, что свидетельствует о повышении стабильности технологического процесса.

2. Средние значения показателей качества приближаются к целевым, что указывает на эффективность алгоритмов управления в поддержании заданных режимов работы оборудования.

3. Уменьшение средних значений параметров демонстрирует повышение однородности характеристик бумажного полотна по ширине и длине.

Таким образом, представленные графики наглядно демонстрируют положительный эффект от внедрения разработанной системы управления, выражающийся в существенном улучшении качественных показателей производимой бумажной продукции.

В целях повышения точности и информативности визуального представления данных была разработана специализированная программная платформа. Данная система обладает функционалом динамического добавления данных, что обеспечивает возможность оперативного мониторинга и анализа показателей качества бумажного полотна в режиме реального времени.

Ключевой особенностью разработанного программного обеспечения является его способность к наглядному отображению отклонений параметров во временной перспективе посредством использования анимированных объемных графиков (рисунок 5.11).

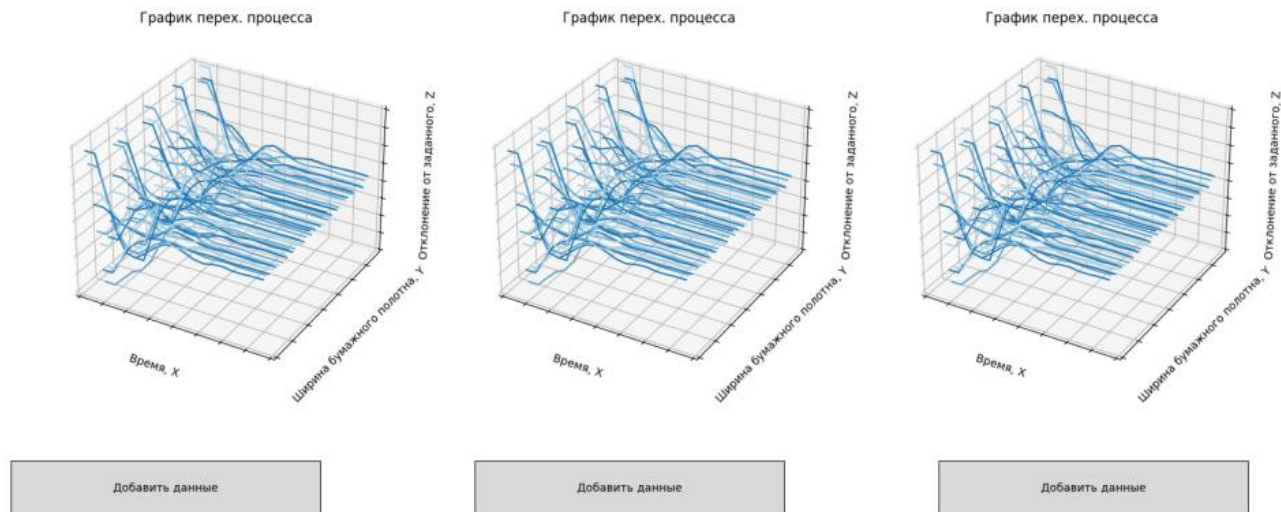


Рисунок 5.11 – Переходной процесс системы управления с нейронными регуляторами (составлено автором)

5.5 Выводы к Главе 5

В заключительной главе диссертационного исследования, посвященной разработке программного обеспечения для системы управления показателями

качества бумаги по ширине полотна на базе интеллектуальных технологий, были получены следующие результаты:

1. Разработана архитектура программного обеспечения, реализующего интеллектуальную систему управления показателями качества бумаги по ширине полотна. Предложенная архитектура обеспечивает модульность, масштабируемость и возможность интеграции с существующими системами управления бумагоделательными машинами.

2. Создан комплекс программных модулей, реализующих разработанные в предыдущих главах математические модели и алгоритмы управления.

3. Разработан интерфейс пользователя, обеспечивающий удобство взаимодействия операторов с системой управления и наглядное представление информации о текущем состоянии процесса.

4. Реализованы алгоритмы машинного обучения, позволяющие системе адаптироваться к изменяющимся условиям производства и совершенствовать свои прогностические возможности на основе накапливаемых данных о процессе.

5. Проведено тестирование разработанного программного обеспечения в лабораторных условиях с использованием реальных производственных данных, что подтвердило его работоспособность и эффективность. Результаты тестирования показали значительное улучшение точности поддержания заданных показателей качества по сравнению с традиционными системами управления.

6. Осуществлена опытно-промышленная эксплуатация разработанной системы на действующем производстве, в ходе которой была подтверждена её эффективность в реальных условиях. Внедрение системы позволило снизить вариацию показателей качества по ширине бумажного полотна на 15-20%, что привело к уменьшению количества брака и повышению экономической эффективности производства.

7. Разработаны методические рекомендации по внедрению и эксплуатации программного обеспечения, включающие процедуры настройки, калибровки и обслуживания системы. Эти рекомендации обеспечивают возможность

тиражирования разработанного решения на различных производственных объектах.

8. Проведена оценка экономической эффективности внедрения разработанной системы, которая показала значительный потенциал для снижения производственных затрат и повышения качества продукции.

9. Определены перспективные направления дальнейшего развития разработанного программного обеспечения, включающие расширение функциональности, интеграцию с системами управления другими параметрами бумагоделательной машины и применение более совершенных алгоритмов искусственного интеллекта.

Таким образом, в результате проведенных исследований и разработок создано программное обеспечение, реализующее интеллектуальную систему управления показателями качества бумаги по ширине полотна. Разработанная система обеспечивает значительное повышение качества продукции и экономической эффективности производства за счет применения современных интеллектуальных технологий и учета взаимосвязи различных параметров качества бумаги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертации были получены следующие основные результаты работы:

1. На основе анализа производственного процесса разработана концептуальная модель технологического объекта с пространственно-распределенными параметрами на примере целлюлозно-бумажной промышленности.

2. Разработаны алгоритм и соответствующее программное обеспечение для реализации системы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе нейросетевых регуляторов на примере стабилизации технологических параметров бумажного полотна. Предложенная система управления позволяет уменьшить отклонения технологических параметров процесса в пределах 5%.

3. Разработан алгоритм формирования управляющих воздействий, обеспечивающий наилучшее положение исполнительных механизмов для увеличения их запаса по регулированию.

4. Произведена оценка функционирования системы управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна на основе нейросетевых регуляторов.

Полученная система управления на основе нейросетевых регуляторов обладает универсальностью и может быть адаптирована для различных типов бумагоделательных машин. Процесс настройки регуляторов при этом сводится к переобучению нейронных сетей на данных конкретного оборудования.

Разработано специализированное программное обеспечение для трехмерной визуализации технологических параметров бумажного полотна с функцией динамического обновления данных. Данный инструмент применим как в научно-исследовательских целях, так и для решения промышленных задач, требующих детального графического анализа временных изменений параметров.

В результате проведенного исследования разработанная система управления технологическим процессом производства бумаги обладает широким спектром

практического применения. Созданная система может быть успешно внедрена в промышленное производство для повышения эффективности технологических процессов и улучшения качественных характеристик выпускаемой продукции. Одновременно система представляет значительную ценность в качестве тренажерного комплекса для профессиональной подготовки операторов бумагоделательного оборудования и образовательного инструмента для обучения студентов профильных специальностей.

Особую значимость представляет тот факт, что данное исследование создает научно-технические предпосылки для разработки отечественных систем управления бумагоделательными машинами, что способствует технологической независимости и импортозамещению в целлюлозно-бумажной промышленности. Полученные результаты открывают перспективы для дальнейшего развития интеллектуальных систем управления технологическими процессами и формируют основу для создания конкурентоспособных отечественных решений в области автоматизации бумажного производства.

Таким образом, выполненная работа вносит существенный вклад в развитие теории и практики автоматизированного управления технологическими процессами и обладает высоким потенциалом коммерциализации и практического внедрения в промышленности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, А. В. Реология и гидродинамика процессов отлива и формирования бумаги : учеб. пособие / А. В. Александров, Т. Н. Александрова. – СПб.: СПбГТУРП, 2015. – 133 с.
2. Бахтин, А. В. Исследование качества систем управления цветом бумаги / А. В. Бахтин, **М. О. Слюта** // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). – 2022. – № 63(89). – С. 100-103. – DOI 10.36807/1998-9849-2022-63-89-100-103.
3. Бахтин, А. В. Исследование современных проблем управления качеством бумаги по ширине полотна / А. В. Бахтин, **М. О. Слюта** // Системный синтез и прикладная синергетика : Сборник научных трудов XII Всероссийской научной конференции, п. Нижний Архыз, 23–29 сентября 2024 года. – Ростов-на-Дону: Южный федеральный университет, 2024. – С. 208-213. – DOI 10.18522/syssyn-2024-36.
4. Бахтин, А. В. Нейронная система управления поперечным профилем полотна на бумагоделательной машине с использованием специальных фильтров / Бахтин, А. В. // Сб. трудов II Международной научно-практической конференции «Информационные технологии в моделировании и управлении». – Санкт-Петербург, СПбГТУ, 2000. – С. 60–62.
5. Бахтин, А. В. Разработка и анализ математической модели для автоматической системы управления цветовыми характеристиками печатной бумаги / А. В. Бахтин, **М. О. Слюта** // Автоматизация. Современные технологии. – 2023. – Т. 77, № 1. – С. 35-38. – DOI 10.36652/0869-4931-2023-77-1-35-38.
6. Бахтин, А. В. Совершенствование системы управления качеством бумаги по ширине полотна на базе интеллектуальных технологий / А. В. Бахтин, **М. О. Слюта** // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2023. – Т. 1. – С. 61-64. – EDN SFWNOX.
7. Бахтин, А.В. Развитие системы управления показателями качества бумажного полотна на базе нейросетевых технологий: дис. канд. техн. наук: 05.13.07 / Бахтин Андрей Владимирович; СПбГТУРП – СПб., 2000. – 154 с.

[Электронный ресурс] – URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01000310576> (дата обращения: 14.06.2025). – Режим доступа: текст электронный.

8. Бельский, А. П. Расчет и проектирование сушильной части бумагоделательных машин : учеб. пособие / А. П. Бельский. – СПб., 2000. – 126 с.

9. Буйлов, Г. П. Автоматика и автоматизация производственных процессов целлюлозно-бумажных производств : учеб. пособие для вузов / Г. П. Буйлов, В. А. Доронин, Н. П. Серебряков. – М. : Экология, 1995. – 320 с.

10. Вайз, Б. Управление профилем толщины на софт-каландрах / Б. Вайз, Д. Кинг, К. Хилден // *Pulp and Paper Canada*. – 1994. – Т. 95, № 5.

11. Вьюков, И. Е. Автоматизация технологических процессов целлюлозно-бумажной промышленности : учеб. пособие для вузов / И. Е. Вьюков. – М. : Лесная пром-сть, 1983. – 384 с.

12. Дахин, М. М. Исследование колебаний веса бумаги в системе с рециркуляцией массы / Дахин, М. М. // *Труды ВНИИБ*. – 1973. – Вып. 62. – С. 38–44.

13. Дахин, М. М., Анализ качества и чувствительности систем управления весом и влажностью бумаги / Дахин, М. М., Жукова, Ю. С. // *Труды ВНИИБ*. – 1973. – Вып. 62. – С. 29–38.

14. Дахин, М. М., Системы взаимосвязанного регулирования веса 1 м² и влажности бумажного полотна / Дахин, М. М., Филатченкова, Т. Д. // *Труды ВНИИБ*. – 1969. – Вып. 54. – С. 113–126.

15. Дунаев, Д. В. Системный подход к обеспечению требуемых печатных свойств бумаги на основе информации о качестве печати : дис. ... канд. техн. наук / Дунаев Дмитрий Владимирович. – СПб., 2006. – 148 с.

16. Жукова, Ю. С. Анализ колебаний веса и влажности бумажного полотна на быстроходных бумагоделательных машинах / Ю. С. Жукова // *Материалы второй научно-технической конференции по автоматизации ЦБП*. – Л., 1970. – С. 87–92.

17. Жукова, Ю. С. Модель влияния процесса напуска массы на качество бумаги по ширине / Ю. С. Жукова, М. Ф. Гончарова, Н. А. Коновалов // Химия и технология бумаги : межвуз. сб. науч. тр. – Л. : ЛТА, 1988. – С. 64–67.
18. Жукова, Ю. С. Управление процессами подготовки и напуска массы на бумагоделательных машинах : учеб. пособие / Ю. С. Жукова. – Л. : ЛТА им. Кирова, 1983. – 47 с.
19. Зорин, И. Ф. Управление процессами целлюлозно-бумажного производства / И. Ф. Зорин, В. П. Петров, С. А. Роговская. – М. : Лесная пром-сть, 1981. – 272 с.
20. Иванов, С. Н. Технология бумаги / С. Н. Иванов. – М. : Школа бумаги, 2006. – 696 с.
21. Кондрашкова, Г. А. Автоматизация технологических процессов производства бумаги / Г. А. Кондрашкова, В. Н. Леонтьев, О. М. Шапоров. – М. : Лесная пром-сть, 1989. – 328 с.
22. Кугушев, И. Д. Теория процессов отлива и обезвоживания бумажной массы / И. Д. Кугушев. – М., 1967. – 262 с.
23. Куров, В. С. Теория и конструкции машин и оборудования отрасли. Бумаго-картоноделательные машины : учеб. пособие / В. С. Куров, Н. Н. Кокушин. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 588 с.
24. Левинцева, В. С. Исследование системы управления качеством бумажного полотна на АО «Кондопожский ЦБК» / В. С. Левинцева, О. А. Иванова, **М. О. Слюта** // Современная целлюлозно - бумажная промышленность. Актуальные задачи и перспективные решения : Материалы IV Международной научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ЦБП, Санкт-Петербург, 14–15 ноября 2022 года / Отв. редактор О.В. Фёдорова. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 81-87
25. Пиргач, Н. С. Бумагоделательная машина как объект управления массой 1 м² и влажностью бумажного полотна / Н. С. Пиргач, П. А. Казанюк //

Целлюлоза, бумага, картон : научно-технический реферативный сборник. – 1979. – № 13.

26. Примаков, С. Ф. Производство бумаги / С. Ф. Примаков. – М. : Лесная промышленность, 1987. – 224 с.

27. Производство целлюлозы, древесной массы, бумаги, картона: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. – М. : Бюро НДТ, 2015. – Вып. 1. – С. 150–152.

28. Рекус, Г. Г. Общая электротехника и основы промышленной электроники : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Рекус. – М. : Высш. шк., 2008. – 654 с. Рынок целлюлозы и бумаги в России и странах СНГ [Электронный ресурс] – URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=4020> (дата обращения: 17.06.2025). – Режим доступа: текст электронный.

29. Самарский, А. А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – 2-е изд., испр. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с.

30. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667397 Российская Федерация. Визуализация многомерных технологических процессов с динамическим добавлением данных. Заявка № 2024666065: заявл. 09.07.2024: опубл. 24.07.2024; автор(ы)/правообладатель(и) **Слюта Марина Олеговна; Бахтин Андрей Владимирович.** – 5 КБ.

31. Семёнов, А. Д. Идентификация объектов управления / А. Д. Семёнов, Д. В. Артамонов, А. В. Брюхачев. – Пенза : ПГУ, 2005. – 211 с.

32. Сергиенко, А. Б. Цифровая обработка сигналов : учеб. пособие / А. Б. Сергиенко. – 3-е изд. – СПб. : БХВ-Петербург, 2011. – 768 с.

33. Сиваков, В. П. Проблемы механики целлюлозно-бумажных материалов / В. П. Сиваков, С. Н. Вихарев, А. В. Вураско, А. Д. Мешков // Исследование технологических характеристик полотна бумаги и вибрации оборудования для обеспечения качества продукции : материалы II Международной научно-технической конференции. – Архангельск : САФУ, 2013. – С. 81–86.

34. Слюта, М.О. Управление технологическими процессами производства бумаги по ширине полотна с использованием интеллектуальных технологий / **М.О. Слюта** // Инженерный вестник Дона. – 2025. - №9. – 9 с.
35. Смагина, Е. М. Синтез систем управления с заданными передаточными функциями / Е. М. Смагина // Автоматика и телемеханика. – 1977. – № 4. – С. 13–16.
36. Справочник по автоматизации целлюлозно-бумажных предприятий / Э. В. Цешковский, Н. С. Пиргач, Г. Д. Ерашкин [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Лесн. пром-сть, 1989. – 368 с.
37. Тарасик, В. П. Математическое моделирование технических систем : учеб. для вузов / В. П. Тарасик. – Мн. : ДизайнПРО, 2004. – 640 с.
38. Теория автоматического управления : учеб. для вузов / под ред. В. Б. Яковлева. – 3-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2009. – 567 с.
39. Техническое описание AccuRay 1180 MicroPlus : MicroSet Linear Stepper Slice Actuators. – USA : AccuRay Inc., 1988. – 4 с.
40. Технологический регламент производства газетной бумаги на бумагоделательной машине № 8. – Кондопога : ОАО Кондопога, 2006.
41. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. Ч. 3. Производство полуфабрикатов. – СПб. : Политехника, 2004. – 315 с.
42. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. 2. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства бумаги и картона. – СПб. : Политехника, 2005. – 423 с.
43. Тихонов, Ю. А. Основы теории диспергирования бумажной массы при сортировании и напуске на бумагоделательную машину : дис. ... д-ра техн. наук / Юрий Александрович Тихонов. – СПб., 2012. – 338 с.
44. Фельдбаум, А. А. Основы теории оптимальных автоматических систем / А. А. Фельдбаум. – М. : Физматгиз, 1963. – 552 с. Филиппс, Ч., Харбор, Р. Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.

45. Фляте, Д. М. Свойства бумаги : учеб. пособие / Д. М. Фляте. – Краснодар : Лань, 2012. – 384 с.
46. Французова, Г. А. Экстремальные и оптимальные системы автоматического управления : учеб. пособие / Г. А. Французова. – Новосибирск : НГТУ, 2001. – 64 с.
47. Хайкин, С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин ; пер. с англ. – 2-е изд. – М. : Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1104 с.
48. Харазов, В. Г. Интегрированные системы управления технологическими процессами / В. Г. Харазов. – СПб. : Профессия, 2009. – 592 с.
49. Черемных, Д. Н. Разработка системы диспетчерского управления технологическим процессом учебно-экспериментальной установки целлюлозно-бумажного производства / Д. Н. Черемных, Е. В. Ташлыкова // Молодой ученый. – 2014. – № 1. – С. 142–147.
50. Шапоров, О. М. Средства управления поперечными профилями / О. М. Шапоров. – 1988. – 25 с.
51. Швецов, Ю. Н. Расчет основных параметров бумаго- и картоноделательных машин / Ю. Н. Швецов, Э. А. Смирнова. – СПб. : ГОУВПО СПбГТУРП, 2009. – 64 с.
52. Шитов, Ф. А. Технология бумаги и картона : учебник для средних проф.-техн. училищ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1978.
53. Энциклопедия АСУТП. – URL: <http://www.bookasutp.ru> (дата обращения: 10.06.2025). – Текст : электронный.
54. Янушевский, Р. Т. Управление объектами с запаздыванием / Р. Т. Янушевский. – М. : Наука, 1978. – 416 с.
55. Ariyur, K. V. Analysis and design of multivariable extremum seeking / K. V. Ariyur, M. Krstic // Proceedings of the 2002 American Control Conference. – Anchorage, Alaska, USA, 2002. – P. 2903–2908.
56. Asim, V. Design of PLC-based Smith Predictor for Controlling Processes with Long Dead Time / V. Asim // Proceedings of International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – Hong Kong : IMECS, 2010.

57. Astrom, K. Advanced PID Control / K. Astrom. – London : Springer, 1999. – 446 p.
58. Astrom, K. Computer-Controlled Systems. Theory and Design / K. Astrom. – New York : Prentice Hall, 1997. – 569 p.
59. Astrom, K. J. Theory and application of adaptive control: a survey / K. J. Astrom // Automatica. – 1983. – P. 471–486.
60. Bakhtin, Andrey V. Improvement of Paper Quality Management System by Web Width on the Basis of Intellectual Technologies / A.V. Bakhtin, **M. O. Slyuta** // 2023 V International Conference on Control in Technical Systems (CTS), Saint Petersburg, 21-23 September 2023. - Publisher: IEEE, 2023. – pp. 46-50. – DOI: 10.1109/CTS59431.2023.10289075.
61. Beecher, A. E. Theory and practice of automatic control of basis weight profiles / A. E. Beecher, R. A. Bareiss // Tappi Journal. – 1970. – Vol. 53, No. 5. – P. 47–54.
62. Chen, F. C. Adaptive control of nonlinear systems using neural networks / F. C. Chen, H. K. Khalil // International Journal of Control. – 1992. – Vol. 55, No. 6. – P. 1299–1317.
63. Cross direction control / Devron-Hercules Inc. – 1987. – 32 p.
64. Dumont, G. A. Estimation of Moisture Variations on Paper Machines / G. A. Dumont, I. M. Jonsson, M. S. Davies, F. T. Ordubai, Y. Fu, K. Natarajan, E. M. Lindeborg // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1993. – Vol. 1, No. 2. – P. 101–113.
65. Duncan, S. R. Mini-max control of cross-directional variations on a paper machine / S. R. Duncan, K. W. Corsadden // IEE Proceedings Control Theory and Applications. – 1998. – Vol. 145, No. 2. – P. 189–195.
66. Gorinevsky, D. Performance Analysis of Cross-Direction Process Control Using Multivariable and Spectral Models / D. Gorinevsky, R. Vyse, M. Heaven // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 2000. – Vol. 8, No. 4. – P. 589–600.

67. Hai, Y. Extremum-seeking control strategy for ABS system with time delay / Y. Hai, U. Ozguner // Proceedings of the American Control Conference. – Anchorage, USA, 2002. – P. 3753–3758.
68. Heath, W. P. Orthogonal Functions for Cross-Directional Control of Web Forming Processes / W. P. Heath // Automatica. – 1996. – Vol. 32, No. 2. – P. 183–198.
69. Hinton, G. E. Machine learning: Paradigms and Methods / G. E. Hinton // Artificial Intelligence. – No. 40. – P. 185–234.
70. Kasparian, V. Model reference based neural network adaptive controller / V. Kasparian, C. Batur // ISA Transactions. – 1998. – No. 37. – P. 21–39.
71. Kastanakis, G. Interaction between the MD and CD control processes in paper making and plastics machines / G. Kastanakis, A. Lizr // Tappi Journal. – 1992. – Vol. 75, No. 2. – P. 245–253.
72. Kjaer, A. P. Headbox modelling for cross-direction basis weight control / A. P. Kjaer, M. J. Waller, P. E. Wellstead // ISA Transactions. – 1994. – No. 33. – P. 245–254.
73. Krstic, M. Towards faster adaptation in extremum seeking control / M. Krstic // Proceedings of 38th Conference on Decision and Control. – Arizona, USA, 1999. – P. 4766–4771.
74. Leo, N. Papermaking chemistry / N. Leo. – Helsinki, Finland, 1999. – 320 p.
75. Levintseva, V.S. Research of the Paper Web Quality Management System / V.S. Levintseva, O.A. Ivanova, **M.O. Slyuta** // THEORY AND PRACTICE OF MODERN SCIENCE: THE VIEW OF YOUTH: Материалы II международной научно-практической конференции на английском языке, Санкт-Петербург, 24 ноября 2022 года. – Санкт-Петербург: Высшая школа технологии и энергетики федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – Ч. II. – С. 107-112.

76. Liu, C. C. Adaptive control of nonlinear continuous-time system using neural networks – general relative degree and MIMO cases / C. C. Liu, F. C. Chen // International Journal of Control. – 1993. – Vol. 58, No. 2. – P. 317–335.
77. Neural Computing / Neural Ware Inc. – USA, 1996. – 326 p.
78. Nurdoch, P. P. Zero assignment by state vector feedback / P. P. Nurdoch // Automatica. – 1975. – Vol. 11, No. 2. – P. 199–201.
79. Ohenoja, M. Multiple Property Cross Direction Control of Paper Machines / M. Ohenoja, K. Leiviska // Modeling, Identification and Control. – 2011. – Vol. 32, No. 3. – P. 103–112.
80. Peterka, V. On steady state minimum variance control strategy / V. Peterka // Kybernetika. – 1972. – Vol. 8, No. 3. – P. 219–232.
81. Rosenblatt, F. Analytic techniques for the study of neural nets / F. Rosenblatt // IEEE Transactions on Applications and Industry. – 1964. – Vol. 83, No. 74. – P. 24–36.
82. Rumelhart, D. E. Learning Internal Representations by Error Propagation / D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, R. J. Williams // Parallel Distributed Processing. – Cambridge, MA : MIT Press, 1986. – Vol. 1. – P. 318–362.
83. Shpilevaya, O. Y. On Adaptive Stabilization Problem of Systems with Parametric Uncertainty / O. Y. Shpilevaya // Automation, Control, and Information Technology : Proceedings of the IASTED International Conference. – 2002. – P. 230–234.
84. Silva, G. J. PID Controllers for Time-Delay Systems / G. J. Silva, A. Datta, S. P. Bhattacharyya. – 1973. – 332 p.
85. Smagina, Ye. M. A method of designing of observable output ensuring given zeros location / Ye. M. Smagina // Problems of Control and Information Theory. – 1991. – Vol. 20, No. 5. – P. 299–307.
86. Smart Weight Profiler. Linear stepper actuator service manual. – 1998. – 382 p.
87. Smith, M. K. Formation potential of west coast kraft pulps / M. K. Smith // Pulp and Paper. – 1986. – Vol. 87, No. 10. – P. 69–76.

88. Torsten, N. Two dimensional data-analysis for paper machines / N. Torsten, P. E. Wellstead. – URL: http://www.csc.umist.ac.uk/twod/pubs/art3/605_000.htm (дата обращения: 19.06.2025). – Текст : электронный.
89. V. I. B. Installation and maintenance manual. – 1998. – 330 p.
90. Valmet Automation Inc. DamaticXD, Paper quality: Paper machine controls / Valmet Automation Inc. – Tampere, Finland, 1995. – Vol. 2. – 460 p.
91. Visioli, A. Control of Integral Processes with Dead Time / A. Visioli, Q.-Ch. Zhong. – New York : Springer. – 277 p.
92. Visioli, A. Practical PID Control / A. Visioli. – London : Springer, 2006. – 322 p.
93. Vyse, R. Consistency Profiling – A New Technique for CD Basis Weight Control / R. Vyse, J. King, M. Heaven, S. Pantaleo // Pulp & Paper Canada. – 1996. – Vol. 97, No. 9. – P. 62–66.
94. Walsh, G. C. On the application of multi-parameter extremum seeking control / G. C. Walsh // Proceedings of American Control Conference. – Chicago, IL, USA, 2000. – P. 411–415.
95. Wang, X. Estimation in paper machine control / X. Wang, G. A. Dumont, M. S. Davies // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1993. – P. 34–43.
96. Wellstead, P. E. Modelling paper machine cross-direction profiles / P. E. Wellstead, M. H. Waller. – URL: http://www.csc.umist.ac.uk/twod/pubs/art5/625_000.htm (дата обращения: 24.06.2025). – Текст : электронный.
97. Wellstead, P. E. Two Dimensional control systems: Applications to the CD and MD problem / P. E. Wellstead, W. P. Heath // Pulp and Paper Canada. – 1994. – Vol. 95, No. 4.
98. Werbos, P. J. Backpropagation Through Time: What It Does and How to Do It / P. J. Werbos // Artificial Neural Networks: Concepts and Theory / IEEE Computer Society Press. – 1992. – P. 309–319.

99. Widrow, B. 30 years of adaptive neural networks: perceptron, madaline, and backpropagation / B. Widrow, M. A. Lehr // Proceedings of the IEEE. – 1990. – Vol. 78, No. 9. – P. 1415–1442.
100. Widrow, B. Generalization and information storage in networks of adaline 'neurons' / B. Widrow // Self-Organizing Systems. – Washington, D. C. : Sparta, 1962. – P. 435–461.
101. Yabuta, T. Neural network controller characteristic with regard to adaptive control / T. Yabuta, T. Yamacla // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1992. – Vol. 22, No. 1. – P. 170–177.
102. Yuan, M. Direct neural control system: Nonlinear extension of adaptive control / M. Yuan, A. N. Poo, G. S. Hong // IEE Proceedings-Control Theory and Applications. – 1995. – Vol. 142, No. 6. – P. 661–667.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2024667397

**Визуализация многомерных технологических процессов
с динамическим добавлением данных**

Правообладатели: *Слюта Марина Олеговна (RU), Бахтин
Андрей Владимирович (RU)*

Авторы: *Слюта Марина Олеговна (RU), Бахтин Андрей
Владимирович (RU)*

Заявка № **2024666065**
Дата поступления **09 июля 2024 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **24 июля 2024 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Акт внедрения**

Утверждаю



и.о. Управляющий директор

АО «Кондопожский ЦБК»

А.Н.Лобов

Дата «20» 06 2025 г.**АКТ****о внедрении результатов кандидатской диссертации****Слюта Марины Олеговны**

«Управление технологическим объектом с пространственно-
распределенными параметрами на основе нейросетевых регуляторов на
примере целлюлозно-бумажной промышленности»
по научной специальности

2.3.3. «Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами»

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертации на тему «Управление технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе нейросетевых регуляторов на примере целлюлозно-бумажной промышленности», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в производственную деятельность в АО «Кондопожский ЦБК» в виде алгоритма, реализующего систему управления показателями качества бумаги по ширине полотна.

Разработанная в результате диссертационного исследования нейросетевая структура интегрирована в систему управления поперечным профилем бумажного полотна.

Внедрение данной системы управления на основе нейросетевых регуляторов позволило сократить количество отклонений технологических параметров, что привело к снижению объема бракованной продукции. Кроме того, оптимизация процесса управления обеспечила экономию сырья, что выразилось в снижении себестоимости продукции при одновременном повышении стабильности качественных характеристик бумажного полотна.

Автоматизация процесса принятия решений на основе данного интеллектуального алгоритма также способствовала сокращению времени реагирования на изменения технологических параметров, что существенно повысило оперативность управления производственным процессом.

Председатель комиссии

Заместитель главного технолога

по подготовке производства

О.Г.Бердник

Члены комиссии:

Начальник бум.цеха №3

П.Н.Шахаев

Инженер технолог бум.цеха №3

М.Л.Романов

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Листинг программы**

Листинг программы системы управления показателями качества
по ширине бумажного полотна с использованием нейронных регуляторов
(на языке Python)

```
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import cm
import numpy as np
import os
from random import randint
from matplotlib.widgets import Button
from matplotlib.patches import Rectangle
from matplotlib.animation import ArtistAnimation, FuncAnimation

fig = plt.figure(figsize=plt.figaspect(0.5))

def convert_rgb_to_hex(r, g, b):
    return "#{:02x}{:02x}{:02x}".format(r, g, b)

ax_data_counters = [0] * 3

min_color = 0

axes_list = [
    {
        'ax': None,
        'data': {
            'counter': 0
        },
        'color': {
            'adder': -3,
            'counter': [255, min_color, min_color]
        }
    },
    {
        'ax': None,
        'data': {
            'counter': 0
        },
        'color': {
```

```

        'adder': -2,
        'counter': [min_color, 255, min_color]
    }
},
{
    'ax': None,
    'data': {
        'counter': 0
    },
    'color': {
        'adder': -1,
        'counter': [min_color, min_color, 255]
    }
},
]
ax_color_adders = [-3, -2, -1]

```

```

def add_data_to_ax(file_name, ax, ax_ind):
    try:
        f = open(file_name, 'r')
    except FileNotFoundError:
        print(file_name)
        print('Такого файла нет(())')
        return

```

```

global axes_list

```

```

z = []
counter_cols = 0
counter_rows = 0
min_data = 0
max_data = 0
for line_ind, line in enumerate(f):
    arr = line.split()
    counter_cols = len(arr)
    counter_rows = counter_rows + 1

```

```

for con_ind, cols in enumerate(arr):
    cols = float(cols)
    if cols >= max_data:
        max_data = cols
    if cols <= min_data:
        min_data = cols

```

```

    if len(z) <= con_ind:
        z.append([])
    if len(z[con_ind]) <= line_ind:
        z[con_ind].append([])
    z[con_ind][line_ind] = cols

f.close()

ax.set(xlim3d=(0, counter_rows), xlabel='Время, X')
ax.set(ylim3d=(0, counter_cols+10), ylabel='Ширина бумажного полотна, Y')
ax.set(zlim3d=(min_data, max_data), zlabel='Отклонение от заданного, Z')
ax.set_title('График перех. процесса')
counter = 0
ax_dict = axes_list[ax_ind]
ax_color = ax_dict['color']

frames = [[] for _ in range(counter_cols)]
current_index = 1
index_col = 0

len_z = len(z)
index_row = 0
x = np.linspace(1, counter_rows, counter_rows)
# if (ax_color['counter'][ax_ind] <= ax_color['adder'] * -1 or
ax_color['counter'][ax_ind] >= 255 + ax_color['adder'] * -1):
    # ax_color['adder'] *= -1
    # ax_color['counter'][ax_ind] += ax_color['adder']
for index, i in enumerate(z):
    y = np.linspace(index*1.2, index*1.2, counter_rows)

    value_array = []

    for index_value, value in enumerate(i):
        frames[index_row].append([x[index_value], y[index_value-1], value])
    index_row = index_row + 1
frames = np.array(frames)
def update_lines(num, frames, lines):
    # if num == counter_rows-1:
    #     animation.pause()
    # else:
    #     animation.resume()
    # COLORS
    # index_current_line = 0

```

```

for line, frame in zip(lines, frames):
    # current_color = ax_color['counter']
    # current_color[ax_ind] = 255 - counter_rows - index_current_line*2

    # NOTE: there is no .set_data() for 3 dim data...
    line.set_data(frame[:num, :2].T)
    line.set_3d_properties(frame[:num, 2])

    # index_current_line = index_current_line + 1
return lines

# animation = ArtistAnimation(
#     fig,
#     frames,
#     interval=100,
#     blit=True,
#     repeat=True
# )
lines = [ax.plot([], [], [])[0] for _ in frames]
animation = FuncAnimation(fig, update_lines, counter_rows, fargs=(frames, lines),
interval=100, repeat=False, blit=True)

ax.animation = animation

ax_dict['data']['counter'] += counter

def figure_render(file_name, ind):
    plt.style.use('_mpl-gallery')
    ax = fig.add_subplot(1, 3, ind, projection='3d')

    rng = np.random.default_rng()

    add_data_to_ax(file_name, ax, ind - 1)

    ax.set(xticklabels=[],
           yticklabels=[],
           zticklabels=[])

    return ax

for _ in range(3):
    axes_list[_]['ax'] = figure_render('data1.txt', _ + 1)

```

```
click_counter = [1] * 3
def btn_click(ind):
    def _btn_click(e):
        filename = f'data{ind + 1}_{click_counter[ind]}.txt'
        add_data_to_ax(filename, axes_list[ind]['ax'], ind)
        click_counter[ind] += 1
    return _btn_click

buttons = []
for ind in range(3):
    invisible_ax = fig.add_axes([0.1 + 0.3 * ind, 0.1, 0.2, 0.07])
    buttons.append(Button(invisible_ax, 'Добавить данные'))
    buttons[ind].on_clicked(btn_click(ind))

plt.show()
```