

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***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2025

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Бахтин Андрей Владимирович

Официальные оппоненты:

Уткин Лев Владимирович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Высшая школа технологий искусственного интеллекта Института компьютерных наук и кибербезопасности, профессор;

Петрова Айгуль Камиловна

кандидат технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)», кафедра инноватики и технологического предпринимательства, старший преподаватель.

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **23 декабря 2025 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2025 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 высококосортной 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 в работе поставлены и решены 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 работы:

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.

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, 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 (Перечень ВАК). Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования.

В первой главе представлены основные этапы производства бумажного полотна, описаны технологические параметры, характеризующие качество бумаги, а также приведено обоснование необходимости управления основными технологическими параметрами бумаги по ширине полотна.

Во второй главе проводится анализ современных систем управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна.

Третья глава посвящена обработке экспериментальных данных и разработке математических моделей системы управления процессом производства бумаги по ширине полотна.

Четвертая глава посвящена анализу работы исполнительных механизмов на технологическом объекте с пространственно-распределенными параметрами и разработке алгоритмов формирования управляющих воздействий.

В пятой главе представлен способ и алгоритмы управления технологическим объектом с пространственно-распределенными параметрами на основе системы нейросетевых регуляторов на примере бумагоделательной машины. Представлено специальное программное обеспечение для реализации данной системы управления, также приведены результаты компьютерного моделирования.

В заключении отражены обобщенные выводы по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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 %.

В рамках исследования систем управления процессом производства бумаги по ширине полотна был проведен анализ существующих систем управления различных производителей, установленных на действующих бумагоделательных машинах. В результате данного анализа был выявлен ряд существенных недостатков, характерных для современных систем управления:

1. Многие существующие системы имеют недостаточную способность адаптироваться к быстро меняющимся условиям производства, что приводит к снижению эффективности управления при изменении режимов работы оборудования.

2. Традиционные системы не в полной мере учитывают сложные взаимосвязи между технологическими параметрами бумаги.

3. Математические модели, используемые в системах управления, не отражают всю сложность процесса формирования бумажного полотна, что снижает точность прогнозирования и управления.

4. Системы управления требуют сложной и длительной настройки, а также регулярного обслуживания высококвалифицированным персоналом.

В качестве примера была рассмотрена система управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна на бумагоделательной машине с обрезной шириной на накате 8400 мм (рисунок 1).

Управление в поперечном направлении системой «Cross Direction Control» включает в себя такие задачи, как: управление массой 1 м^2 , влажностью и толщиной бумажного полотна.

Система управления массой 1 м^2 регулирует профиль верхней губы напорного ящика, выполненной из стальной полосы, разделенной на 64 зоны при помощи линейных шаговых двигателей, которые работают за счёт давления воздуха, подаваемого с компрессора.

Принцип работы системы управления влажностью заключается в регулировании увлажнения в каждой зоне бумажного полотна путем изменения расхода воды и давления воздуха в 85 водовоздушных распылках увлажнительной балки.

Толщина бумаги регулируется за счет нагрева каландрового вала отдельно в 114 зонах электрическими грелками. Через все грелки под давлением продувается воздух. При обдуве какой-либо зоны каландрового вала горячим воздухом происходит небольшое увеличение диаметра вала в этой зоне и, как следствие, увеличение давления на бумагу.

Одной из главных частей системы управления технологическими параметрами по ширине полотна является сканирующее устройство, движущееся поперёк бумажного полотна. На подвижных головках сканера расположены датчики для измерения основных параметров: масса 1 м^2 , влажность и толщина бумажного полотна.

Существующие системы управления бумагоделательными машинами обладают структурой, в которой каждый из параметров – масса 1 м^2 , влажность и толщина регулируется посредством отдельной специализированной подсистемы, которая имеет вид, представленный на рисунке 2.

Система управления процессом производства бумаги по ширине полотна подразумевает под собой взаимосвязанное управление между параметрами. На рисунке 3 представлена зависимость технологических параметров от изменения положений исполнительных механизмов. В итоге получается 7 моделей взаимосвязей.

В результате исходных данных, полученных на предприятиях, был проведен анализ с помощью программного обеспечения MATLAB и Desmos Studio и получена математическая модель работы системы управления показателями качества бумаги по ширине полотна:

Предлагается аппроксимировать кривые следующей зависимостью по формуле (1):

$$\Delta y_l = \begin{cases} A_y e^{-\alpha|l-m|} \cos(\omega(l-m)) \Delta X_n & \text{при } -c \leq l \leq c \\ 0 & \text{при } c \leq l \leq -c, \end{cases} \quad (1)$$

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.

В результате обработки экспериментальных данных получены следующие формулы моделей для семи контуров управления.

Управление массой 1 м² с помощью основных исполнительных механизмов регулирования массы 1 м² (WW) рассчитывается по формуле (2):

$$\Delta y_l = 0,06 e^{-0,035|l-0,1|} \cos(0,4(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (2)$$

Управление массой 1 м² с помощью основных исполнительных механизмов регулирования влажности (WH) рассчитывается по формуле (3):

$$\Delta y_l = 0,38 e^{-0,04|l-0,1|} \cos(0,01(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (3)$$

Управление влажностью с помощью основных исполнительных механизмов регулирования влажности (HH) рассчитывается по формуле (4):

$$\Delta y_l = 0,3 e^{-0,3|2l-0,1|} \cos(0,01(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (4)$$

Управление влажностью с помощью основных исполнительных механизмов регулирования массы 1 м² (HW) рассчитывается по формуле (5):

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

Управление толщиной с помощью основных исполнительных механизмов регулирования толщины (СС) рассчитывается по формуле (6):

$$\Delta y_l = 1,85e^{-3|l-0,1|} \cos(0,5(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (6)$$

Управление толщиной с помощью основных исполнительных механизмов регулирования массы 1 м² (СW) рассчитывается по формуле (7):

$$\Delta y_l = 0,05e^{-1,3|l-0,1|} \cos(1,1(l-0,1)) \Delta X_n, \quad (7)$$

Управление толщиной с помощью основных исполнительных механизмов регулирования влажности (СН) рассчитывается по формуле (8):

$$\Delta y_l = 0,9e^{-0,5|l-0,1|} \cos(0,01(2l-0,1)) \Delta X_n, \quad (8)$$

В рамках исследования была разработана структура системы управления процессом производства бумаги по ширине полотна (рисунк 4).

Разработанная система управления процессом производства бумаги по ширине полотна представляет собой алгоритмический комплекс, функционирующий на основе нейросетевых регуляторов. Структура системы включает следующие ключевые компоненты:

1. Модуль инициализации входных параметров: система оперирует тремя векторами заданных значений: $W_{\text{зад}}$ (размерность 64), $H_{\text{зад}}$ (размерность 85) и $C_{\text{зад}}$ (размерность 114), соответствующих целевым значениям массы 1 м², 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_{wn} (для массы 1 м²), U_{nn} , U_{nw} (для влажности), U_{cc} , U_{cw} , U_{cn} (для толщины), реализующих адаптивное управление параметрами бумаги.

Нейросетевые регуляторы разработаны в программной среде Neural Works Professional II/PLUS. Структура нейронных регуляторов представляет собой трехслойную сеть, для обучения был использован алгоритм Backpropagation (рисунок 5).

Метод обратного распространения ошибки Backpropagation представлен выражениями (9) и (10):

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{dE}{dw_{ij}}, \quad (9)$$

$$\Delta b_j = -\eta \frac{dE}{db_j}, \quad (10)$$

где η – скорость обучения,

E – ошибка относительно параметров сети,

w – весовая характеристика связи между нейронами,

b – смещение нейрона.

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

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_n , U_c путем линейной комбинации выходов соответствующих нейронных регуляторов с учетом весовых коэффициентов.

В результате исследования была реализована система управления технологическими параметрами 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 4). Производится построение графиков технологических параметров бумаги по ширине полотна (рисунок 7) и сохранение результатов в базу данных для последующего анализа и оптимизации процесса управления.

Представленные графики демонстрируют сравнительный анализ технологических параметров 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 технологических параметров 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. В результате серий экспериментов было выявлено, что отклонения технологических параметров процесса с применением нейросетевых регуляторов уменьшились на 5 % (рисунок 8).

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

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 8).

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

Методы формирования управляющих воздействий исполнительных механизмов (рисунок 9) подразумевают под собой систему взаимосвязанного управления, состоящую из семи нейросетевых регуляторов. Данная система разработана с целью обеспечения гибкого регулирования технологических параметров бумажного полотна в условиях достижения предельных значений. В таких ситуациях система способна осуществлять компенсаторное регулирование посредством исполнительных механизмов, ассоциированных с другими параметрами.

Каждый исполнительный механизм характеризуется определенным диапазоном действия. При достижении граничных положений исполнительные механизмы теряют способность эффективно реализовывать свои управляющие функции. Несмотря на то, что прямое управление параметром является наиболее эффективным, оно не всегда осуществимо. В таких случаях система взаимосвязанного управления обеспечивает регулирование посредством трех каналов управления.

Алгоритм оперирует тремя ключевыми параметрами: массой 1 м^2 , влажностью и толщиной бумажного полотна. Между данными параметрами существуют взаимосвязи. Увеличение массы 1 м^2 или влажности приводит к соответствующему увеличению толщины. Кроме того, изменения веса и влажности оказывают взаимное влияние. Однако изменение толщины не оказывает обратного воздействия на другие параметры, что обуславливает наличие только семи моделей взаимосвязанного управления.

Процесс управления весом бумажного полотна, представленный в левой части алгоритма, осуществляется преимущественно за счет модификации положения исполнительных механизмов веса, с меньшим вкладом механизмов влажности. Алгоритм производит сравнение показателей с нулевым значением для определения направления управляющего воздействия, после чего вычисляются максимальные и минимальные значения и проводится их сравнительный анализ. Для обеспечения корректности сравнения разнородных параметров применяется процедура нормализации величин. На основе результатов сравнения система принимает решение о выборе оптимального параметра для регулирования веса.

Аналогичный подход применяется для управления влажностью, где регулирование может осуществляться как исполнительными механизмами влажности, так и веса. Процесс включает сравнение показателей со средним значением, определение предельных значений и их последующий анализ для выбора оптимального управляющего воздействия.

Управление толщиной характеризуется наибольшей комплексностью, так как может осуществляться посредством исполнительных механизмов толщины, влажности и веса. Методология определения максимального и минимального значения аналогична предыдущим контурам управления. Выбор управляющего воздействия основывается на анализе максимальных значений среди трех параметров.

Таким образом, разработанный алгоритм обеспечивает высокоэффективное взаимосвязанное управление технологическими параметрами бумажного полотна, учитывая сложные взаимозависимости между ними и ограничения исполнительных механизмов. На основе производственного опыта применение данного алгоритма способствует минимизации частоты и амплитуды перемещений, что позволяет уменьшить износ и снизить количество отказов оборудования.

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 ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

2. 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.

3. **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.

Публикации в прочих изданиях:

4. 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.

5. 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.

6. Левинцева, В. С. Исследование системы управления каче-

ством 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. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2023. – С. 81-87.

7. 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.

8. 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.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024667397 Российской 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.

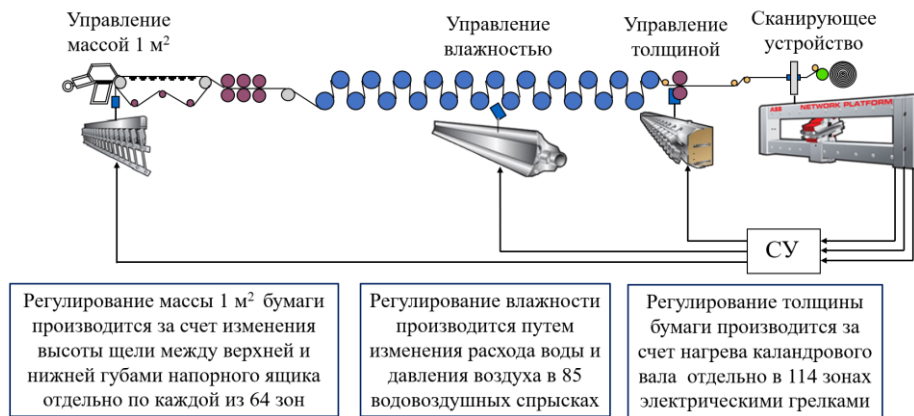


Рисунок 1 - Система управления технологическим процессом производства бумаги по ширине полотна



Рисунок 2 - Структура существующей системы управления бумагоделательными машинами для одного из параметров

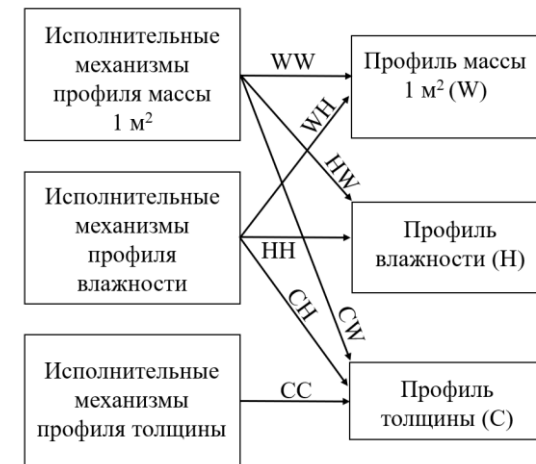


Рисунок 3 - Зависимость технологических параметров от изменения положений исполнительных механизмов

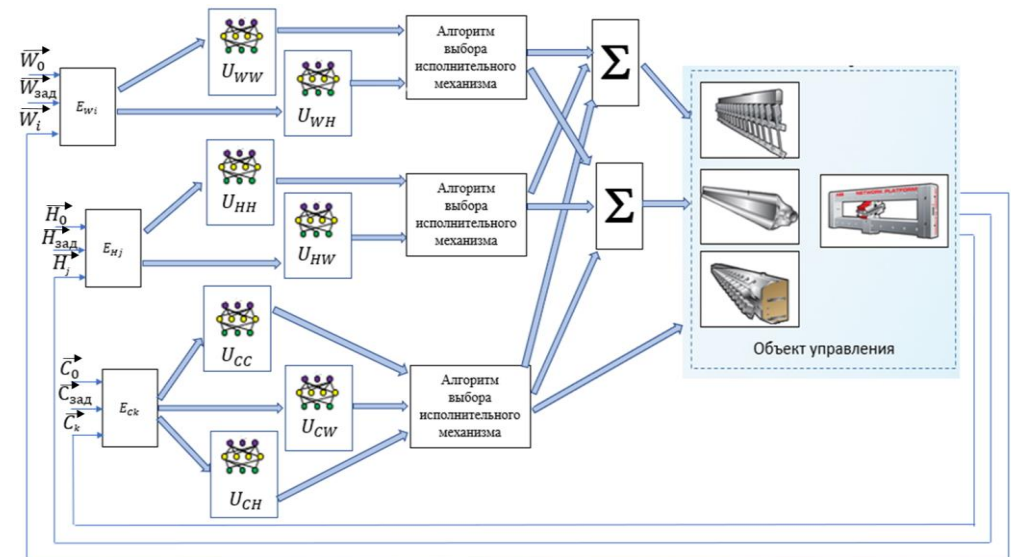


Рисунок 4 - Структура системы управления процессом производства бумаги по ширине полотна

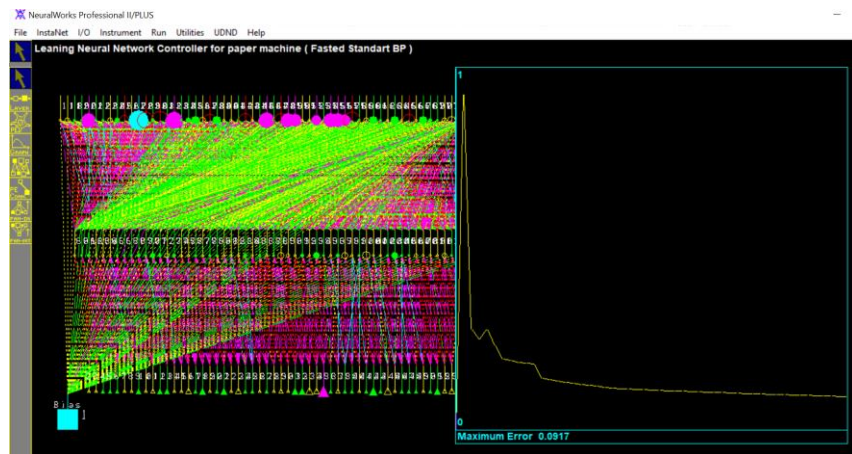


Рисунок 5 - Топология и график обучения нейросетевого регулятора в программной среде Neural Works Professional II PLUS

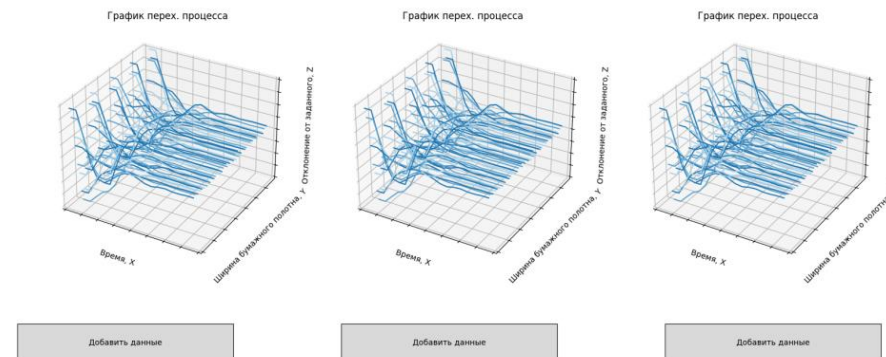


Рисунок 8 –Переходной процесс системы управления с нейросетевыми регуляторами

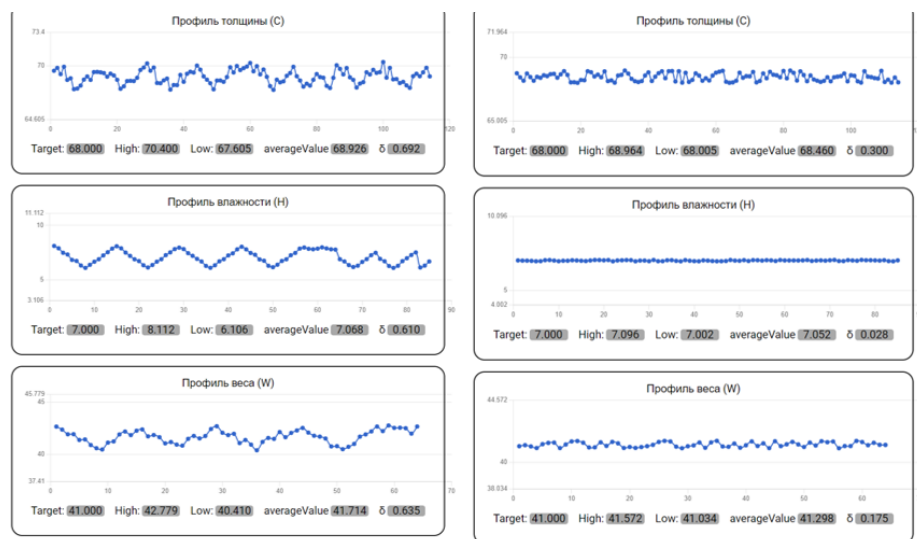


Рисунок 7 - Графики технологических параметров бумаги по ширине полотна

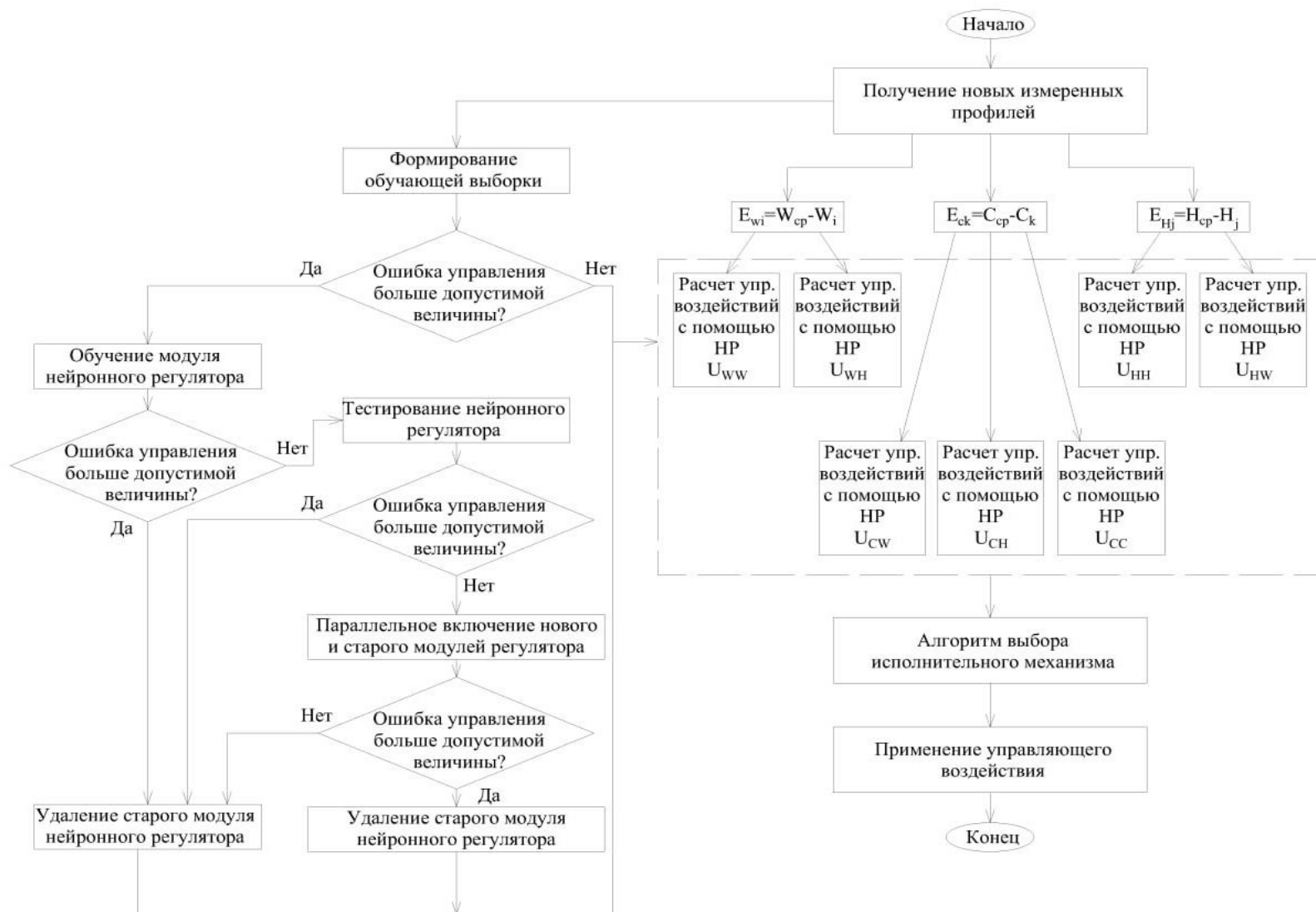


Рисунок 6 – Алгоритм функционирования системы управления технологическими параметрами по ширине бумагоделательной машины на основе нейросетевых регуляторов

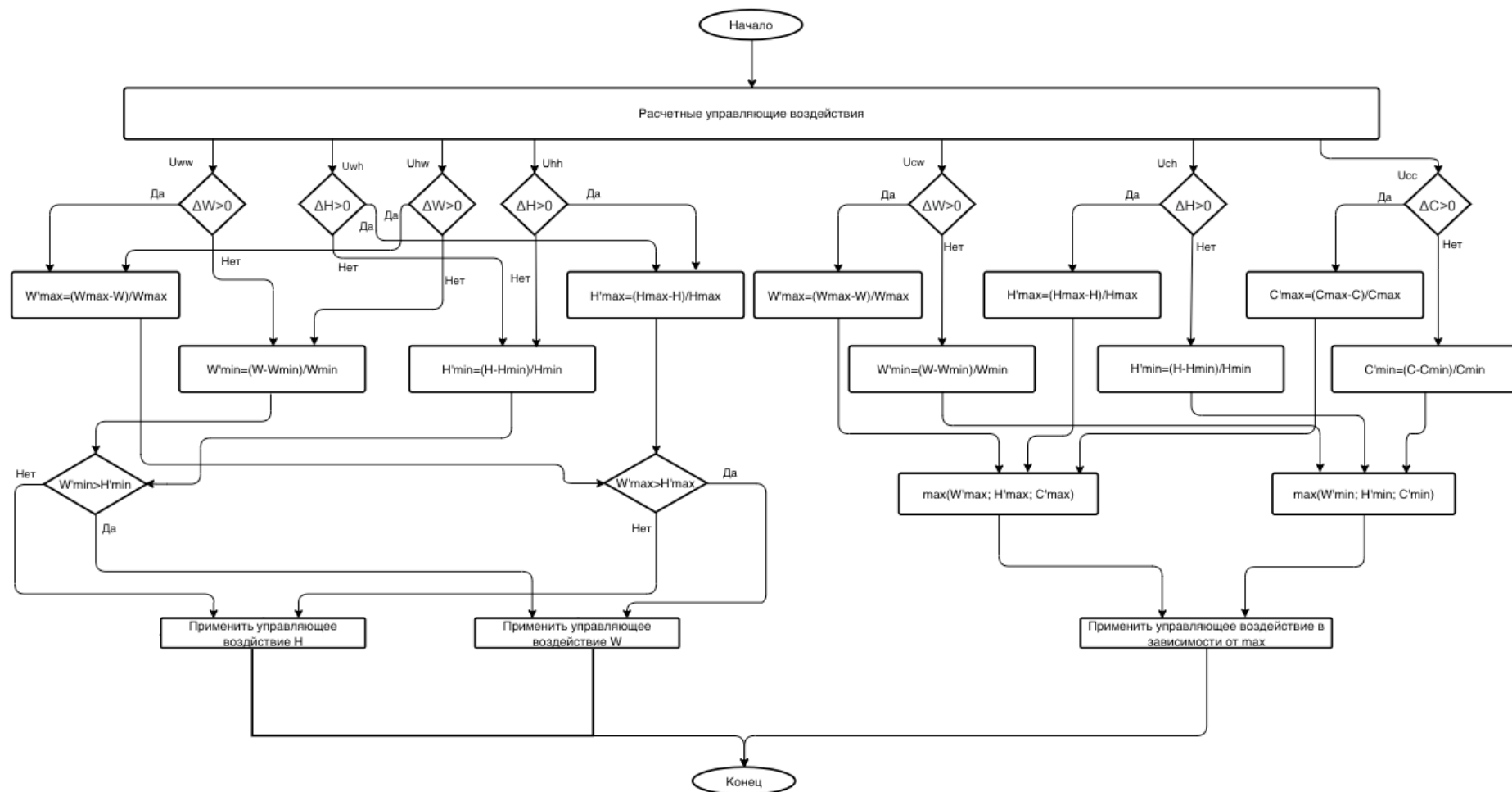


Рисунок 9 – Алгоритм формирования управляющих воздействий