

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Дунешенко Денис Юрьевич

**Разработка системы управления температурой  
охлажденной воды вентиляторной градирни**

Направление подготовки

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

АВТОРЕФЕРАТ

МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Никитина  
Елена Николаевна  
**Проверено**  
30.03.2026 Зачтено Библиотека

2026

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре  
государственный университет»

Научный руководитель

Кандидат технических наук,  
доцент кафедры Табаров Бехруз  
Довудходжаевич

Рецензент

Кандидат технических наук,  
зав. кафедры «Электротехника,  
электроника и электромеханика»  
ФГБОУ ВО ДВГУПС Скорик Виталий  
Геннадьевич

Защита состоится «19» марта 2026 года в 10 часов 00 мин на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681913, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 104/3.

Автореферат разослан 13 марта 2026 г.

Секретарь ГЭК

А.В.Бузикаева

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

Возрастающие технологические требования к качеству производственных процессов, необходимость внедрения высоких технологий обуславливают устойчивую тенденцию внедрения в различные отрасли промышленного и сельскохозяйственного производства регулируемых электроприводов.

Развитие математической теории машин переменного тока, создание усовершенствованных силовых полупроводниковых приборов и преобразователей на их основе, использование современных средств управления, включая микропроцессорные, позволили создать высококачественные и надежные системы регулируемых асинхронных электроприводов, которые становятся основным видом регулируемого электропривода.

**Актуальность темы.** В современных условиях промышленного производства вопросы эффективного охлаждения технологических сред играют ключевую роль. Вентиляторные градирни являются одними из наиболее энергоемких узлов систем оборотного водоснабжения. Нестабильность температуры охлажденной воды напрямую влияет на КПД основного оборудования и качество выпускаемой продукции. В условиях переменного климата, особенно в зимний период, ручное управление процессом охлаждения приводит либо к избыточному потреблению электроэнергии, либо к риску обмерзания конструкций. Автоматизация этого процесса с применением современных алгоритмов управления и частотно-регулируемых приводов является необходимым условием для обеспечения надежности и энергоэффективности предприятия.

**Объект исследования** — технологический процесс охлаждения оборотной воды в вентиляторной градирне.

**Предмет исследования** — система автоматического управления и регулирования температуры воды на выходе из градирни.

**Цель работы** — разработка системы управления температурой охлажденной воды вентиляционной градирни, которая позволит решить ряд технологических задач:

- снизить гидравлические удары при запуске вентиляторов;
- обеспечивать более глубокое и качественное охлаждение воды;
- выдерживать большие удельные тепловые нагрузки

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить конструктивные особенности вентиляторных градирен и проанализировать существующие методы их защиты в зимний период.

2. Сформулировать технические требования к системе стабилизации температуры.

3. Обосновать выбор технических средств автоматизации (датчиков, контроллеров, исполнительных механизмов).

4. Провести сравнительный анализ сухих и гибридных градирен для определения оптимального закона управления.

5. Разработать математическую модель системы и исследовать её поведение в динамических режимах.

6. Оценить энергетическую и экономическую эффективность внедрения предлагаемой системы автоматизации.

**Научная новизна** заключается в разработке алгоритма управления на основе аппарата нечеткой логики, который учитывает случайный характер изменения влажности воздуха, что позволяет снизить энергозатраты на 12-14% при сохранении заданной точности регулирования температуры. Предложен адаптивный алгоритм управления, базирующийся на

прогнозировании температуры «влажного термометра», что позволяет минимизировать перерегулирования в условиях резких изменений погодных факторов. Обоснована структура двухконтурной системы регулирования, обеспечивающая стабилизацию температуры воды при минимизации удельных энергозатрат на единицу отведенного тепла.

**Методы исследования.** В работе использованы методы теории автоматического управления, математического моделирования и анализа технико-экономических показателей.

**Структура работы.** Диссертационная работа включает в себя введение, 4 главы, заключение. Написана на 92 страницах, содержит 34 рисунка, 7 таблиц. Список литературы состоит из 29 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна, практическая ценность.

**В первой главе** представлен аналитический обзор и техническое обоснование разработки системы управления, проведен системный анализ вентиляторных градирен как объектов автоматизации. Обоснована роль стабильного температурного режима оборотной воды для повышения эффективности технологического цикла предприятия. Сформулированы цели и задачи исследования, направленные на устранение выявленных недостатков путем разработки более совершенной системы автоматического управления.

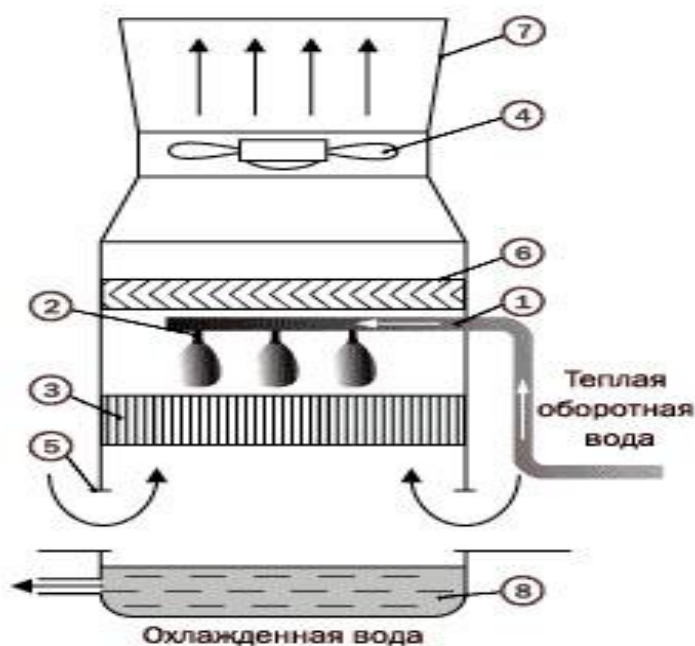


Рисунок 1. Схема вентиляторной градирни

1-распределительная система; 2-сопла; 3-ороситель; 4-вентилятор; 5-входные окна; 6-каплеуловитель; 7-диффузор; 8-резервуар.

**Во второй главе** приведены требования к системе стабилизации температуры охлажденной воды вентиляторной градирни и сформирован комплекс технических и технологических требований, необходимых для синтеза эффективной системы автоматического управления (определены целевые показатели качества регулирования; сформулированы критерии энергоэффективности; установлены эксплуатационные ограничения; обоснован выбор информационного обеспечения). Итогом является формализованное техническое задание на проектирование системы управления, обеспечивающее баланс между точностью стабилизации температуры и экономичностью работы градирни.

**В третьей главе** проведено проектирование технической структуры и математическое описание элементов системы автоматизации. Проведен сравнительный анализ сухих и гибридных градирен. Обоснован закон управления воздушным потоком. На основе анализа статических характеристик процесса выбрана стратегия регулирования скорости

вращения вентиляторов, обеспечивающая оптимальный расход воздуха в зависимости от текущих метеорологических параметров. Осуществлен выбор технических средств: подобраны исполнительные механизмы (частотно-регулируемые электроприводы) и измерительно-преобразовательные элементы (датчики температуры, влажности и давления). Разработано математическое описание отдельных звеньев системы, на основании которого составлена полная структурная схема системы автоматического регулирования (САР). Это позволило формализовать взаимосвязи между управляющими воздействиями и выходными параметрами процесса. Синтезирована функциональная схема автоматизированной системы управления (АСУ), определяющая алгоритм взаимодействия контроллеров, датчиков и силового оборудования для обеспечения автоматического режима работы градирни.

**В четвертой главе** проведено исследование динамических характеристик разработанной системы автоматического регулирования и выполнена оценка её эффективности. Проведено имитационное моделирование работы системы в динамических режимах при резких изменениях внешних возмущений (температуры и влажности атмосферного воздуха, колебаний тепловой нагрузки). Подтверждена устойчивость САР и соответствие показателей качества регулирования заданным требованиям. Выполнена оценка энергетической эффективности: сравнительный анализ показал, что внедрение алгоритма частотного регулирования в зависимости от энтальпии воздуха позволяет существенно снизить потребление электроэнергии двигателями вентиляторов в периоды пониженных температурных нагрузок. Проведен расчет экономической эффективности: на основе сопоставления эксплуатационных затрат базового и предлагаемого вариантов автоматизации определены сроки окупаемости системы, а также подтверждено снижение себестоимости охлаждения оборотной воды за счет оптимизации режимов работы оборудования.

Для построения зависимостей  $t_0(t)$ ,  $t_\theta(t)$ ,  $\beta(t)$  и  $\omega(t)$  при нулевых начальных условиях пользуемся пакетом программ MatLab. Для этого задаем структуру системы ЭП (рисунок 2) и дополняем её функциональными блоками градирни (апериодическое звено 1-го порядка).

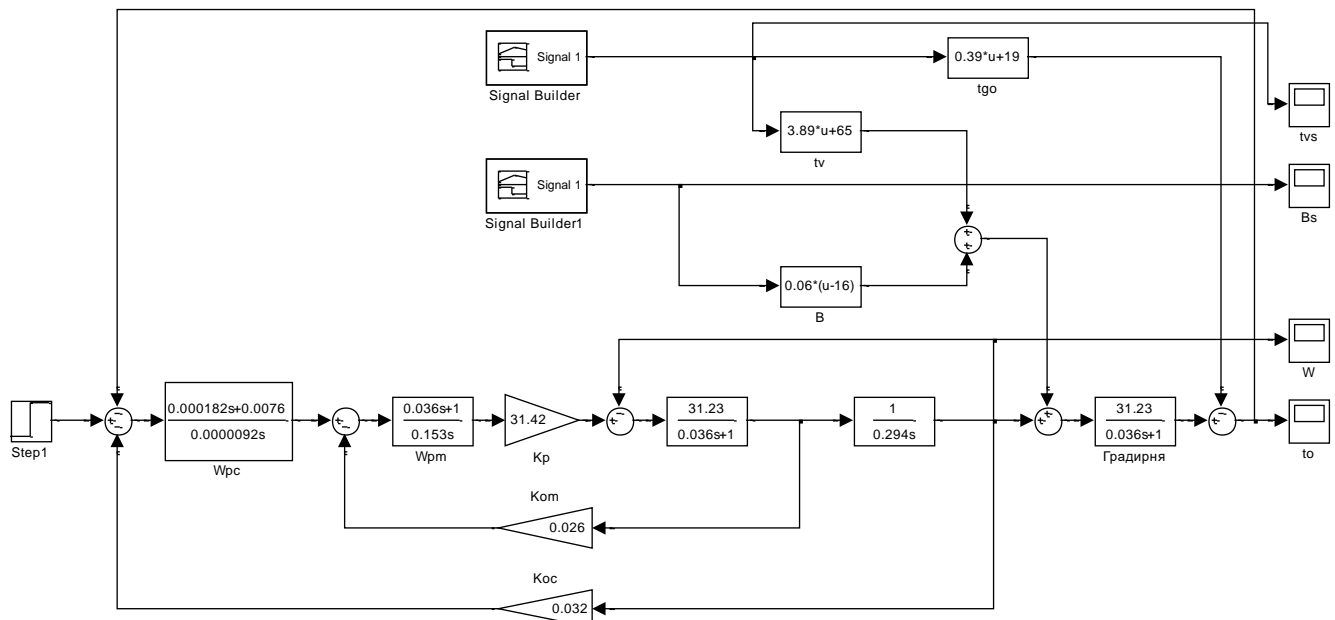


Рисунок 2 – Структурная схема САР, выполненная в MatLab

Графики зависимостей  $t_0(t)$ ,  $t_\theta(t)$ ,  $\beta(t)$  и  $\omega(t)$  при скачкообразном изменении сигнала изображены на рисунке 3 – 6.

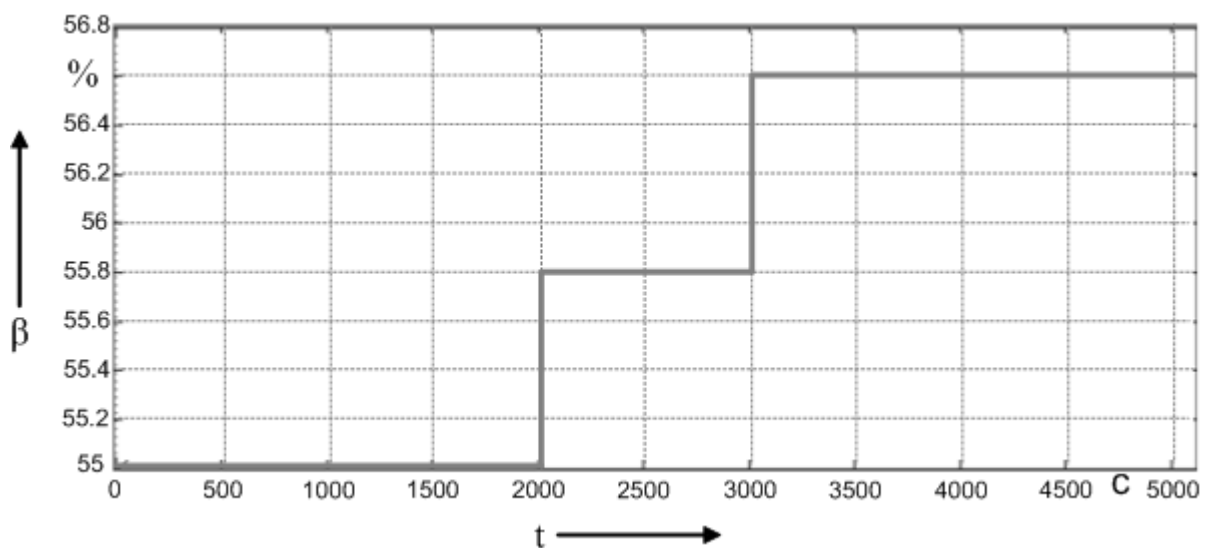


Рисунок 3 – Управляющее воздействие по влажности воздуха

На данном рисунке 3 мы видим ступенчатый график, он говорит о том, что система переходит на новые режимы работы резкими скачками в фиксированные моменты времени, а не плавно. Иллюстрирует программный закон изменения влажности воздуха. Ступенчатый характер воздействия позволяет оценить показатели качества регулирования системы, такие как время переходного процесса и статическая ошибка при последовательном увеличении заданного значения параметра.

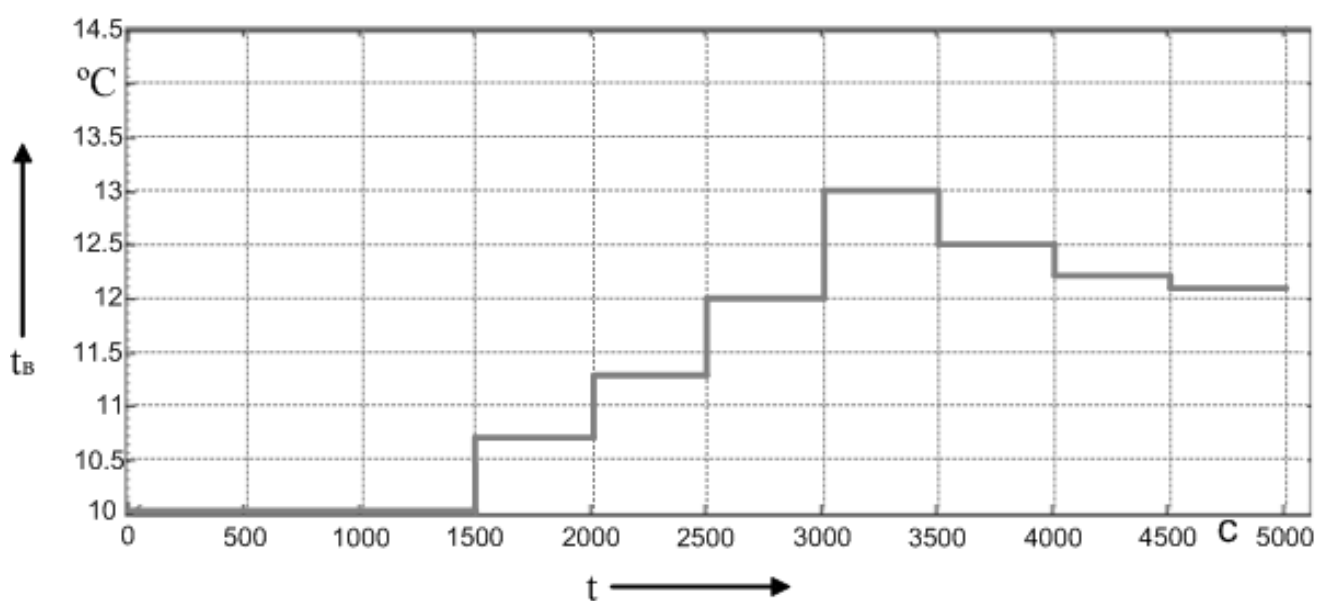


Рисунок 4 – Управляющее воздействие по температуре воздуха

Рисунок 4 показывает график изменения заданного значения температуры воздуха во времени. Это говорит о том, что в системах автоматического регулирования это «совершенный» план, которому должна следовать система. Графическая зависимость представляет собой программный закон управления, реализованный в виде последовательности ступенчатых воздействий разной полярности. Данный вид сигнала позволяет комплексно оценить качество регулирования температуры: время переходного процесса при нагреве и охлаждении, а также статическую точность системы в различных температурных полках.

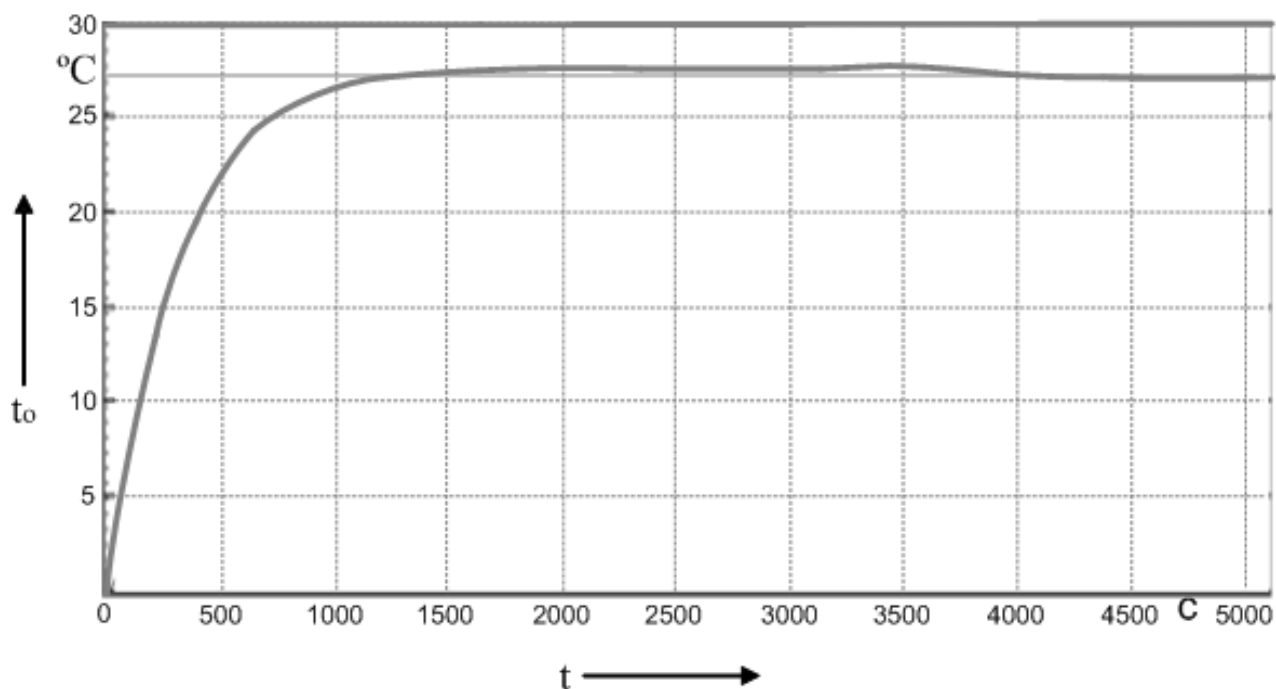


Рисунок 5 – Реакция системы по температуре воды

Рисунок 5 демонстрирует нам реакцию системы по параметру температуры воды во времени. Графическая зависимость отражает реакцию системы на пусковое воздействие. Переходный процесс характеризуется высокой инерционностью, обусловленной физическими свойствами объекта управления (теплоемкостью воды). Малое значение перерегулирования и отсутствие автоколебаний в установившемся режиме подтверждают эффективность выбранного алгоритма управления и точность настройки параметров регулятора. Система достигает заданного значения за 2000 секунд, после чего обеспечивает стабильное поддержание температуры с минимальной статической ошибкой.

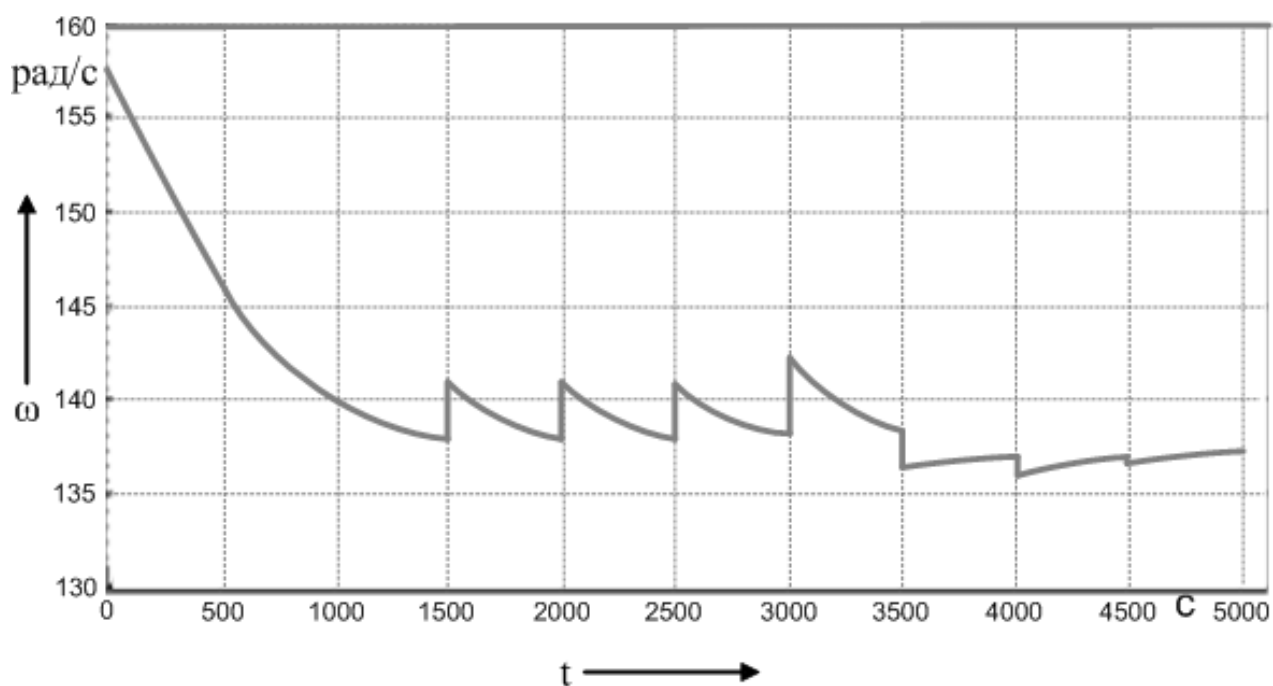


Рисунок 6 – Реакция системы по скорости двигателя

На данном графике мы видим переходную характеристику по угловой скорости двигателя при работе автоматического регулятора. График нам показывает динамическую работу механического привода в условиях изменяющейся нагрузки или новых заданий. Графическая зависимость демонстрирует работу системы автоматического регулирования скорости в составе частотно-управляемого электропривода. Пилообразный характер кривой после 1500-й секунды обусловлен обработкой ступенчатых управляющих воздействий по каналам температуры и влажности. Быстрая реакция привода на изменения уставок (заданное значение параметра) и отсутствие затяжных автоколебаний свидетельствуют о высокой динамической устойчивости системы ПЧ-АД и адекватности выбранного закона частотного управления.

В работе решена важная научно-техническая задача по созданию системы управления вентиляторной градирней. Разработанный комплекс моделей и алгоритмов позволяет обеспечить стабильность технологического процесса при минимальных затратах на электроэнергию.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана динамическая математическая модель вентиляторной градирни, учитывающая нелинейную зависимость температуры воды от энтальпии наружного воздуха (температуры и влажности) и текущего расхода тепловой нагрузки.

2. Сформулирован закон управления скоростью воздушного потока на основе частотного регулирования приводов вентиляторов. Алгоритм обеспечивает плавную стабилизацию температуры воды в заданном диапазоне.

3. Разработаны функциональная и структурная схемы системы автоматизации, включающие контуры защиты от обмерзания в зимний период и систему предиктивной коррекции по метеоусловиям.

4. Создана имитационная модель системы в среде моделирования (например, MATLAB), позволившая исследовать переходные процессы в различных климатических условиях.

Таким образом, цель исследования достигнута. Разработанная система автоматизации является современным, технически совершенным и экономически целесообразным решением, которое может быть рекомендовано к внедрению на предприятиях, использующих системы оборотного водоснабжения.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:**

1. Дунешенко Д.Ю. Разработка и моделирование многоконтурной системы автоматического регулирования температуры охлажденной воды вентиляторной градирни / Д.Ю.Дунешенко // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2026 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026.

2. **Дунешенко Д.Ю.** Повышение энергетической эффективности и экономическое обоснование внедрения системы управления температурой охлажденной воды вентиляторной градирни / Д.Ю.Дунешенко // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы IX Всероссийской национальной научной конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 06-10 апреля 2026 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2026.