

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский Томский
политехнический университет»**

На правах рукописи

Прохоров Сергей

**Алгоритмическое обеспечение для обнаружения нештатных ситуаций в
автоматизированной системе управления процессом сушки
пиломатериала**

2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами
Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Шилин Александр Анатольевич

Томск – 2026

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Исследование предметной области	12
1.1. Описание автоматизированной системы управления комплексом осушения пиломатериалов	12
1.2. Проблема заиневания вытяжных каналов тепловых рекуператоров в системах вентиляции	25
1.3. Определение признаков заиневания вытяжного канала рекуперации воздуха.....	40
1.4. Контроль технологических параметров в системах сушки пиломатериалов	42
Заключение к главе 1	45
Глава 2. Математическое описание управляемых элементов комплекса осушения пиломатериалов	50
2.1. Синтез математической модели	51
2.2. Моделирование системы рекуперации в программной среде SciLab ...	58
2.3. Контроль состояния исполнительных компонентов.....	82
Заключение к главе 2	97
Глава 3. Реализация и обработка результатов.....	99
3.1. Организация средств управления и сбора данных	99
3.2. Реализация алгоритмов на ПЛК	104
3.3. Анализ данных в системе осушения пиломатериалов	110
Заключение к главе 3	116

Заключение	119
Список условных обозначений.....	122
Список сокращений	128
Публикации автора	130
Статьи в журналах из перечня ВАК.....	130
Статьи в журналах из перечня Scopus	130
Публикации в трудах конференций, индексируемых Scopus.....	131
Публикации в трудах конференций	132
Патенты на изобретение	133
Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ.....	133
Список литературы	135
Приложение А. Шкаф силовой. Схема электрическая принципиальная	169
Приложение Б. Шкаф управления. Схема электрическая принципиальная...	171
Приложение В. Акт о внедрении результатов диссертационной работы соискателя.	174
Приложение Г. Акт о внедрении результатов диссертационной работы соискателя.	175
Приложение Д. Акт о внедрении результатов диссертационной работы соискателя.	176

Введение

Ввод и последующая эксплуатация систем приточно-вытяжной вентиляции на производственных объектах сопряжены с необходимостью контроля их работы в различных режимах. В рамках настоящего исследования рассматривается система вентиляции с тепловым рекуператором. К числу режимов ее работы относятся как штатные операционные циклы (прогрев калорифера, срабатывание приводов заслонок, пусковые характеристики двигателей), так и функционирование в особых условиях, вызванных нештатными ситуациями (поступление сигнала о пожаре, засорение фильтров, отказы вентиляторов и пр.). Корректная интерпретация состояния оборудования в каждом из этих режимов является критически важной для оперативного принятия решений персоналом и обеспечения непрерывности технологического процесса. В контексте систем сушки пиломатериалов, где процесс может длиться свыше 10 суток, данная задача приобретает особую значимость, поскольку скрытые отказы элементов могут привести к порче итогового продукта. К нештатным ситуациям, в контексте данной работы, относятся обмерзание вытяжного теплообменника рекуператора, отказы циркуляционных вентиляторов, некорректное положение воздушных заслонок и сбой в работе резистивных датчиков контроля влажности древесины. Традиционные подходы к диагностике могут оказаться неэффективными из-за воздействия множества внешних факторов (электромагнитные помехи, агрессивная среда и пр.). В данной работе предлагается комплексный метод

диагностики, позволяющий своевременно оповещать оператора о наличии нештатных ситуаций.

Исследованием рекуперативных установок в системах вентиляции занимались Кокорин О. Я., Варфоломеев Ю.М., Ларкин Д.К. О проблеме заиневаания рекуператоров в своих работах писали Баймачев Е.Э., Максимова Н.А., Гулевский В.А. Работу камер осушения пиломатериалов рассматривали Богданов Е.С., Дунаева М.П. Также исследованием этих задач занимались зарубежные ученые: H.Y. Bai, P. Liu, M. Justo Alonso, H.M. Mathisen, Miklos Kassai.

Получение достоверных исследовательских данных и решение поставленных задач требуют последовательного выполнения следующих этапов: определение методов, адекватно отражающих технологический процесс и синтеза математической модели; изучение методов оценки величин, недоступных для прямого измерения; выработка принципиальных решений для создания системы управления. После успешного тестирования эти решения реализуются в программируемом логическом контроллере и проходят апробацию на объекте, с предпочтением аппаратных средств отечественного производства.

Объектом исследования является технологический процесс вентиляции в системе осушения пиломатериалов с тепловым рекуператором.

Предметом исследования выступают методы и алгоритмы управления технологическим процессом сушки пиломатериалов.

Целью данной работы является обеспечение работоспособности технологического комплекса сушки пиломатериалов при возникновении нештатных режимов.

Для достижения поставленной цели были определены **задачи**:

Выполнить анализ известных решений по определению нештатных ситуаций на основе данных переходных процессов в автоматизированной системе сушки пиломатериалов. По результатам анализа сформировать алгоритмы и программно-аппаратные решения, позволяющие эффективно выявлять и парировать влияние нештатных ситуаций.

Разработать систему диспетчерского контроля и сбора данных для удалённого технологического процесса сушки пиломатериалов.

Разработать алгоритмы анализа переходных процессов в автоматизированной системе управления сушки пиломатериалов, обеспечивающие диагностику нештатных ситуаций элементов оборудования.

Научная новизна. Предложена математическая модель процесса теплообмена рекуператора в составе системы вентиляции, позволяющая определить условия и переменные состояния, выявляющие условия нарушения процесса теплообмена, отличающаяся от известных решений включением динамической модели инеобразования.

Предложен метод и алгоритм разморозки вытяжного канала рекуператора, позволяющий минимизировать тепловые потери с сохранением эффективности рекуператора, отличающийся применением свойств оттаивания при

температуре точки росы. Этот метод позволяет минимизировать падение эффективности рекуперации в режиме разморозки.

Предложен метод и алгоритм оценки состояния исполнительных механизмов автоматизированной системы осушения пиломатериалов, позволяющие определить их работоспособность и отличающийся применением анализа спектрального состава переходных процессов датчиков температуры.

Практическая значимость. Разработан программно-аппаратный комплекс позволяющий архивировать и анализировать переходные процессы, исследовать корректность математических моделей. Результаты возможно использовать для построения подобных математических моделей и реализовывать алгоритмы управления для процесса разработки систем управления вентиляционными процессами с тепловыми рекуператорами. Технические площадки с автоматизированными системами находятся в г. Томск и в п. Жатай (Якутия).

Методы исследования. Математический анализ— выполнен синтез математических моделей ключевых компонентов системы для описания их поведения и взаимодействия. Анализ математических моделей — исследование построенных моделей для оценки их адекватности с проверкой соответствия между моделью и реальными процессами. Имитационное моделирование на основе функциональных блоков. Экспериментальная проверка — использование действующего объекта для проверки достоверности разработанных моделей. Для автоматизации расчетов применялись пакеты

Matlab, SciLab, CoDeSys. Программная реализация — применение специализированного языка программирования CFC стандарта IEC 61131-3 для реализации алгоритмов управления.

Основные положения, выносимые на защиту:

Математическая модель процесса теплообмена рекуператора в составе системы вентиляции, отражает параметры объекта, по которым можно определить признаки нештатного режима работы на основании перепада давления в вытяжном канале рекуператора. Применение наблюдателя переменных состояния процесса заиневаия позволяет обеспечить качественную оценку уровня замерзания в условиях помех для корректного определения моментов переключения между режимами.

Алгоритм поддержания температуры на выходе вытяжного теплообменника в точке росы, позволяет обеспечить режим оттаивания достаточный для выхода из нештатной ситуации с сохранением эффективности рекуперации.

Метод анализа частотных характеристик и алгоритмы вычисления свойств параметров спектра переходных процессов температур сухого и влажного датчиков системы осушения пиломатериалов, позволяют оценить работоспособность заслонок и вентиляторов. При этом неисправность воздушной заслонки выявляется за 5–8 минут, а реверсивного вентилятора — за 60–80 минут.

Разработанная автоматизированная система управления с предложенными методами и алгоритмами обеспечивает бесперебойную работу комплекса сушки пиломатериалов.

Достоверность полученных результатов подтверждена обоснованностью применения математического аппарата, результатами компьютерного моделирования и экспериментальных исследований в условиях эксплуатации на объектах в течении более 6 лет. Результаты и выводы диссертационной работы в полной мере согласуются с результатами, полученными другими авторами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует паспорту специальности **2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами.**

Синтезирована математическая модель системы управления тепловым рекуператором (соответствует п. 4). Предложен метод оценки состояния вытяжного канала системы вентиляции с последующим переключением между режимами, позволяющий выполнить оттаивание вытяжного канала (соответствует п. 3). Предложен метод анализа частотных характеристик и спектрального анализа переходных процессов температурных датчиков на электронном психрометре системы осушения пиломатериалов, который позволяет оценить работоспособность исполнительных механизмов (соответствует п. 10).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на следующих научных семинарах и конференциях: Энергетика и энергосбережение: теория и практика, 2015, Кемерово (Россия); Энергостарт: сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической школы, 2016, Кемерово (Россия); Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции, 2018, Новокузнецк (Россия); Journal of Physics: Conference Series, 2017, Томск (Россия); MATEC Web of Conferences, 2017, Томск (Россия); Far East Con-2019, 2019, Владивосток (Россия); International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2023, Сочи (Россия)

Личный вклад. Автор принимал активное участие в разработке и исследовании математической модели, производил анализ результатов испытаний. Автором были сформированы основные публикационные материалы.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 20 печатных изданиях; три из которых [1-3] изданы в журналах, рекомендованных ВАК; две статьи [4, 5] и пять публикаций [6-10] проиндексированы в базе Scopus; пять в тезисах докладов [11-15]; три патента на изобретение [16-18]; два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [19, 20].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения. Полный объём диссертации составляет 176 страниц, включая 5 приложений, 51 рисунок, 9 таблиц. Список литературы содержит 165 наименований.

Глава 1. Исследование предметной области

В данной главе диссертационного исследования проводится литературный анализ проблем, возникающих в системах вентиляции различного назначения и при работе в нештатных режимах.

В рамках данной работы следует выделить два режима функционирования: штатный и нештатный.

Штатный режим работы – все компоненты системы работают исправно (датчики, насосы, вентиляторы, заслонки, рекуператоры).

Нештатный режим функционирования системы в контексте настоящей работы:

- Обледенение вытяжного канала рекуператора, сопровождающееся невозможностью отвода вытяжного воздуха.
- Нарушение работоспособности исполнительных устройств: вентиляторов, воздушных клапанов, электроприводов и других компонентов.

1.1. Описание автоматизированной системы управления комплексом осушения пиломатериалов

Древесина относится к гигроскопичным материалам, свойства которых определяются содержанием влаги. При снижении влажности древесины изменяются её геометрические размеры, прочностные характеристики и цвет. Для снижения влажности древесины от начального уровня порядка 60 % до

технологически регламентированных значений 8–20 % [165] применяются методы кондиционирования пиломатериалов [117].

Необходимость управления процессом удаления влаги обусловлена требованиями к стабильности геометрических и прочностных характеристик готовой продукции. В связи с этим в практике обработки древесины разработан ряд методов сушки, отличающихся физическими принципами влагопереноса, энергетическими затратами и технологическими возможностями.

В практике обработки древесины используются различные методы сушки.

Естественная сушка осуществляется путём выдерживания пиломатериалов на открытом воздухе под навесом. Процесс происходит за счёт естественной конвекции воздуха и солнечной радиации. Метод характеризуется низкими эксплуатационными затратами и значительной продолжительностью. Существенное влияние оказывают метеорологические условия [165].

Конвекционная (камерная) сушка реализуется в сушильных камерах с регулируемыми параметрами микроклимата: температурой, относительной влажностью и скоростью воздушного потока. Горячий воздух продувается через штабель, что интенсифицирует влагоперенос. Метод широко применяется в промышленности [165].

Инфракрасная сушка основана на нагреве поверхности древесины инфракрасным излучением, что вызывает испарение влаги.

Вакуумная сушка осуществляется в герметичных камерах при пониженном давлении, что обеспечивает испарение влаги при пониженных температурах.

Микроволновая (СВЧ) сушка основана на нагреве древесины за счёт энергии электромагнитного излучения сверхвысокой частоты, что приводит к испарению влаги по всему объёму материала.

Конденсационная сушка основана на применении тепловых насосов для нагрева воздуха в сушильной камере за счёт переноса тепловой энергии из окружающей среды.

Применение конкретного метода определяется производственными условиями и требованиями к качеству продукции.

Среди перечисленных методов наибольшее распространение в промышленности получила конвекционная сушка, что обусловлено относительной простотой реализации, возможностью масштабирования и наличием стандартизированных режимов обработки древесины.

Наибольшее распространение получила конвекционная сушка с использованием стандартизированных режимов, предусматривающих поддержание постоянных параметров сушильного агента. Для релаксации внутренних напряжений в древесине применяется операция пропаривания продолжительностью 2–4 часа [117, 118, 119]. Данный подход не учитывает изменение физического состояния материала в процессе сушки [165].

В работах [117, 120, 121, 122] рассматриваются осциллирующие методы сушки (ОМС), основанные на циклическом изменении технологических параметров. При реализации ОМС осуществляется циклическое изменение температуры и влажности сушильного агента, периодическая смена направления воздушного потока, а также задание частотных и амплитудных характеристик колебаний.

Осциллирующий режим обеспечивает перераспределение влаги по объёму материала и снижение градиента влажности, перераспределение тепла и влаги в сушильной камере, а также интенсификацию влагопереноса на начальной стадии сушки [120]. Энергетические затраты изменяются за счёт отказа от постоянных высокотемпературных режимов [121]. К особенностям метода относится необходимость непрерывного изменения параметров в камере и обработки оперативных данных.

Реализация осциллирующих режимов сушки приводит к появлению выраженных переходных процессов, параметры которых могут быть использованы для оценки текущего состояния древесины и сушильного агента.

В работе рассматриваются переходные процессы, представляющие собой зависимости температур по сухому и влажному термометрам, сигналов направления вращения вентиляторов и положения воздушной заслонки от времени. Показания психрометрических датчиков используются для определения влажности воздуха в сушильной камере и оценки равновесной влажности древесины [123].

Основным недостатком психрометрического метода является риск высыхания увлажнённого датчика, что приводит к искажению показаний. Указанный недостаток устраняется контролем уровня воды и применением выносных баков с системой автоматического пополнения.

В работах [124, 125] отмечается инерционность специализированных датчиков и увеличение погрешности измерений при высокой влажности воздуха. В сушильных камерах применяются резистивные датчики влажности. В условиях агрессивной среды их показания могут отклоняться от фактических значений вследствие деградации чувствительного элемента [126, 127].

К факторам, влияющим на показания резистивных датчиков, относятся загрязнение поверхности датчика, локальное подсыхание древесины в зоне контакта, а также глубина и место установки датчика [117, 118, 119].

Переходные процессы при осциллирующем методе сушки содержат информацию о текущем состоянии материала. Связь между влажностью древесины и относительной влажностью сушильного агента устанавливается в работах [121, 123]. Равновесная влажность древесины однозначно определяется температурой и относительной влажностью сушильного агента, что подтверждается диаграммой равновесной влажности Н. Н. Чулинского, уравнением Хейлвуда–Хорробина [129] и данными, приведёнными в [119, 124, 130].

Для принятия решения о переходе между этапами сушки необходимо знание равновесной влажности древесины [131]. В настоящее время контроль

осуществляется оператором с применением переносных средств измерения внутри сушильной камеры. Указанные измерения не входят в контур автоматического управления и могут быть пропущены в неблагоприятных условиях эксплуатации.

Вопросы тарировки резистивных датчиков влажности древесины, а также методы автоматической коррекции их показаний в процессе сушки рассмотрены в работах других исследователей [143, 147]. В настоящем исследовании указанные вопросы используются в качестве теоретической и методической основы и отдельно не рассматриваются.

Таким образом, анализ переходных процессов и параметров сушильного агента при осциллирующей сушке может быть использован для косвенной оценки состояния древесины и формирования управляющих воздействий в автоматизированных системах управления сушильными камерами.

Комплекс для осушения пиломатериалов (Рисунок 1.1) представляет собой набор оборудования и технологий, предназначенных для удаления влаги из древесины до необходимого уровня влажности. Этот процесс необходим для улучшения качества материала перед дальнейшей обработкой или использованием [10]. В существующем комплексе следует выделить три помещения: помещение сушильной камеры, электрощитовая и диспетчерская.

Процесс включает следующие шаги:

- загрузку пиломатериала. Материал укладывается в сушильную камеру;

- начальный прогрев. Камеру медленно нагревают до рабочей температуры;
- циркуляцию воздуха. Горячий воздух непрерывно циркулирует через штабель пиломатериалов, обеспечивая равномерное испарение влаги;
- сброс воздуха. Часть отработанного влажного воздуха периодически сбрасывается наружу, заменяясь свежим воздухом, что поддерживает необходимый уровень влажности в камере;
- регулировку параметров. Температуру, влажность и скорость циркуляции воздуха контролируют и регулируют в соответствии с программой сушки;
- кондиционирование. Перед окончанием сушки проводят кондиционирование для выравнивания влажности по всей толще древесины;
- охлаждение и выгрузку. После достижения нужной влажности материал охлаждают и выгружают из камеры.

Этот метод реализации процесса позволяет эффективно удалять влагу из древесины, сохраняя при этом контроль над условиями сушки. Общий вид комплекса осушения пиломатериалов представлен на рисунке 1.1.

Камера для осушения пиломатериалов (Рисунок 1.2) включает в себя следующие элементы:

1. газовый котел – основной источник тепловой энергии, обеспечивающий нагрев теплоносителя;
2. калориферы – теплообменники, предназначенные для передачи тепла от теплоносителя окружающему воздуху;
3. циркуляционный насос – устройство, обеспечивающее принудительное перемещение теплоносителя по системе отопления;
4. реверсивные вентиляторы – вентиляционные установки, расположенные под потолком, служащие для создания потока нагретого воздуха в камере;
5. воздушные клапаны – устройства, встроенные в крышу камеры, регулирующие поступление и выход воздушных потоков;
6. сухой датчик измеряет температуру окружающей среды без учета относительной влажности,
7. влажный датчик учитывает влияние влажности на показания температуры;
8. средства управления – силовые шкафы, содержащие электрооборудование для управления работой насоса, вентиляторов и приводов клапанов;

9. шкаф управления с программируемым логическим контроллером (ПЛК) – основное устройство автоматизации, осуществляющее управление процессом сушки согласно заданным параметрам;

10. автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора – интерфейс взаимодействия оператора с системой управления, расположенный в помещении операторной;

11. осушаемый пиломатериал – объект сушки, находящийся непосредственно в камере;

12. приточный калорифер рекуператора – элемент системы теплообмена, предназначенный для предварительного подогрева входящего воздуха за счёт тепла отходящих потоков воздуха;

13. вытяжной калорифер рекуператора – аналогичное устройство, работающее на выходе воздушного потока из камеры;

14. циркуляционный насос для организации циркуляции теплоносителя в контуре рекуперации;

15. преобразователь частоты – прибор, изменяющий частоту подаваемого напряжения для регулирования скорости циркуляционного насоса;

16. реле перепада давления;

17. датчики температуры теплоносителя, отслеживающие параметры теплоносителя в трубопроводе.

Психрометр представлен двумя датчиками температуры (сухим (6) и влажным (7)) с защищёнными от внешнего воздействия оболочками (Рисунок 1.3).

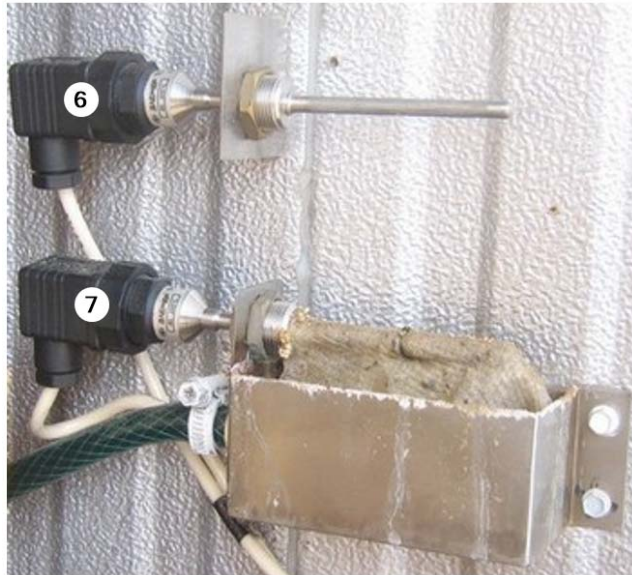


Рисунок 1.3 – Датчики электронного психрометра

Все эти компоненты работают синхронно, обеспечивая непрерывный цикл осушения пиломатериалов. Газовый котел создает тепло, которое передается через калориферы в виде горячего воздуха. Вентиляторы перемещают этот воздух, а воздушные клапаны, регулируют его подачу и сброс. Датчики собирают информацию о температуре и влажности, передавая ее на ПЛК, который управляет всей системой [49, 50]. Оператор следит за процессом через АРМ и при необходимости вмешивается в работу системы.

В приточном и вытяжном каналах предполагается установка теплообменников рекуператора [52].

Для организации работы систем управления и сбора данных следует предоставить структуру аппаратной части (Рисунок 1.4).

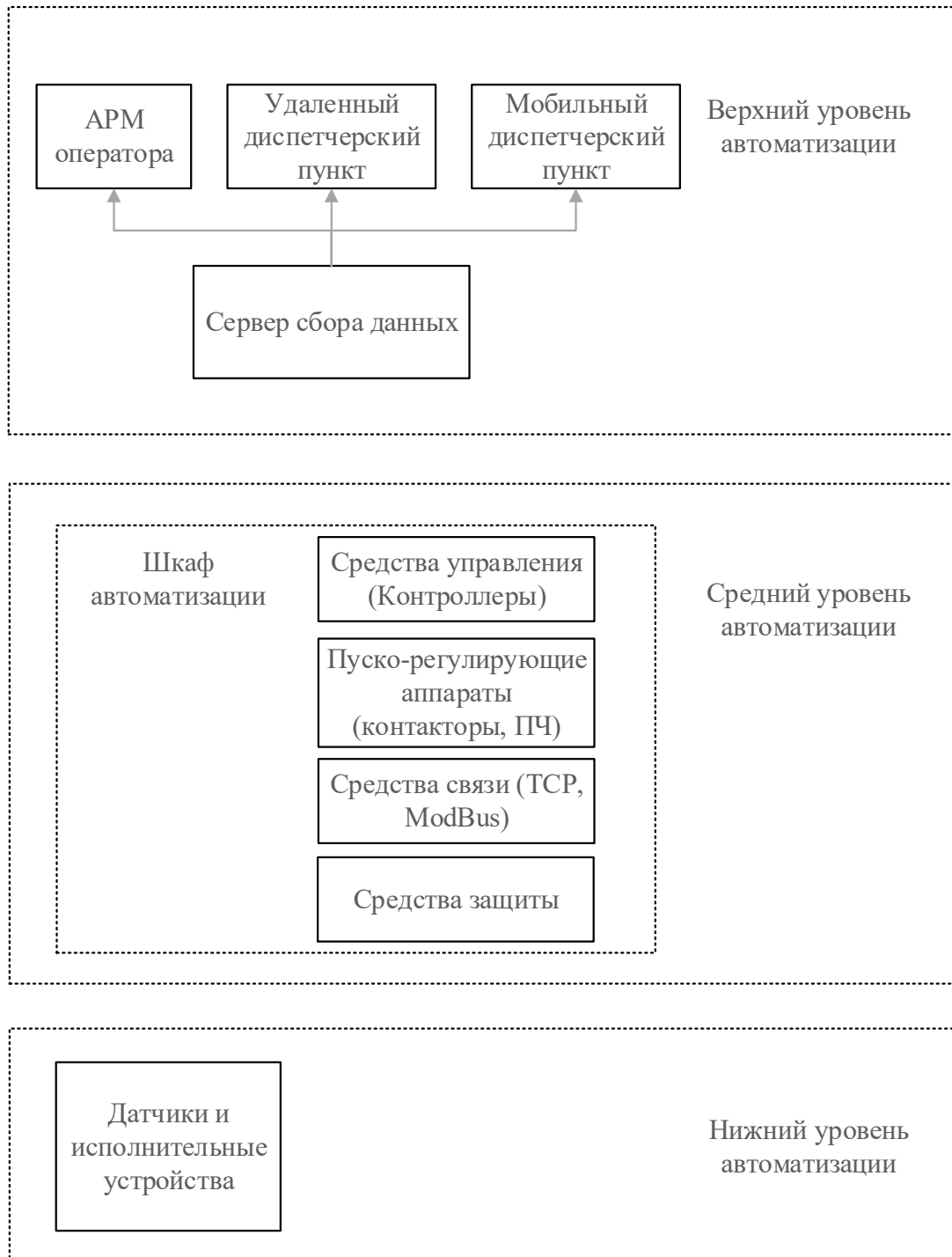


Рисунок 1.4 – Структура средств автоматизации объекта

В текущей главе определена структура автоматизации технических средств с подробным обозначением всех компонентов структуры. Для организации сбора данных и контроля состояния систем определена система диспетчеризации. В главе 3 представлена аппаратная реализация описанных во

второй главе решений на основе общеизвестных промышленных средств. Произведен анализ полученных данных. Применительно к существующему объекту, согласно стандартной структуре (Рисунок 1.4) [85, 86], уровни автоматизации разделены следующим образом.

Нижний уровень автоматизации: оборудование и устройства прямого воздействия.

Эти компоненты отвечают за непосредственное физическое воздействие на процесс сушки и обеспечивают передачу энергии и вещества:

1. газовый котел;
2. калориферы;
3. циркуляционный насос;
4. реверсивные вентиляторы;
5. воздушные клапаны;
6. реле перепада давления;
7. датчики;

Средний уровень автоматизации: средства управления и контроля.

Этот уровень отвечает за сбор данных о процессе, их анализ и принятие решений об управлении оборудованием:

1. преобразователь частоты;
2. силовой шкаф управления вентиляторами, насосом и приводами клапанов;
3. шкаф управления с ПЛК.

Верхний уровень автоматизации: информационная поддержка и взаимодействие с оператором.

Здесь находятся компоненты, обеспечивающие взаимодействие оператора с системой и поддержку принятия решений:

1. АРМ оператора;
2. мобильные дистанционные средства контроля.

Такое разделение позволяет лучше понять иерархию и взаимосвязь различных компонентов системы, а также облегчает проектирование, обслуживание и модернизацию комплекса.

1.2. Проблема заивания вытяжных каналов тепловых рекуператоров в системах вентиляции

Системы вентиляции применяются для обеспечения оптимальных параметров микроклимата в помещениях различного назначения. Их развитие связано с совершенствованием методик расчёта, внедрением принудительных схем вентиляции, автоматизацией процессов и ростом требований к энергоэффективности. Современные общеобменные системы вентиляции проектируются с использованием вентиляторов, нагревателей (водяных или электрических калориферов) [18, 19], клапанов, фильтров, средств защиты и систем контроля параметров [20, 21], а также других функциональных элементов [14, 16, 17].

В условиях повышения требований к рациональному использованию энергетических ресурсов в системах вентиляции применяются различные типы

рекуператоров [22, 23, 24], включая тепловые воздушные устройства, используемые в системах вентиляции и рециркуляции воздуха. Тепловые рекуператоры предназначены для подогрева приточного воздуха за счёт тепла вытяжного воздуха [25].

Конструктивные и принципиальные различия рекуператоров определяют существование нескольких типов подобных устройств. В рамках существующей работы, был проведен анализ известных решений на рынке, для применения в текущем проекте. Для обозначения температуры потоков в процессе рекуперации выбраны следующие переменные (Таблица 1.1):

Таблица 1.1 – Обозначение температуры потоков воздуха в рекуператорах

Переменная	Назначение параметра
T_{out}	Температура приточного воздуха до рекуператора
T_{inp}	Температура приточного воздуха после рекуператора
T_{room}	Температура вытяжного воздуха до рекуператора
T_{frost}	Температура вытяжного воздуха после рекуператора

Пластинчатый рекуператор состоит из набора теплопроводных пластин, образующих пересекающиеся каналы для приточного и вытяжного воздуха. При этом воздушные потоки не смешиваются (Рисунок 1.5). Пластины изготавливаются из алюминия, пластика, нержавеющей стали или бумаги [55, 56].

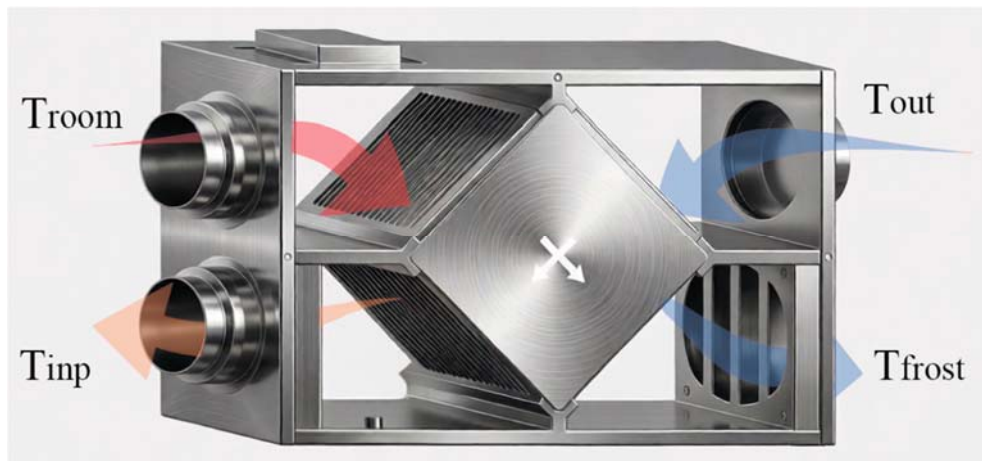


Рисунок 1.5 – Пластинчатый рекуператор

Роторный рекуператор включает вращающийся теплообменник, через который проходят потоки приточного и вытяжного воздуха. В процессе работы происходит частичное смешивание потоков (Рисунок 1.6) [57, 58].

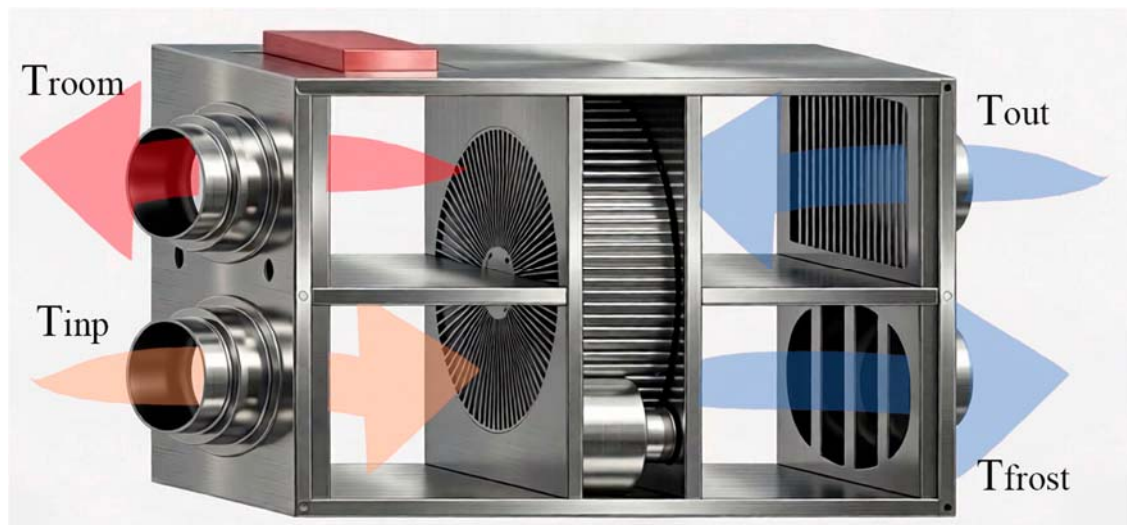


Рисунок 1.6 – Ротормый рекуператор

Рекуператор с тепловыми трубками состоит из герметично закрытых медных трубок с рёбрами, заполненных легкокипящим хладоном. В вытяжной части хладон нагревается, закипает и испаряется, а в приточной части конденсируется (Рисунок 1.7) [59, 60].

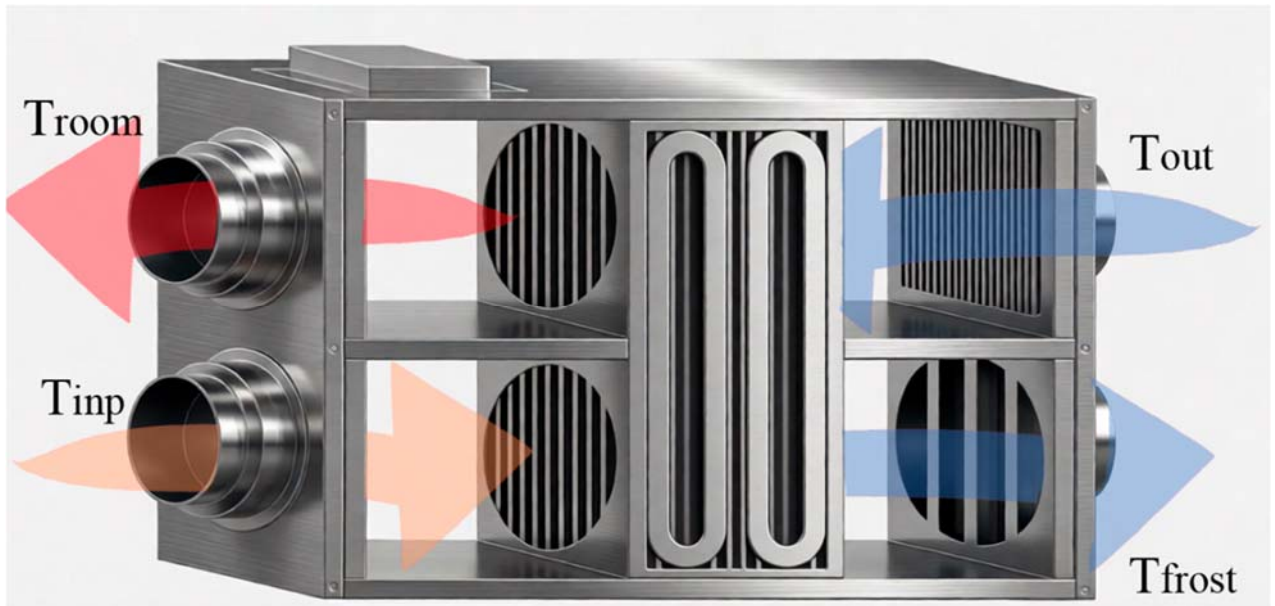


Рисунок 1.7 – Рекуператор с тепловыми трубками

Среди перечисленных типов рекуператоров на практике широкое применение получили системы с промежуточным теплоносителем, что обусловлено возможностью пространственного разделения приточного и вытяжного каналов, а также отсутствием смешивания воздушных потоков. В связи с этим в настоящем исследовании в качестве объекта рассмотрения выбрана система рекуперации воздуха с использованием промежуточного теплоносителя.

В рамках настоящего исследования рассматриваются системы рекуперации воздуха с использованием промежуточного теплоносителя. Установка включает два теплообменника, размещённые в приточной и вытяжной частях системы и соединённые трубопроводом. В трубопроводе циркулирует теплоноситель, представленный водой или водным гликолевым раствором. Циркуляция обеспечивается насосом. Теплоноситель,

подогреваемый вытяжным воздухом, перемещается по трубопроводу и передаёт тепло приточному воздуху (Рисунок 1.8) [163, 26].

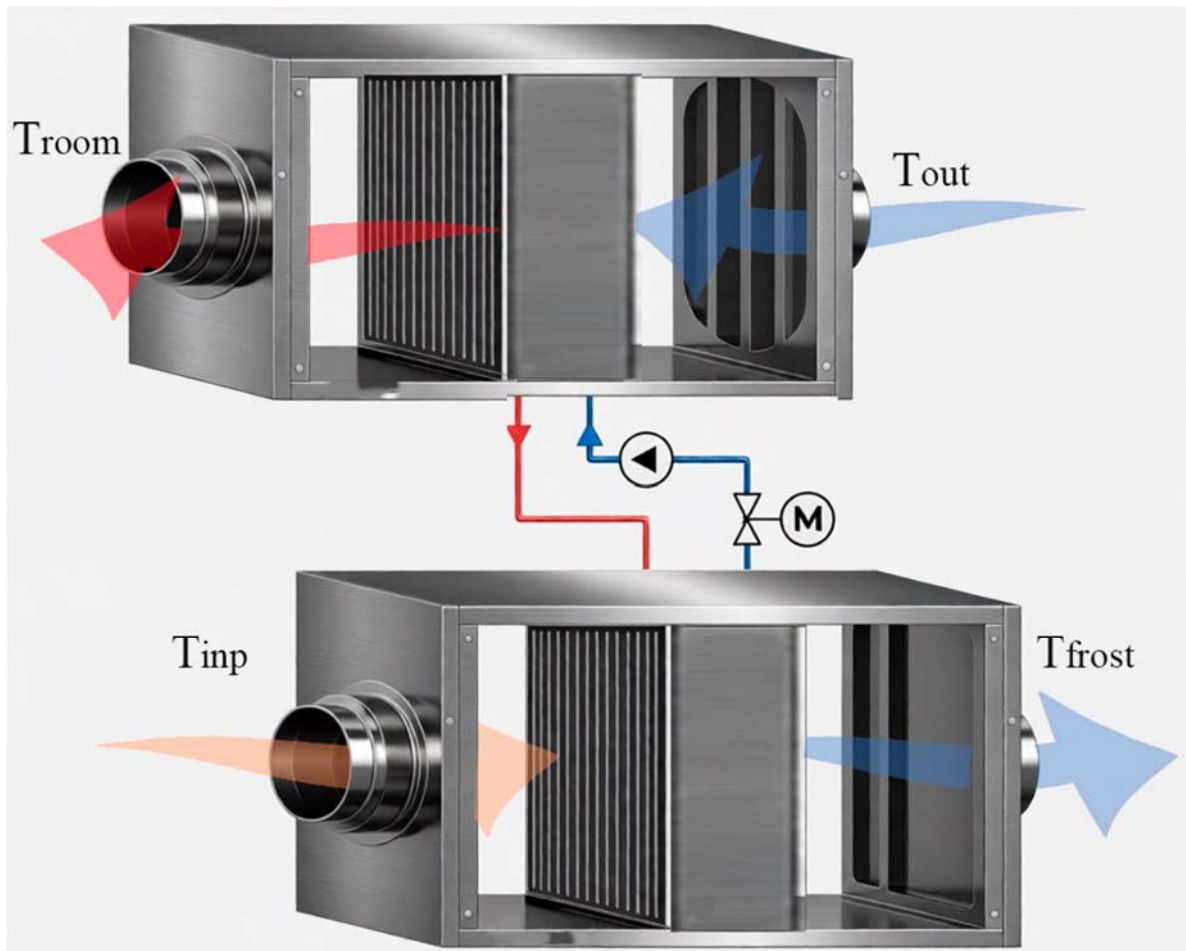


Рисунок 1.8 – Рекуператор с промежуточным теплоносителем

Рекуператоры с промежуточным теплоносителем обеспечивают возможность рекуперации при пространственном разделении приточного и вытяжного каналов и отсутствие смешивания воздушных потоков.

Итоговая сводная таблица с характеристиками рекуператоров представлена в таблице ниже (Таблица 1.2)

Таблица 1.2 – Сравнительная характеристика типов рекуператоров

Тип	Достоинства	Недостатки
Пластинчатый	<ul style="list-style-type: none"> – Простая конструкция, отсутствие движущихся частей – Бесшумная работа, низкая стоимость – Нет затрат на электроэнергию – КПД 40–70% 	<ul style="list-style-type: none"> – Обледенение конденсата при низких температурах (требуется байпас, предподогрев или гигроскопические пластины) – Жёсткая конструкция, невозможность разнесения узлов – Повышенное аэродинамическое сопротивление
Роторный	<ul style="list-style-type: none"> – Высокий КПД (60–90%) – Регулирование эффективности изменением скорости вращения – Частичный возврат влаги (может заменить увлажнитель) – Отсутствие обмерзания 	<ul style="list-style-type: none"> – Частичное смешивание потоков (не объекты с жёсткими требованиями к чистоте) – Наличие вращающихся деталей, снижение срока службы и сложность обслуживания – Потребление электроэнергии на привод
Фреоновый (тепловые трубки)	<ul style="list-style-type: none"> – Высокий КПД (до 80%) – Отсутствие подвижных деталей → низкий уровень шума – Компактность, отсутствие затрат на электроэнергию 	<ul style="list-style-type: none"> – Самый дорогой вариант из всех типов – Максимальная эффективность достигается только в низком температурном диапазоне
С промежуточным теплоносит. (гликолевый)	<ul style="list-style-type: none"> – Возможность разнесения теплообменников – Гибкая система регулирования – Полная герметичность, отсутствие смешивания потоков – Возможность работы с несколькими сетями одновременно – Использование антифриза для работы при сильных морозах 	<ul style="list-style-type: none"> – Низкий КПД (около 50%) из-за потерь в промежуточном контуре и инерционности – Требуется подача электроэнергии на насос – Более высокая металлоёмкость и стоимость системы

Годовая эффективность подобных установок рассчитывается в работе [60]

по выражению

$$Q_{\text{потерь}} = G \cdot t_{\text{отоп.пер}} \cdot c \cdot \Delta t \cdot \rho \cdot 238 \cdot 10^{-9} \cdot \eta, \quad (1.1)$$

где $Q_{\text{потерь}}$ – количество потерь, выбрасываемого через воздух, на улицу установкой, Гкал/год; G – производительность вентилятора, м³/час; $t_{\text{отоп.пер}}$ – время работы установки в течение отопительного сезона, ч; Δt – разница температур между удаляемым и наружным воздухом (среднее за отопительный сезон), °С; ρ – плотность воздуха, кг/м³; η – эффективность рекуператора; c – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К).

Таблица 1.3 – Принятые условные данные для расчёта

Параметр	Обозн.	Значение	Примечание
Расход воздуха	G	10 000 м ³ /ч	Характерно для промышленного комплекса осушки пиломатериалов
Длительность отопительного периода	$t_{\text{отоп.пер}}$	5 000 ч/год	Условно для средней полосы (≈ 7 месяцев)
Теплоёмкость воздуха	c	1,005 кДж/(кг·К)	Постоянная
Плотность воздуха	ρ	1,2 кг/м ³	При нормальных условиях
Разность температур	Δt	30 °С	Условно (например, –15 °С на улице, +15 °С в помещении)
Коэффициент потерь	η	Зависит от типа рекуператора	Отражает долю неиспользованного тепла (1 – КПД)

Таблица 1.4 – Годовая эффективность рекуператоров (количество сохранённого тепла)

Тип рекуператора	КПД, %	Коэффициент потерь η	Тепловые потери за год $Q_{\text{потерь}}$, Гкал/год	Сохранённое тепло $Q_{\text{сохр}}$, Гкал/год
Без рекуперации	0%	1,00	430	0
Пластинчатый	55% (средний)	0,45	194	236
Роторный	75% (средний)	0,25	108	322
Фреоновый (тепловые трубки)	70%	0,30	129	301
С промежуточным теплоносителем	50%	0,50	215	215

Расчёт тепловых потерь (Гкал/год) выполнен по формуле (1.1):

$$Q_{\text{потерь}} = 10000 \cdot 5000 \cdot 1,005 \cdot 30 \cdot 1,2 \cdot 238 \cdot 10^{-9} \cdot \eta = 430 \cdot \eta \text{ (Гкал/год)}$$

Сохранённое тепло:

$$Q_{\text{сохр}} = 430 - Q_{\text{потерь}} = 430 \cdot (1 - \eta) = 430 \cdot \text{КПД}$$

Базовый уровень (без рекуперации) принят как 430 Гкал/год тепловых потерь.

Для каждого типа рекуператора, сохраненное тепло представлено в таблице ниже (Таблица 1.5)

Таблица 1.5 – Эффективность рекуператоров в Гкал/год

Тип рекуператора	Сохранённое тепло, Гкал/год
Роторный	322
Фреоновый	301
Пластинчатый	236
С промежуточным теплоносителем	215

Контур рекуператора с промежуточным теплоносителем в составе общеобменной системы вентиляции приведён на Рисунок 1.9. В контуре размещены температурные датчики ТЕ, предназначенные для анализа работы установки.

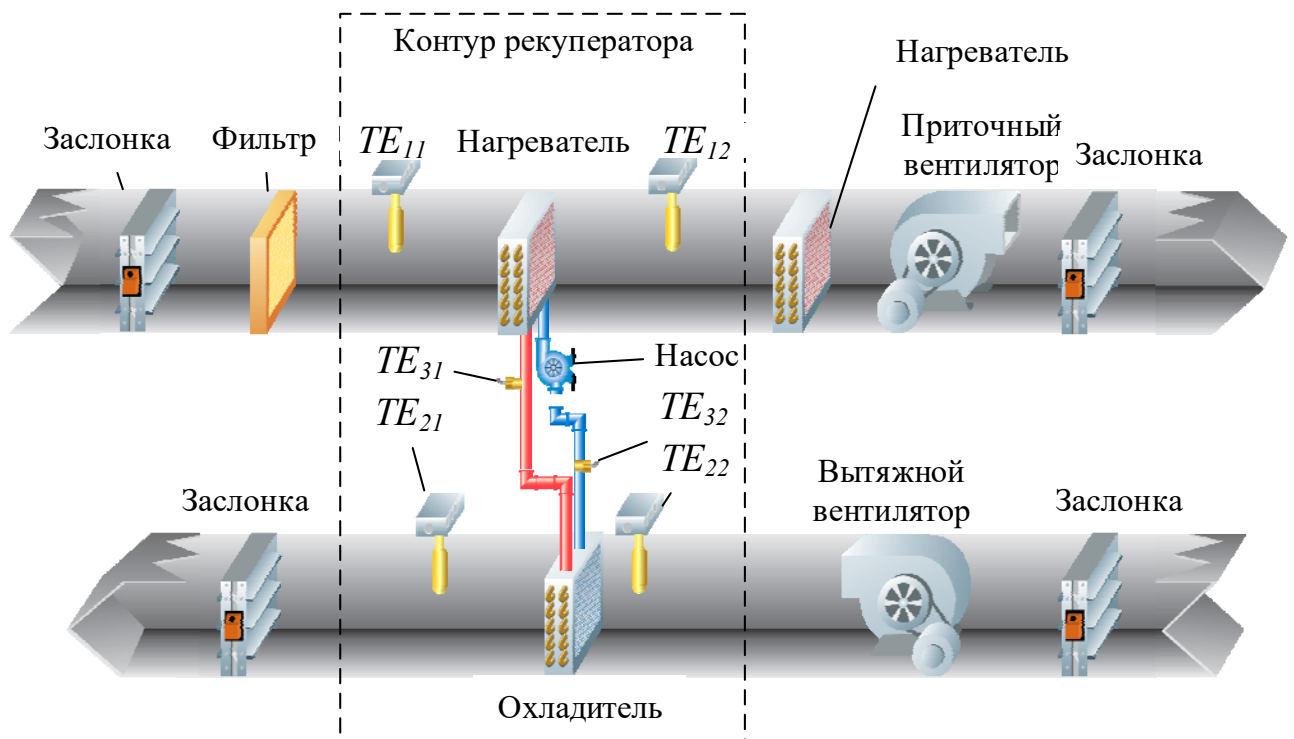


Рисунок 1.9 – Контур рекуператора в составе системы общеобменной
ВЕНТИЛЯЦИИ

Назначение датчиков:

- TE_{11} – датчик температуры приточного воздуха до рекуператора;
- TE_{12} – датчик температуры приточного воздуха после рекуператора;
- TE_{21} – датчик температуры вытяжного воздуха до рекуператора;
- TE_{22} – датчик температуры вытяжного воздуха после рекуператора;
- TE_{31} – датчик температуры прямого теплоносителя в контуре рекуператора;
- TE_{32} – датчик температуры обратного теплоносителя в контуре рекуператора.

Для последующего анализа каждому датчику присвоена переменная (Таблица 1.6).

Таблица 1.6 – Присвоенные переменные для измеряемых параметров (датчиков) в системе рекуперации

Датчик	Переменная	Назначение параметра
TE_{11}	T_{out}	Температура приточного воздуха до рекуператора
TE_{12}	T_{inp}	Температура приточного воздуха после рекуператора
TE_{21}	T_{room}	Температура вытяжного воздуха до рекуператора
TE_{22}	T_{frost}	Температура вытяжного воздуха после рекуператора
TE_{31}	T_{front}	Температура прямого теплоносителя в контуре рекуператора
TE_{32}	$T_{reverse}$	Температура обратного теплоносителя в контуре рекуператора

Рекуператоры с промежуточным теплоносителем непосредственным образом осуществляют перенос только явного тепла. И для подобных установок можно применить формулу коэффициента эффективности [27]:

$$\eta = \frac{T_{inp} - T_{out}}{T_{room} - T_{out}}. \quad (1.2)$$

Экономическую выгоду использования рекуператора можно высчитать по следующим формулам:

$$\Delta W = T_{год} \cdot N_{сущ} - T_{год} \cdot N_{нов}, \quad (1.3)$$

где ΔW – годовая экономия, кВт·ч; $T_{год}$ – время работы установки в течение года, ч; $N_{сущ}$ – электрическая мощность существующей установки, Вт; $N_{нов}$ – электрическая мощность установки с рекуператором, Вт.

Годовая экономия, руб/год:

$$\Delta \mathcal{E} = T_{тэ} \cdot Q_{потерь} - T_{ээ} \cdot \Delta W, \quad (1.4)$$

где $\Delta \mathcal{E}$ – годовая экономия, руб/год; $T_{тэ}$ – тариф на тепловую энергию, руб/Гкал; $T_{ээ}$ – тариф на электрическую энергию, руб/Гкал.

Приведённые выражения позволяют оценивать энергетическую и экономическую эффективность рекуператоров в установившихся режимах работы. Однако при эксплуатации установок в реальных условиях на эффективность рекуперации и надёжность работы системы оказывают влияние переходные и нештатные режимы, а также внешние климатические факторы.

Таблица 1.7 – Годовая выгода при использовании рекуператора с промежуточным теплоносителем

Показатель	Значение
Годовая экономия	376 500 руб/год
Сохранённое тепло	215 Гкал/год
Экономия электроэнергии	32,2 Гкал/год (37 500 кВт·ч)
Технологические преимущества	Разнесение узлов, гибкость регулирования, отсутствие смешивания, работа зимой

При КПД = 50% рекуператор с промежуточным теплоносителем обеспечивает:

- Годовую экономию 376 500 руб/год, что подтверждает его экономическую целесообразность;
- Снижение тепловых потерь на 215 Гкал/год по сравнению с системой без рекуперации;
- Сокращение потребления электроэнергии на 37 500 кВт·ч/год.

Для комплекса сушки пиломатериалов данный тип рекуператора остаётся предпочтительным, так как технологические преимущества (разнесение приточного и вытяжного теплообменников, гибкое регулирование под этапы сушки, отсутствие перетока загрязнений, стабильная работа зимой) перекрывают разницу в энергоэффективности по сравнению с роторным рекуператором.

Эксплуатация рекуперативных систем связана с особенностями запуска и выхода в штатный режим работы, включая последовательность включения

вентиляторов, открывание заслонок и прогрев калорифера [28–29], а также с реакцией системы на нештатные ситуации: пожар [30, 31], засорение фильтра [32], выход из строя вентиляторов и низкую температуру на калорифере [34].

В холодное время года при отрицательных температурах наружного воздуха эксплуатация рекуператоров сопровождается риском образования наледи на вытяжном канале [31, 32]. При высокой эффективности рекуператора стенки теплообменника охлаждаются ниже точки замерзания. При наличии влажного вытяжного воздуха происходит образование конденсата, который замерзает и образует иней. Образовавшаяся наледь препятствует прохождению вытяжного потока и может привести к прекращению работы системы.

Указанная проблема характерна для объектов, на которых обрабатываются большие объёмы влажного воздуха, включая автомобильные мойки, бассейны, системы осушения материалов и предприятия пищевой промышленности. Актуальность проблемы для подобных технологических процессов отмечена в ряде работ, например [9].

Проблема обмерзания рекуператоров оказывает влияние на циркуляцию воздушных потоков, теплопередачу и нагрузку на вентиляторы. В связи с этим данной тематике посвящён ряд исследований, опубликованных в источниках [7, 8, 10, 11].

Указанные особенности эксплуатации обуславливают необходимость анализа методов защиты рекуператоров от обмерзания в условиях отрицательных температур наружного воздуха. В литературе предложен ряд

технических решений, направленных на устранение инеевых наростов и обеспечение работоспособности установок.

Целью настоящего раздела является анализ существующих решений и их адаптация применительно к исследуемой задаче.

Для поиска решений использовался метод выделения ключевых слов, включая «вентиляция», «иней», «рекуперация».

Один из методов устранения инея основан на использовании нагревательных элементов, интегрированных в вентиляционные каналы. При превышении допустимого уровня инея активируются нагревательные элементы [4].

Указанный метод не используется в рамках настоящей работы по следующим причинам:

- необходимость разработки и внедрения схемы релейно-контакторной защиты и управления;
- инерционность металлических нитей накаливания и необходимость дополнительной защиты от перегрева;
- увеличение энергопотребления;
- конструктивные ограничения вентиляционных систем.

Другой метод основан на использовании теплообменника-утилизатора с перекрёстно-точными каналами [38], который предотвращает образование инея за счёт поворота на 180°. Степень обмерзания определяется по сигналам температурных датчиков или датчика перепада давления. Недостатком метода

является необходимость дополнительной конструкции для вращения теплообменника.

В патенте [39] описан способ разморозки канала путём нагрева антифриза, требующий внедрения водяного нагревателя в существующую установку.

В работе [8] предложено снижение эффективности рекуператора путём уменьшения скорости циркуляции теплоносителя или остановки насоса. При этом эффективность рекуператора снижается до уровня, при котором температура поверхности теплообменника соответствует температуре точки росы вытяжного воздуха, что позволяет предотвратить дальнейшее образование конденсата и сохранить максимально возможную эффективность установки. В этом режиме тепло, не поглощённое теплообменником вследствие снижения эффективности, используется для таяния инея.

В качестве теплоносителя рекомендуется применять раствор дистиллированной воды и пропиленгликоля, поскольку замерзание воды может привести к выходу системы из строя. Пропиленгликоль безопасен при утечке и используется в установках пищевой и фармацевтической промышленности, а также в жилых помещениях [44, 45]. Температура замерзания раствора зависит от концентрации пропиленгликоля. На практике применяются растворы концентрацией 30–50 %. Согласно проекту, на объекте используется 44 % раствор.

В работе рассмотрены основные типы рекуператоров, используемых в системах вентиляции, и приведена схема рекуператора с промежуточным

теплоносителем, применяемого в настоящем исследовании. Проанализированы вопросы эффективности и экономической целесообразности рекуперации тепла, а также особенности эксплуатации установок в условиях отрицательных температур наружного воздуха. Показано, что образование наледи на вытяжном канале является характерной эксплуатационной проблемой для систем рекуперации при работе с влажным воздухом. Рассмотрены основные подходы к устранению инеевых наростов и выявлены их ограничения. Полученные выводы используются в дальнейшем для обоснования выбранного метода защиты рекуператора от обмерзания и построения алгоритмов управления установкой.

1.3. Определение признаков заиневаания вытяжного канала рекуперации воздуха

Для предоставления комплексного решения по проблеме обледенения вытяжного калорифера необходимо прежде всего рассмотреть причины образования инея, учитывая, что оборудование часто расположено в труднодоступных местах и скрыто от технического персонала. Своевременное обнаружение проблемы позволит предотвратить возникновение нештатных ситуаций.

Один из возможных вариантов решения – установка датчика влажности и температуры для определения точки росы, при которой происходит образование конденсата [46]. Однако при применении данного подхода, может

привести трудностям, так как датчик будет работать в агрессивной среде, что может привести к его быстрому выходу из строя.

Другим возможным решением может стать установка аналогового датчика давления или датчика контроля потока воздуха [47] на выходе вытяжного теплообменника рекуператора. При образовании инея в канале скорость потока и давление на выходе снизятся, что позволит определить наличие проблемы. Предложенное решение может оказаться недостаточно эффективным в рамках данного контекста, учитывая возможность возникновения проблемы в другой зоне вентиляционной системы, что в свою очередь отразится на итоговых показателях.

Кроме того, существует метод, который часто используется для мониторинга засорения фильтров или корректной работы вентиляторов [48], – это установка дифференциальных реле давления. Этот подход позволяет контролировать давление до и после установки. При образовании инея возникает разница в давлении, определенная величина этой разницы может служить сигналом для запуска системы разморозки.

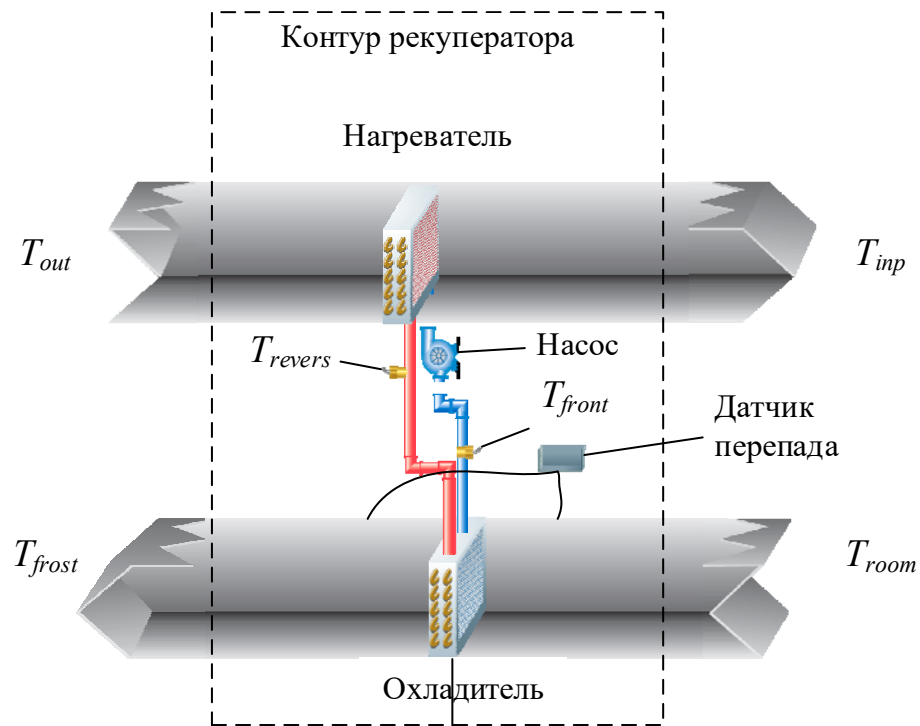


Рисунок 1.10 – Датчик дифференциального давления

Из-за особенностей вентиляционной установки и близкого расположения различных источников помех следует обратить внимание на наличие помех, которые могут вызвать случайные включения.

1.4. Контроль технологических параметров в системах сушки пиломатериалов

В процессе сушки, описанном ранее, качество конечного продукта прямо зависит от соблюдения технологических параметров. Для обеспечения их соблюдения требуется контроль таких параметров, как температура, влажность, состояние воздушных клапанов и циркулирующих вентиляторов [95, 96]. Контроль температуры осуществляется с помощью надежного и устойчивого к агрессивной среде резистивного датчика. Определение остальных параметров осуществляется с использованием измерительных

средств, таких как канальный датчик влажности, реле перепада давления и концевые выключатели.

Первоначальным решением было использование канальных датчиков влажности типа DHT22 [52].

Датчики такого типа подвержены воздействию агрессивной среды и часто выходят из строя из-за присутствия большого количества мелких древесных частиц и пыли, а также высокой влажности (Рисунок 1.11). Среда, в которой происходит процесс осушения, является весьма агрессивной, из-за чего изначально установленный резистивный датчик влажности после 1–2 циклов сушки становится непригодным для использования.



а – датчик температуры и влажности



б – датчик температуры и влажности после 1-2 циклов сушки

Рисунок 1.11 – Вышедшие из строя канальные датчики влажности

В результате принято решение использовать психрометр [53, 102, 103] с электронными датчиками температуры с характеристикой РТ1000 [61]. Здесь основная измерительная часть – это два датчика температуры (см. Рисунок 1.2), один из которых помещен в условия максимальной влажности («мокрый» датчик (6), другой (7), соответственно, «сухой»). Данное решение позволит

использовать психрометрическую зависимость для определения текущей влажности [12, 2]. Датчики температуры имеют защитный металлический кожух [54]. Это позволяет использовать их в различных агрессивных средах.

Датчики РТ1000 [97, 98] широко используются в системах автоматизации. Они основаны на платиновом элементе, который при изменении температуры изменяет своё сопротивление, то есть относится к резистивному типу. При температуре 0 °С сопротивление элемента составляет 1000 Ом. В отличие от датчиков с меньшим сопротивлением (например, РТ100), этот тип датчиков менее подвержен влиянию сопротивления длины линии, что позволяет использовать схему подключения без дополнительного источника питания. В отличие от других типов датчиков, этот тип датчиков имеет лучшие показатели наработки на отказ [99, 100]. Характеристика РТ1000 имеет линейный вид (Таблица 1.8).

Таблица 1.8 – Характеристика датчика РТ1000

T	R	T	R	T	R	T	R	T	R
-50	803,063	0	1000	50	1193,971	100	1385,055	150	1573,251
-45	822,902	5	1019,527	55	1213,210	105	1404,005	155	1591,912
-40	842,707	10	1039,025	60	1232,419	110	1422,925	160	1610,544
-35	862,478	15	1058,495	65	1251,600	115	1441,817	165	1629,147
-30	882,217	20	1077,935	70	1270,751	120	1460,680	170	1647,721
-25	901,923	25	1097,347	75	1289,874	125	1479,514	175	1666,267
-20	921,599	30	1116,729	80	1308,968	130	1498,319	180	1684,783
-15	941,244	35	1136,083	85	1328,033	135	1517,096	185	1703,271
-10	960,859	40	1155,408	90	1347,069	140	1535,843	190	1721,729
-5	980,444	45	1174,704	95	1366,077	145	1554,562	195	1740,159

Примечание: T – температура среды датчика PT1000, °C; R – сопротивление датчика PT1000, Ом.

Помимо упомянутых выше компонентов, в системе присутствует силовой шкаф (8), оснащенный электрической и тепловой защитой, а также элементами силового управления для двигателей вентиляторов, насосов и приводов. Шкаф управления (9) содержит элементы электронного управления и сбора данных. Автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора (10) также располагается в техническом помещении сушильного комплекса.

Предложено внедрить в систему тепловой калорифер, состоящий из приточного (12) и вытяжного (13) калориферов, установленных перед входной и выходной заслонками (5), циркуляционного насоса (14) с частотным преобразователем (15), реле перепада давления (16) для контроля заиневаания вытяжного калорифера (13) и датчиков температуры теплоносителя (17).

Целью организации АРМ является контроль технологических параметров и сбор архивных данных, что требует реализации функции диспетчеризации [1, 101], предоставляющей возможность мобильного доступа к системе.

Заключение к главе 1

В данной главе был проведен анализ задач, связанных с поддержанием работоспособности систем вентиляции в различных типах помещений при возникновении нештатных ситуаций. Особое внимание было уделено проблеме обледенения вытяжного канала при использовании теплового рекуператора. В холодное время года на теплообменнике конденсируется влага, которая затем

замерзает, что может привести к полной потере функциональности вентиляционной установки. Была проведена качественная оценка момента замерзания.

В работе предлагается метод выхода из нештатной ситуации путем поддержания температуры точки росы на вытяжной части рекуперативной установки. Планируется достичь этой температуры путем снижения эффективности теплообмена, достаточной для размораживания теплообменника. Предполагается, что данный способ позволит решить задачу с минимальными потерями тепловой энергии.

Также стоит задача контроля состояния исполнительных механизмов (вентиляторы, воздушные заслонки) в агрессивной среде. Стандартные датчики влажности выходят из строя после 1–2 циклов сушки из-за агрессивной среды внутри пространства комплекса осушения пиломатериалов. Поэтому контроль влажности производится при помощи электронного психрометра, состоящего из двух датчиков в металлическом кожухе, один из которых помещен в условия максимальной влажности. Предполагается, что состояние исполнительных механизмов влияет на психрометрическую разность температур в системе. Для этого в работе планируется применение различных исследовательских методов, таких как динамические характеристики, спектральные составы переходных процессов, корреляция и пр.

Задачи, рассмотренные в главе 1, являются актуальными и изучаются как отечественными, так и зарубежными учеными. Исследованием

рекуперативных установок в системах вентиляции занимались О.Я. Кокорин, Ю.М. Варфоломеев, Д.К. Ларкин. Проблему обледенения рекуператоров в своих работах рассматривали Е.Э. Баймачев, Н.А. Максимова, В.А. Гулевский. Работу камер осушения пиломатериалов изучали М.В. Хабаров, Е.С. Богданов, М. П. Дунаева, а также иностранные исследователи Н.У. Bai, P. Liu, M. Justo Alonso, H.M. Mathisen, M. Kassai и др.

По результатам главы выделены задачи для следующих разделов исследовательской работы.

Учитывая невозможность физического присутствия на исследуемом объекте, необходимо подготовить и настроить систему диспетчеризации для дистанционного наблюдения и регистрации переходных процессов. С целью более глубокого понимания структуры объекта в первой главе были определены компоненты автоматизированной системы нижнего, среднего и верхнего уровней, что позволит сформулировать достаточные требования к дистанционному мониторингу параметров.

При эксплуатации объекта могут возникнуть ситуации, при которых корректная оценка отдельных параметров окажется затруднительной. Например, при использовании датчиков дифференциального давления для количественного определения степени обледенения на показания влияют помехи, что приводит к случайным переходам в нештатный режим работы. В системах осушения пиломатериалов из-за наличия агрессивной среды возникает проблема с измерением влажности обычными датчиками и

определением состояния исполнительных механизмов. В связи с чем возникает потребность выбрать метод вычисления переменных состояния, недоступных для прямого измерения, по которым можно оценить возможность появления нештатной ситуации для каждого отдельного случая.

Разработана имитационная модель системы, позволяющая корректно отобразить процесс нарастания инея и показывающая влияние на другие переменные состояния внутри системы вентиляции с тепловым рекуператором.

Выбор аппаратной части для реализации алгоритма управления программируемого логического контроллера произведён на основе полученной модели с учётом подключённых датчиков и исполнительных устройств. Также принят во внимание уже имеющийся на объектах аппаратный комплекс средств, а объём проектной документации остался без изменений.

Выполнена аппаратная реализация проекта с отладкой связи, программных средств сбора и обработки данных. При этом применены современные средства связи отечественного производства. Произведены натурные испытания при штатном и нештатном режимах работы системы. Выполнена отладка алгоритмов работы и анализ полученных данных.

Во второй главе проведено математическое описание технологических процессов системы вентиляции с рекуператором и системы осушения пиломатериалов, а также выполнен синтез моделей систем управления данными объектами.

Выбрано направление исследования и последующей модернизации систем вентиляции программными средствами с минимальным изменением проектной документации. Это обусловлено тем, что объекты исследования уже введены в эксплуатацию и любое изменение проектной документации потребует значительных временных и финансовых затрат.

Данное направление представляет научную проблематику и в рамках инженерных задач решение может быть довольно сложным. Поэтому данная работа посвящена объектам подобного типа, где решение задач производится при помощи программных средств и предполагается минимальное изменение проектной и аппаратной частей.

В работе планируется рассмотреть методику модернизации объекта при помощи различных средств, направленных на подбор программного решения с минимальными затратами временных и финансовых ресурсов (в том числе с применением средств удаленного сбора данных, обследования объекта и пр.).

Глава 2. Математическое описание управляемых элементов комплекса осушения пиломатериалов

Описание, синтез и разработка систем управления для процессов теплообмена представляет собой сложный процесс. Синтез математической модели включает в себя детальный анализ объекта, определение переменных состояния, выведение дифференциальных уравнений и их решение. Адекватность полученной математической модели [104, 105] подтверждается, например, сравнением переходных процессов, полученных в результате экспериментов на действующем объекте управления. Итоговая модель может включать в себя теплообменные системы [56, 62], механические части, различные электромагнитные преобразователи и пр., что приводит к системе дифференциальных уравнений математической модели, которая может достигать достаточно высокого порядка [106–108].

На этапе синтеза алгоритмов регулятора для многомерных систем важно учитывать возможности схем измерения переменных состояния и число переменных, доступных измерению. Для использования современных методов подготовки регуляторов для объектов важно обеспечить наблюдаемость всех переменных состояния математической модели. Построение наблюдателей требует высокой квалификации разработчика в области современной теории автоматического управления [66, 67] и достаточного опыта в создании алгоритмов управления на программируемых логических контроллерах (ПЛК).

Процедура разработки программного обеспечения должна включать некоторые исследования, позволяющие объединить результаты научных и теоретических исследований с алгоритмами, пригодными к реализации на ПЛК [109–111]. К сожалению, сложно найти обобщенную методологию реализации современных решений на действующих объектах, в результате достаточно большое количество теоретических решений остаются недоступными для реализации.

Тем не менее может быть весьма полезна методология на примере решения частной задачи. Основные подходы к решению поставленных проблем во многом могут совпадать с другими задачами и оказаться полезными. В работе предлагается методология решения научной и практической задачи на примере объекта управления рекуперацией в системах вентиляции.

Для представления объекта следует произвести корректное математическое описание элементов и системы управления.

2.1. Синтез математической модели

Отображение процессов теплопереноса математическими средствами сопряжено со значительным усложнением модели, обусловленным необходимостью учета многочисленных теоретических элементов [64]. В контексте задачи управления рекуператором данное описание может быть существенно упрощено: динамика процесса адекватно описывается дифференциальным уравнением второго или третьего порядка. Для решения подобной управленческой задачи применимы методологические подходы,

разработанные при создании математической модели теплообменного контура системы отопления [65]. В указанном исследовании представлена модель теплообменной системы (ТОС), функциональное назначение которой заключается в поддержании заданной температуры в контуре горячего водоснабжения (ГВС) [65].

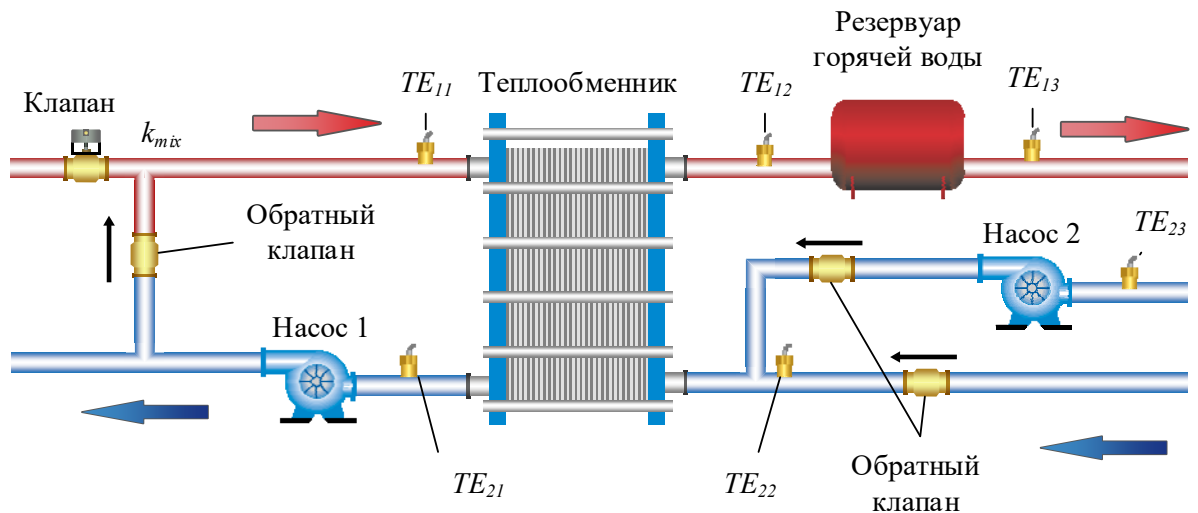


Рисунок 2.1 – Функциональная схема системы ГВС

Выделены следующие технологические переменные для описания работы теплового рекуператора вентиляционной системы (Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Переменные параметров (датчиков) в системе ГВС

Датчик	Переменная	Назначение параметра
TE_{11}	$t_{пд1}$	Температура прямой воды до теплообменника
TE_{12}	$t_{пд2}$	Температура прямой воды после теплообменника
TE_{13}	$t_{пд3}$	Температура прямой воды из резервуара горячей воды
TE_{21}	$t_{об1}$	Температура обратной воды до теплообменника
TE_{22}	$t_{об2}$	Температура воды из системы ХВС
TE_{23}	$t_{об3}$	Температура воды из системы ГВС
	$K_{см}$	Коэффициент смешения

Установка подогрева системы ГВС представляет собой два жидкостных контура (внутренний и внешний), в состав которых входят теплообменный аппарат, циркуляционные насосы, регулирующий клапан, электрический исполнительный механизм постоянной скорости, датчики температуры и микропроцессорный регулятор (МР), резервуар горячей воды.

На основе работы обозначенных основных узлов системы ГВС были определены переменные и синтезирована математическая модель, представленная в форме Коши:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dK_{\text{см}}(\tau)}{d\tau} = [k_{\text{max}} - K_{\text{см}}(\tau)] \frac{k_h}{T_{\text{пр}}} u(\tau); \\ \frac{dt_{\text{пд1}}(\tau)}{d\tau} = \frac{[t_1 - t_{\text{об1}}(\tau)]K_{\text{см}}(\tau) + t_{\text{об1}}(\tau) - t_{\text{пд1}}(\tau)}{T_{\text{см}}}; \\ \frac{dt_{\text{пд2}}(\tau)}{d\tau} = \frac{k_t t_{\text{пд1}}(\tau) + (1 - k_t)t_{\text{об2}}(\tau) - t_{\text{пд2}}(\tau)}{T_T}; \\ \frac{dt_{\text{об1}}(\tau)}{d\tau} = \frac{k_t t_{\text{об2}}(\tau) + (1 - k_t)t_{\text{пд1}}(\tau) - t_{\text{об1}}(\tau)}{T_T}; \\ \frac{dt_{\text{пд3}}(\tau)}{d\tau} = \frac{t_{\text{пд2}}(\tau) - t_{\text{пд3}}(\tau)}{T_{\text{бк}}}; \\ \forall i = 1 \dots n \rightarrow \\ \rightarrow \left\{ \forall i = 1 \dots m \rightarrow \left[\frac{dt_{\text{обz}(i,j)}(\tau)}{d\tau} = \frac{dt_{\text{обz}(i,j-1)}(\tau) - dt_{\text{обz}(i,j)}(\tau)}{T_{\text{бк}}} \right] \right\}; \end{array} \right. \quad (2.1)$$

$$\forall i = 1 \dots n \rightarrow dt_{\text{обz}(i,0)}(\tau) = (1 - k_{\text{ост}})t_{\text{пд3}}(\tau) + k_{\text{ост}}t_{\text{ком}};$$

$$t_{\text{об}}(\tau) = \left(\sum_{i=1}^n k_{zi} \right) t_{\text{обz}(i,0)};$$

$$\sum_{i=1}^n k_{zi} = 1,$$

где τ – текущее время; h – высота перемещения штока клапана; $K_{см}(\tau)$ – коэффициент перемешивания теплоносителей во внешнем контуре в узле смешения; k_{max} , k_h – коэффициенты, характеризующие нелинейные свойства процесса смешения; $T_{пр}$ – время полного хода привода исполнительного механизма от 0 до 100 %; $u(\tau)$ – управляющее воздействие электроприводом клапана, принимающее одно из дискретных значений; $t_{пд1}(\tau)$ – температура теплоносителя на входе ТОС во внешнем контуре; t_1 – температура теплоносителя, поступающего из магистральной сети; $T_{см}$ – постоянная времени смешения на клапане; T_T – постоянная времени в теплообменнике; $T_{бк}$ – постоянная времени в промежуточном накопителе; $T_{х.в}$ – постоянная времени в узле ввода холодной воды; $t_{об}$ – температура обратного теплоносителя на выходе внешнего контура ТОС; $t_{пд2}$ – температура теплоносителя на выходе внутреннего контура ТОС; $t_{об2}$ – температура обратного теплоносителя на входе внутреннего контура ТОС; k_T – коэффициент эффективности теплообменника; $t_{пд3}$ – температура теплоносителя на выходе промежуточного накопителя, расположенного во внутреннем контуре; $t_{об3}$ – температура обратного теплоносителя перед узлом смешения с холодной водой; $\tau_{z(i)}$ – время транспортного запаздывания теплоносителя в i -м вторичном контуре (i -м стояке-ответвителе); $t_{обz(i,j)}$ – эквивалентная температура обратного теплоносителя в инерционных звеньях, используемых для аппроксимации транспортного запаздывания; $k_{х.в}$ – коэффициент влияния холодной воды на теплоноситель во внутреннем контуре; $k_{ост}$ – коэффициент остывания

теплоносителя во внутреннем контуре; n – количество вторичных контуров (стояков-ответвителей) ТОС; m – количество инерционных звеньев, аппроксимирующих транспортное запаздывание; $t_{\text{ком}}$ – комнатная температура.

Описанная выше модель системы ГВС может служить основой для построения математической модели в тепловой рекуперативной системе. Выше рассмотрена упрощенная структурная схема (Рисунок 1.9), которая описывает только процесс теплообмена в системе рекуперации (Рисунок 2.2).

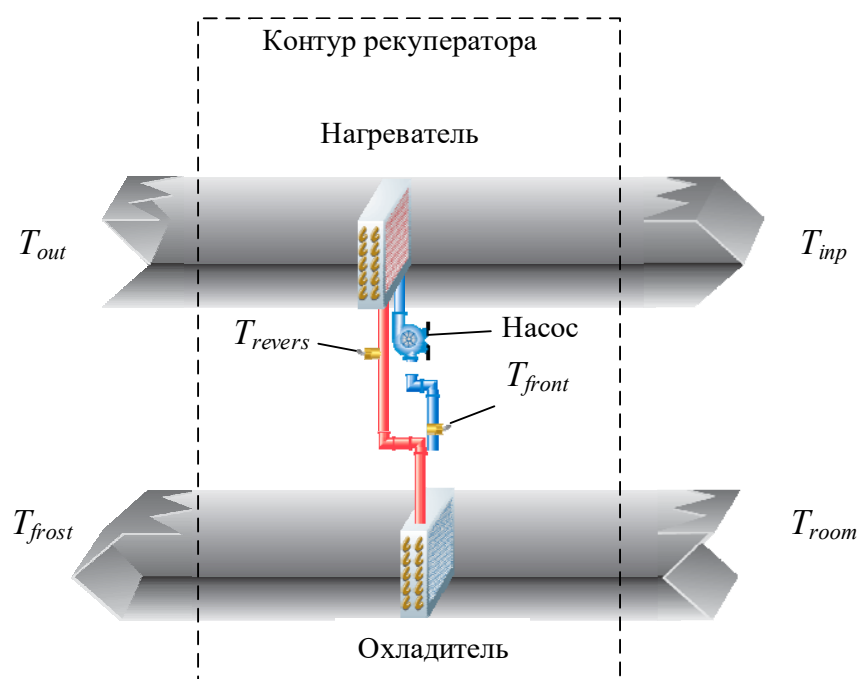


Рисунок 2.2 – Контур рекуперации в системе приточно-вытяжной вентиляции

На рисунке присутствуют следующие переменные состояния математической модели: t_{out} – температура внешнего воздуха, поступающего в систему; t_{inp} – температура поступающего в помещение воздуха; t_{room} – температура из помещения; t_{frost} – температура выходящего воздуха; t_{front} – температура остывшего (прямого) теплоносителя; t_{rev} – температура нагретого (обратного) теплоносителя.

В отличие от модели, представленной авторами рассмотренной работы (Рисунок 2.1), где обозначен один теплообменник, в текущей системе рекуперации (Рисунок 2.2) описываются два теплообменника. Используя имеющуюся методологию, можно получить дифференциальное уравнение значения температуры выходящего воздуха с управляющим сигналом на преобразователе частоты привода (2.2). При этом для описания были сделаны следующие допущения: температура наружного воздуха t_{out} и температура из помещения t_{room} имеют постоянную величину. В результате модель системы может быть описана следующими дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned}
 \frac{dt_{inp}(\tau)}{d\tau} &= \frac{t_{rev}(\tau) \cdot k_{t1} + (1 - k_{t1}) \cdot t_{out} - t_{inp}(\tau)}{T_{T1}} \\
 \frac{dt_{frost}(\tau)}{d\tau} &= \frac{t_{frost}(\tau) \cdot k_{t2} + (1 - k_{t2}) \cdot t_{room} - t_{frost}(\tau)}{T_{T2}} \\
 \frac{dt_{frost}(\tau)}{d\tau} &= \frac{t_{out} \cdot k_{t1} + (1 - k_{t1}) \cdot t_{rev}(\tau) - t_{frost}(\tau)}{T_{T1}} \\
 \frac{dt_{rev}(\tau)}{d\tau} &= \frac{t_{room} \cdot k_{t2} + (1 - k_{t2}) \cdot t_{frost}(\tau) - t_{rev}(\tau)}{T_{T2}}
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

где T_1 – теплообменник 1; T_2 – теплообменник 2; T_{T1} – постоянная времени первого теплообменника; T_{T2} – постоянная времени второго теплообменника; k_{t1} – коэффициенты эффективности первого теплообменника; k_{t2} – коэффициенты эффективности второго теплообменника.

На основании известного исследования [64] сформирована математическая модель теплообменных процессов. В отличие от модели, описанной в [65], состоящей из теплообменников, передающих тепловую

энергию между двумя жидкостными средами, в модели, описанной в данной работе, рассматриваются два теплообменника, обменивающиеся теплом между жидкой средой и воздухом.

Температура выходящего из рекуператора воздуха зависит от коэффициента теплообмена Π_2 . При наилучших показателях коэффициента теплообмена в системе температура будет минимальной. Это свидетельствует о хорошем теплосъеме на теплообменнике рекуператора в вытяжной части системы, а соответственно, и КПД [9]. С ухудшением показателя эффективности температура на выходе растет. Величина данной температуры также зависит от температуры внешнего воздуха.

В силу отсутствия качественного описания физических принципов теплообмена внутри контура рекуператора потребовалось выполнить эксперимент на подобной системе с целью определения оценки зависимости коэффициента теплообмена от скорости вращения двигателя. По результатам эксперимента было выявлено, что характеристика имеет два участка: линейный, на котором коэффициент теплообмена возрастает пропорционально увеличению скорости циркуляции, и участок насыщения, скорость, выше которой коэффициент теплообмена-значительно не изменяется. Таким образом, при проектировании системы управления принимается во внимание участок насыщения, и ограничивается увеличение скорости вращения сверх установленного предела.

2.2. Моделирование системы рекуперации в программной среде SciLab

Для корректной оценки адекватности математической модели, описанной в предыдущем параграфе, проведено моделирование процесса. В качестве программной среды для выполнения математической модели использована среда SciLab, имеющая открытую лицензию и широко применяемая в научных исследованиях [68–70].

Для реализации имитационного моделирования необходимо предварительно сформировать структуру модели, отражающую функциональный состав реального объекта и основные динамические звенья системы управления.

Формирование структуры модели выполнено на основе анализа аппаратной части вентиляционной установки и выделения тех элементов, динамика которых оказывает существенное влияние на тепловые и эксплуатационные процессы в системе рекуперации.

Перед построением математической модели выполнено описание функциональных составляющих на основе аппаратной части объекта. Основным исполнительным механизмом любой принудительной системы вентиляции является вентилятор. На рассматриваемом объекте он выполнен на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Структура модели данного типа двигателя является достаточно объёмной, и изучением его работы занимались исследователи в работах [71, 72, 114, 115]. За основу при

моделировании переходных процессов асинхронного двигателя принята известная модель [116, 40, 41], представленная на Рисунке 2.3, в неподвижной системе координат статора α, β .

Имитационная модель в программной среде Scilab Xcos представлена на Рисунке 2.4. Подсистема «Source», представляющая собой источник синусоидальных напряжений, сдвинутых на 90° относительно друг друга, приведена на Рисунке 2.5.

Имитационная модель в программной среде Scilab Xcos:

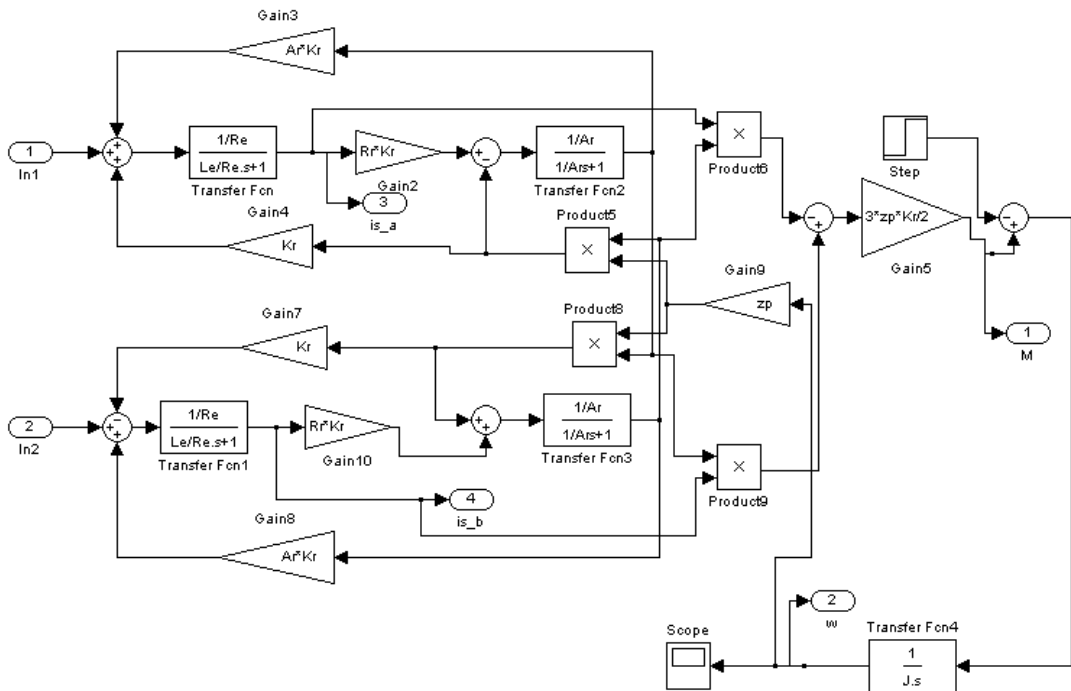


Рисунок 2.3 – Имитационная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат

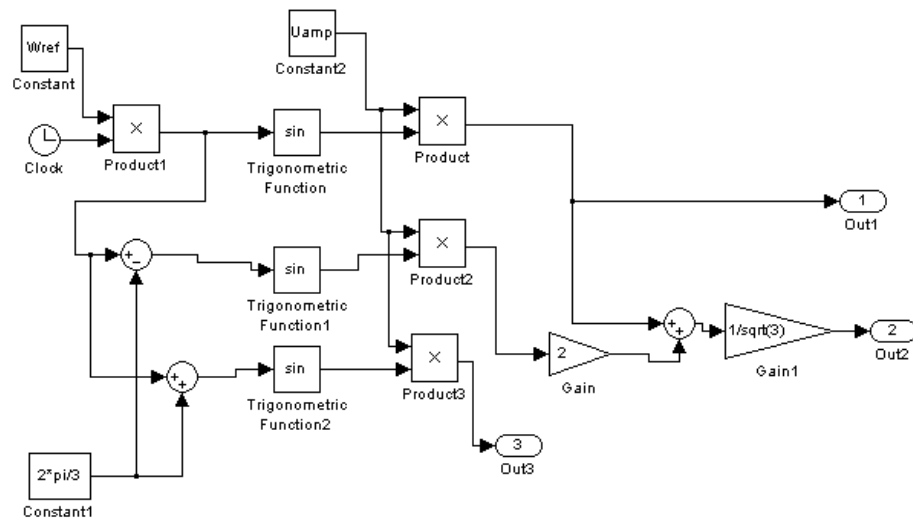


Рисунок 2.4 – Имитационная модель подсистемы «Source», представляющей собой источник синусоидальных напряжений, сдвинутых на 90° относительно друг друга

Для обеспечения воспроизводимости результатов моделирования в имитационной модели использованы паспортные и справочные параметры электропривода, соответствующие реальному объекту.

При моделировании использованы следующие параметры асинхронного электродвигателя:

%Параметры двигателя	$L_s = L_{s_} + L_m$;
$f = 50$;	$L_r = L_{r_} + L_m$;
$R_s = 0.303$;	$z_p = p/2$;
$R_r = 0.296$;	$K_r = 0.968$;
$L_{s_} = 2.604 \cdot 10^{-3}$;	$R_e = 0.058$;
$L_{r_} = 3.523 \cdot 10^{-3}$;	$L_e = 0.006014$;
$L_m = 0.106$;	$U_{amp} = 220 \cdot \sqrt{2}$;
$p = 6$;	$A_r = 2.69$;
$J = 0.12$;	$W_{ref} = 2 \cdot \pi \cdot f$;

Переходные процессы в асинхронном двигателе при прямом пуске и набросе номинальной нагрузки представлены на рисунке (Рисунок 2.5).

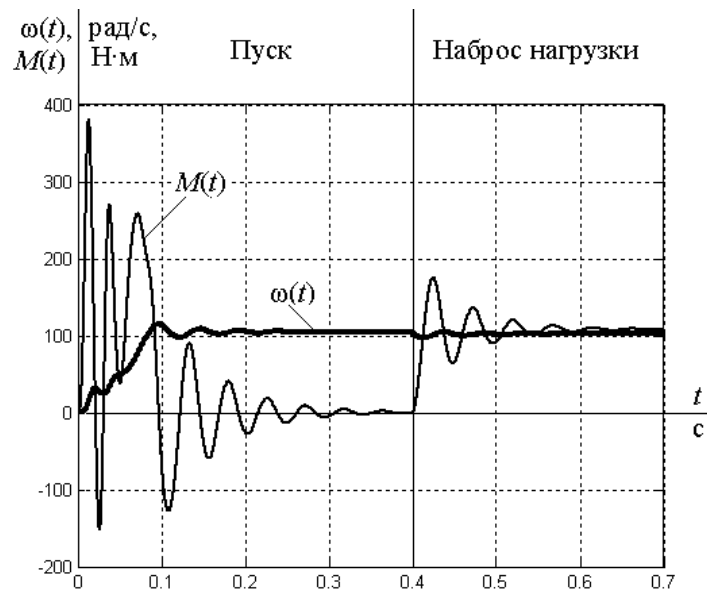


Рисунок 2.5 – Переходные процессы в АД при прямом пуске и набросе номинальной нагрузки

Поскольку задача моделирования ориентирована на анализ тепловых и эксплуатационных процессов в системе рекуперации, детальное воспроизведение электромагнитных процессов в электроприводе не является необходимым.

В связи с этим при дальнейшем построении модели электропривод рассматривается как инерционное звено, формирующее расход воздуха в канале и не определяющее в явном виде тепловую динамику системы.

Для рассмотрения системы управления вентиляционной установкой с тепловым рекуператором данную модель целесообразно упростить, поскольку постоянные времени, протекающие в электродвигателе, и тепловые процессы замерзания, теплообмена и оттаивания различаются на несколько порядков. Практика упрощения математических моделей является распространённой [112, 113]. На Рисунке 2.6 представлена переходная характеристика

зависимости скорости вращения вала двигателя от времени. Предполагается, что к вентилятору подключён частотный преобразователь (ПЧ), а ПИД-регулятор настроен корректно.

Работа двигателя в упрощённом виде описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dU_{imout}^2(\tau)}{d\tau^2} = k_{1.1}(U_{imin}(\tau) - U_{imout}(\tau)) - k_{1.2} \left(\frac{dU_{imout}(\tau)}{d\tau} \right) \quad (2.3)$$

где $U_{imout}(\tau)$ – выходной сигнал для асинхронного двигателя; $U_{imin}(\tau)$ – входной сигнал для асинхронного двигателя, $k_{1.1}, k_{1.2}$ – коэффициенты пропорциональности.

Преобразователь частоты описывается уравнением первого порядка:

$$\frac{dU_{fcout}(\tau)}{d\tau} = k_{1.3}(U_{fcin}(\tau) - U_{fcout}(\tau)) \quad (2.4)$$

где $U_{fcout}(\tau)$ – выходной сигнал для частотного преобразователя; $U_{fcin}(\tau)$ – входной сигнал для частотного преобразователя, $k_{1.3}$ – коэффициент пропорциональности.

Преобразователь частоты аппроксимирован апериодическим звеном первого порядка, а асинхронный двигатель — колебательным звеном.

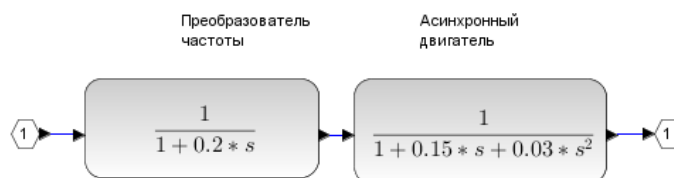


Рисунок 2.6 – Блок, описывающий работу блока ПЧ–АД

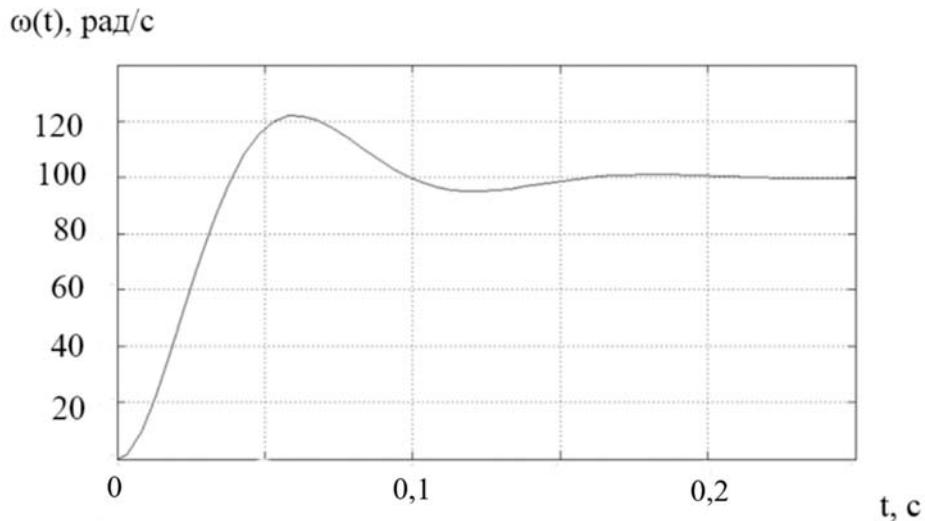


Рисунок 2.7 – Переходная характеристика модели системы ПЧ–АД

При сопоставлении характеристик, представленных на Рисунках 2.6 и 2.8, установлено, что имитационная модель не воспроизводит в полной мере динамику изменения частоты вращения двигателя, поскольку не учитываются ток и электромагнитный момент. Вместе с тем данная модель является достаточной для построения системы управления.

Для поддержания температуры точки росы в системе применяется ПИ-регулятор. Для настройки ПИ-регуляторов в литературе обычно используются математические модели первого или второго порядка [73–75]. Модель, полученная с использованием указанных подходов, является пригодной для настройки ПИ-регулятора. Присутствующие незначительные нелинейности могут быть упрощены методами, описанными в [65].

Дифференциальное уравнение ПИ-регулятора:

$$\frac{dU_{pidout}(\tau)}{d\tau} = k_p \frac{dU_{pidin}(\tau)}{d\tau} + k_i U_{pidin}(\tau), \quad (2.5)$$

где $U_{pid\ out}(\tau)$ – выходной сигнал регулятора; $U_{pid\ in}(\tau)$ – входной сигнал регулятора; k_P – пропорциональный коэффициент регулятора; k_I – интегральный коэффициент регулятора.

Переход от напряжения к температурному сигналу осуществляется по формуле:

$$t = t_{room} + (t_{out} - t_{room}) \cdot k_{t2} \cdot \frac{U_{in}}{U_{ctrl}} \quad (2.6)$$

где U_{in}/U_{ctrl} – величина, обратная максимальному значению напряжения.

Функция является статическим звеном динамического объекта и задаёт соответствие между напряжением и температурой с учётом КПД рекуператора.

Реализация приведена на рисунке (Рисунок 2.8).

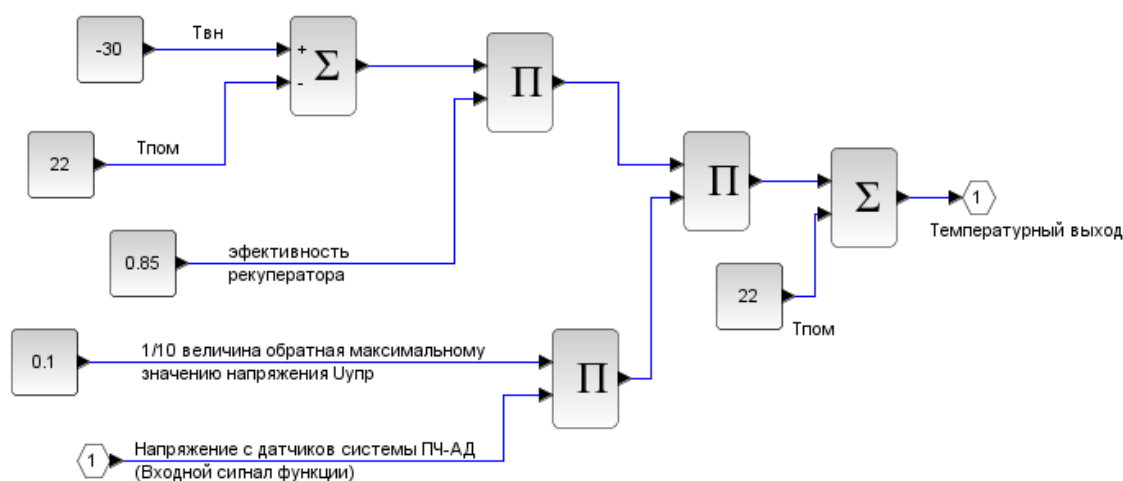


Рисунок 2.8 – Функция отображения в частотном управлении с температурой на выходе

Для учёта процессов обмерзания и оттаивания в модель введены динамические звенья, описывающие изменение температуры и нарастание инея.

$$\frac{dT_{out}^2(\tau)}{d\tau^2} = \frac{1}{k_{1.4}} \left(T_{in}(\tau) - T_{out}(\tau) - k_{1.5} \left(\frac{dT_{out}(\tau)}{d\tau} \right) \right), \quad (2.7)$$

где $T_{out}(\tau)$ – температура на выходе теплообменника; $T_{in}(\tau)$ – температура на входе теплообменника, $k_{1.4}$ – коэффициент времени перехода на необходимую температуру, $k_{1.5}$ – коэффициент пропорциональности

Параметр $T_{out}(\tau)$ определяет температуру на выходе вытяжной части установки, соответственно, при изменении эффективности рекуперативной установки меняется температура. В этом и заключается суть работы: потери, полученные из-за неэффективной работы и превращенные в тепло, будут нагревать вентиляционную шахту и плавить иней.

Процесс нарастания инея:

$$\frac{dT_{frost}(\tau)}{d\tau} = 5(T_{out}(\tau) - T_{frost}(\tau)) \quad (2.8)$$

где $T_{frost}(\tau)$ – температура на выходе звена образования инея.

На основе синтезированной модели сформирована структурная схема системы рекуперации (Рисунок 2.9).

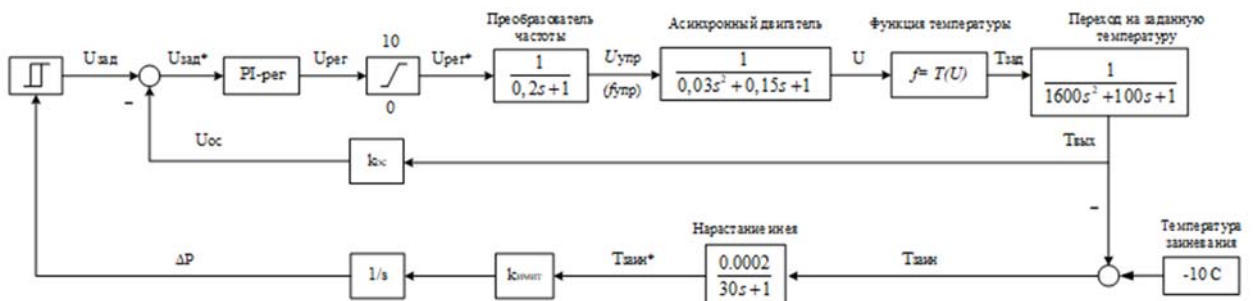


Рисунок 2.9 – Структурная схема системы рекуперации

В гистерезисный элемент введена зона нечувствительности для исключения дребезга. Ограничительный блок обеспечивает диапазон управляющего воздействия U_{ctrl} от 0 до 10 В.

На структурной схеме (Рисунок 2.9) используются передаточные функции, описывающие динамику преобразователя частоты и асинхронного двигателя. Постоянные времени указанных звеньев на 2–3 порядка меньше постоянных времени, характеризующих переходные процессы изменения температуры. В связи с этим при оценке устойчивости контура с ПИД-регулятором инерционными свойствами преобразователя частоты и асинхронного двигателя можно пренебречь, поскольку процессы изменения температуры и нарастания инея протекают существенно медленнее. Следовательно, для обеспечения устойчивости рассматриваемого контура достаточно применение ПИ-регулятора.

Объект для анализа устойчивости, представлен в виде последовательного соединения двух инерционных звеньев:

$$w(s) = \frac{1}{1600s^2 + 100s + 1} = \frac{K}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \quad (2.9)$$

где $T_1=80$, $T_2=20$, $K=0.5\dots 6$, что соответствует диапазону заданной температуры от 5 до 60 °С, формируемому стандартизированным управляющим сигналом 0 – 10 В (2.9).

Передаточная функция разомкнутой системы с ПИ-регулятором может быть записана в виде:

$$w(s) = \frac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)} \frac{(1 + T_i s) K_p}{T_i s} \quad (2.10)$$

Для данной передаточной функции разомкнутой системы (2.10) существует выражение модульного оптимума, представленного как:

$$w(s) = \frac{1}{(1 + T_\mu s) T_\mu s g} \quad (2.11)$$

где $g=2$ соответствует перерегулированию 5 %. Для рассматриваемой системы (2.11), согласно уравнению (2.9), принимаются значения $T_\mu = T_1$, $T_i = T_2$. В предельном случае при частоте $\omega \rightarrow 0$ справедливо равенство:

$$\frac{K K_p}{T_i} = \frac{1}{T_\mu g} \quad (2.12)$$

Параметр K_p определяется следующим образом:

$$K_p = \frac{T_i}{T_\mu g K} \quad (2.13)$$

Выполнение указанных соотношений (2.12), (2.13) позволяет обеспечить оптимальное управление при высоких значениях коэффициента передачи K с перерегулированием в 5 %, что говорит об устойчивости контура.

Согласно критерию Найквиста, уменьшение коэффициента передачи объекта K приводит к снижению быстродействия, однако устойчивость системы при этом увеличивается. Для подтверждения работоспособности контура проведено моделирование (Рисунок 2.10) для двух режимов: при максимальном и минимальном значениях коэффициента передачи.

Приняты следующие параметры:

$$g=2; T_i=80; T_\mu=20; K=6; K_p = \frac{T_i}{T_\mu g K}$$

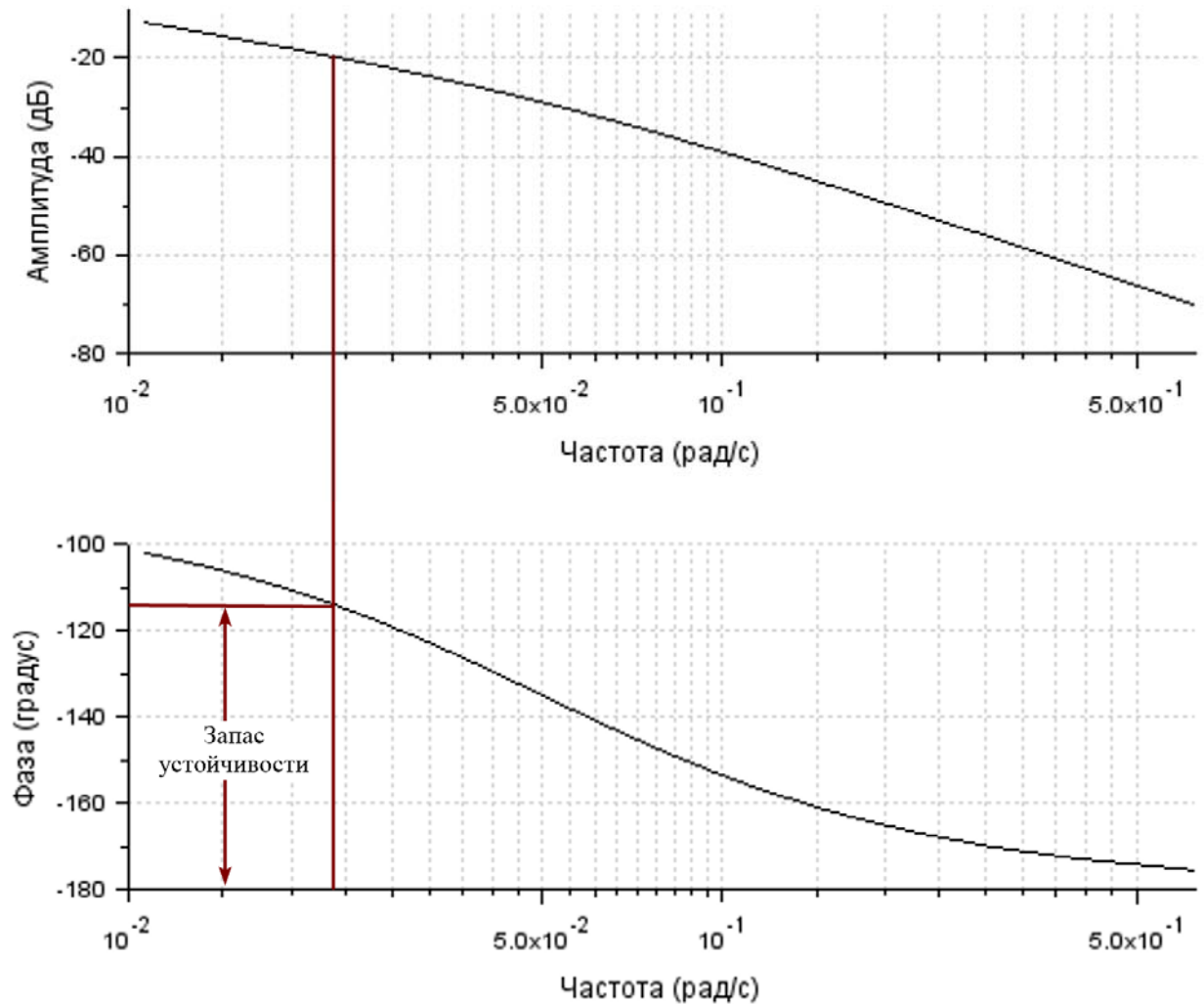


Рисунок 2.10 – Критерий Найквиста по ЛЧХ для $K=6$

Как показано на графиках (Рисунок 2.10), пересечение АЧХ с уровнем 0 дБ не сопровождается достижением фазового сдвига -180° , что свидетельствует об устойчивости системы.

Ниже приведена переходная характеристика для $K=0,5$ и 6 (Рисунок 2.11)

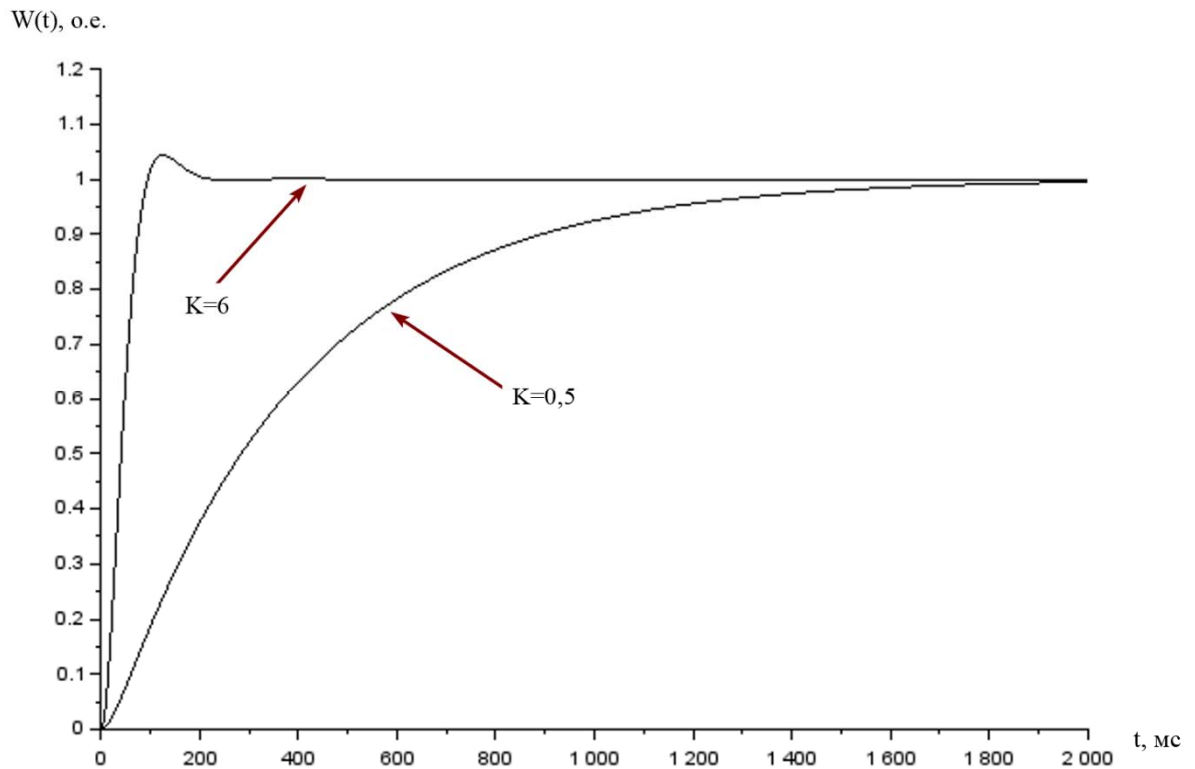


Рисунок 2.11 – Критерий Найквиста по ЛЧХ для $K=0,5$

система сохраняет устойчивость во всём диапазоне изменения коэффициента передачи $K=0,5\dots 6$, а снижение быстродействия при малых K не является критичным в силу большой длительности переходных процессов объекта управления.

На основании модели сформирована блок-схема алгоритма работы (Рисунок 2.12).

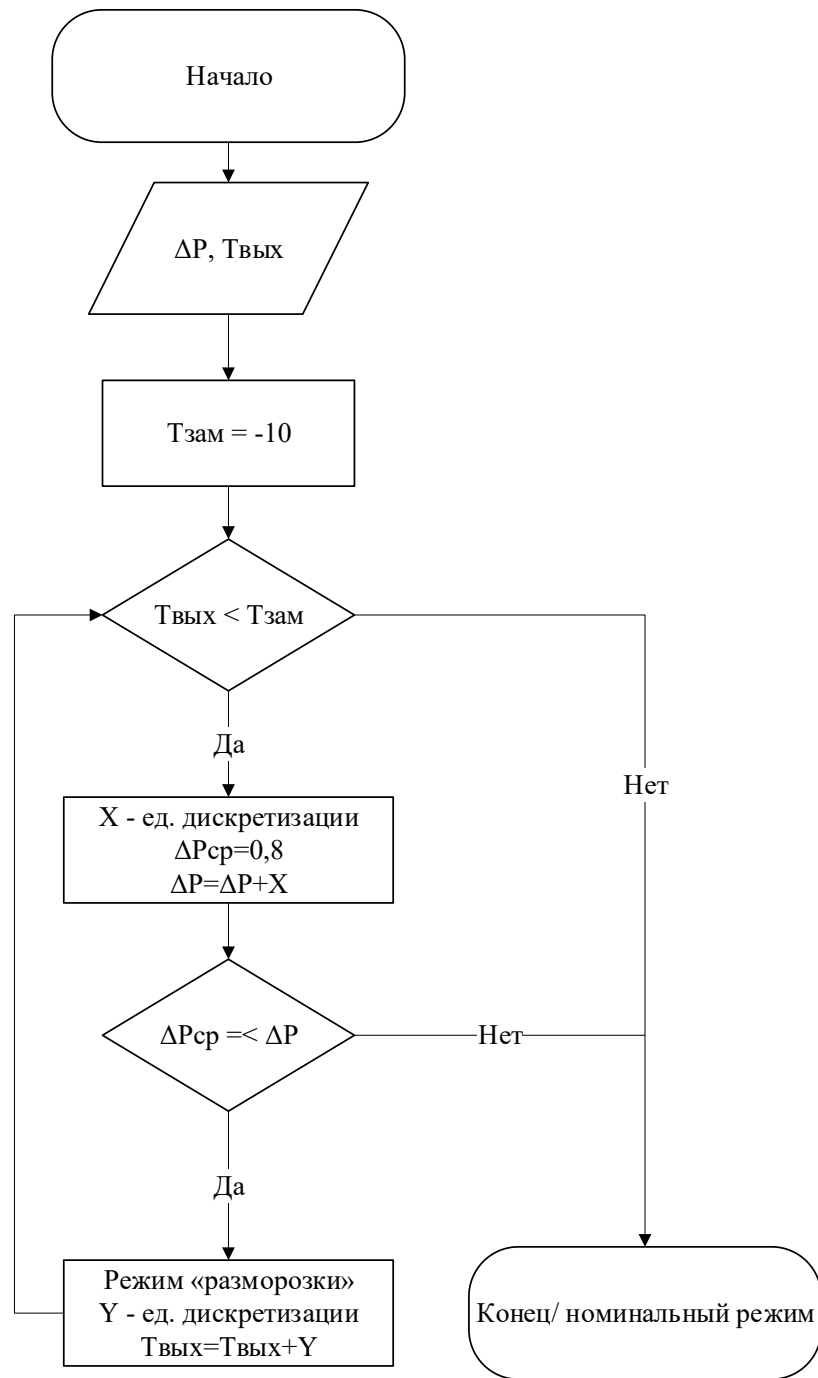


Рисунок 2.12 – Блок-схема алгоритма работы системы рекуперации

В среде XCos SciLab реализована модель системы управления с учётом заиневаания (Рисунок 2.12).

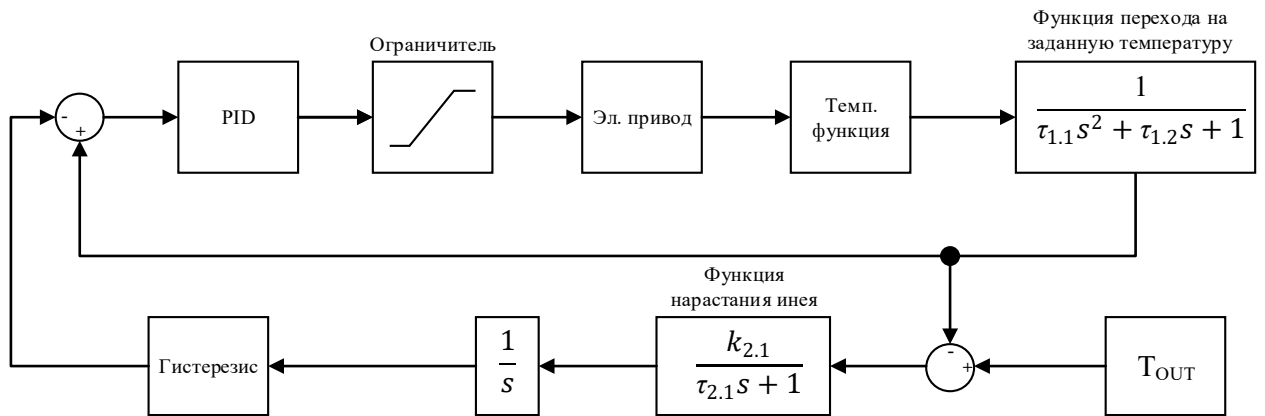


Рисунок 2.13 – Имитационная модель системы рекуперации

Для данной структурной схемы приняты следующие условные обозначения: PID – ПИД-регулятор; эл. привод – функциональный блок, состоящий из последовательно соединённых блоков преобразователя частоты и асинхронного двигателя.

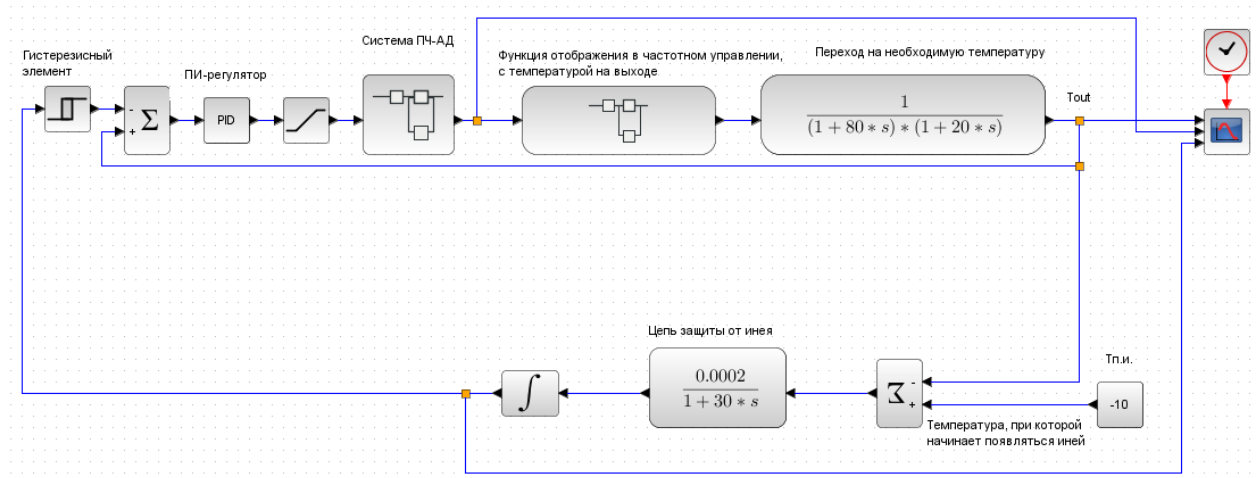


Рисунок 2.14 – Реализация алгоритма в среде XCos SciLab

В результате получились следующие характеристики (Рисунок 2.15).

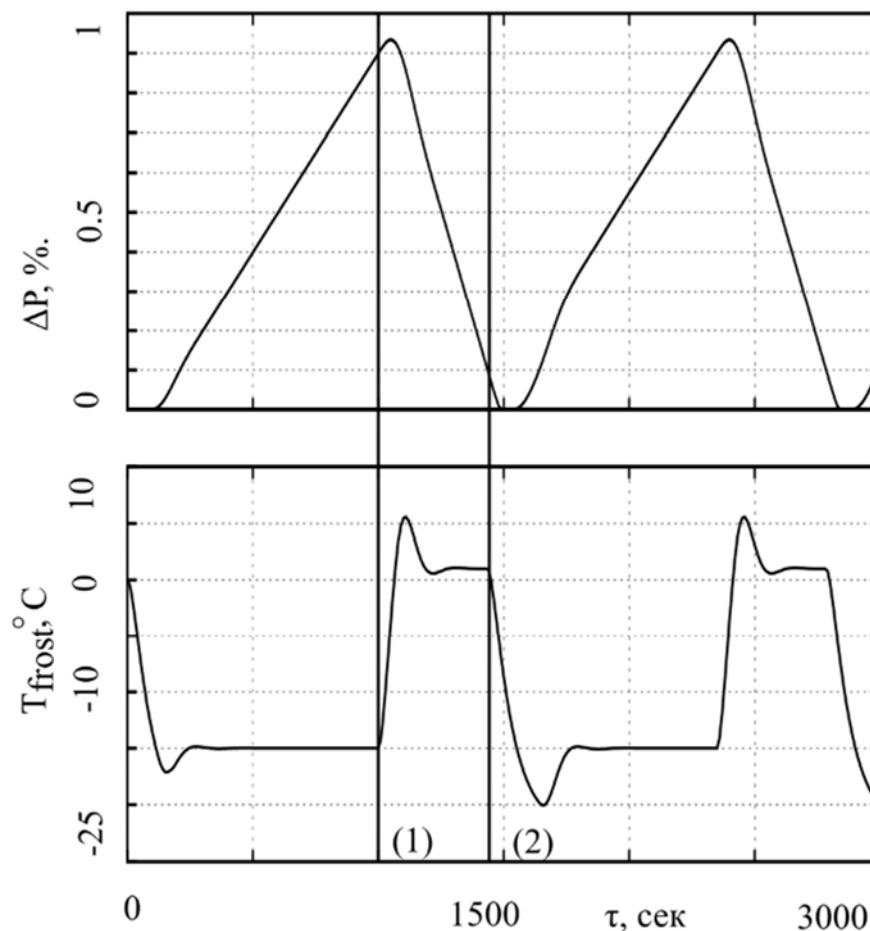


Рисунок 2.15 – Переходные процессы в системе рекуперации

Результаты моделирования, представленные на Рисунке 2.14, отражают динамику изменения температуры на выходе теплообменника, управляющего воздействия и степени заиневаания в переходных режимах работы системы рекуперации. Полученные зависимости подтверждают адекватность принятой структуры модели и корректность аппроксимации динамических звеньев, описывающих электропривод, теплообменник и процесс образования инея.

В начальный момент времени система функционирует в штатном режиме при отсутствии заиневаания теплообменника. Температура на выходе поддерживается на уровне, соответствующем заданному значению

температуры точки росы. Управляющее воздействие, формируемое ПИ-регулятором, обеспечивает требуемый расход воздуха через теплообменник и, соответственно, необходимый уровень теплопередачи.

По мере понижения температуры наружного воздуха и увеличения влажности происходит нарастание инея на поверхности теплообменника, что приводит к снижению его пропускной способности и росту аэродинамического сопротивления. Указанные процессы сопровождаются уменьшением интенсивности передачи воздушных масс и изменением температурного режима на выходе теплообменника.

Динамика изменения степени заиневаания характеризуется аperiодическим ростом, определяемым параметрами звена образования инея (2.8). При этом скорость нарастания инея зависит от текущего значения температуры на выходе теплообменника и разности температур на входе и выходе, что согласуется с физическими представлениями о процессе фазового перехода влаги из газообразного в твёрдое состояние.

Управляющее воздействие ПИ-регулятора в указанный интервал времени изменяется плавно, что обусловлено наличием интегральной составляющей и инерционными свойствами объекта управления. Это позволяет избежать резких скачков расхода воздуха и обеспечивает устойчивость температурного режима на выходе теплообменника до момента достижения порогового значения степени заиневаания.

Время снижения интенсивности передачи воздушных масс на 80 % составляет $t_{y.v} = 800$ с. При достижении 80 % обледенения срабатывает гистерезисный элемент. Управляющее воздействие формируется ПИ-регулятором [163].

При $p_{fr} = 80\%$ температура на выходе увеличивается для плавления инея. После очистки канала система возвращается в штатный режим.

Основными факторами заиневаания являются температура и влажность воздуха. При сухом воздухе температура заиневаания может снижаться до -30 °С, при влажном — приближаться к температуре точки росы. Указанная зависимость зафиксирована при эксплуатации установки в Якутии [163].

Основной задачей модели является определение момента переключения режимов по степени заиневаания.

В реальных условиях эксплуатации системы рекуперации сигнал, используемый для оценки степени заиневаания теплообменника, формируется на основе показаний датчика перепада давления. Данный сигнал отражает изменение аэродинамического сопротивления канала и, при прочих равных условиях, может служить косвенным индикатором нарастания инея на поверхности теплообменника.

Однако практический опыт эксплуатации вентиляционных установок показывает, что сигнал перепада давления подвержен воздействию различных возмущающих факторов. К ним относятся пульсации воздушного потока, вибрации, возникающие при работе электромеханической части установки, а

также электрические помехи, обусловленные функционированием частотного преобразователя и силовой электроники. Указанные факторы приводят к появлению случайных составляющих в измерительном сигнале, не связанных напрямую с процессом заиневаания.

Наличие помех в сигнале перепада давления существенно осложняет задачу определения момента перехода между режимами работы системы рекуперации. В частности, при использовании пороговых и гистерезисных элементов управления случайные выбросы сигнала могут приводить к преждевременным или ложным срабатываниям алгоритма оттаивания. Это, в свою очередь, снижает энергетическую эффективность установки и может вызывать избыточные переходы в режим оттаивания.

Для оценки влияния помех на работу системы управления в имитационную модель введён источник случайных возмущений, моделирующий шумовую составляющую сигнала перепада давления. Это позволяет проанализировать устойчивость алгоритма переключения режимов и выявить характерные особенности поведения системы в условиях, приближённых к реальной эксплуатации.

Результаты моделирования работы системы с учётом помех представлены на Рисунках 2.14–2.16.

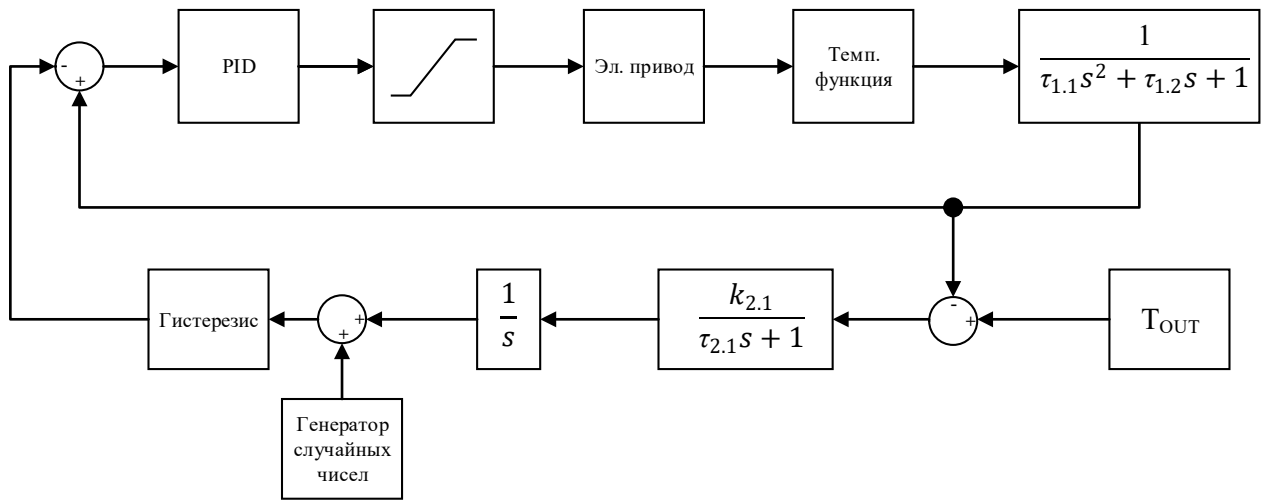


Рисунок 2.16 – Имитационная модель системы рекуперации с генератором случайных чисел

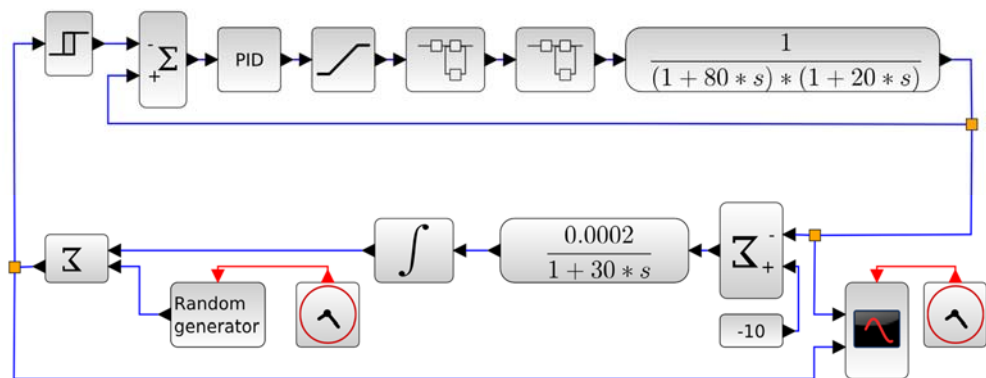


Рисунок 2.17 – Модель системы с имитацией наведенных помех в среде XCos

SciLab

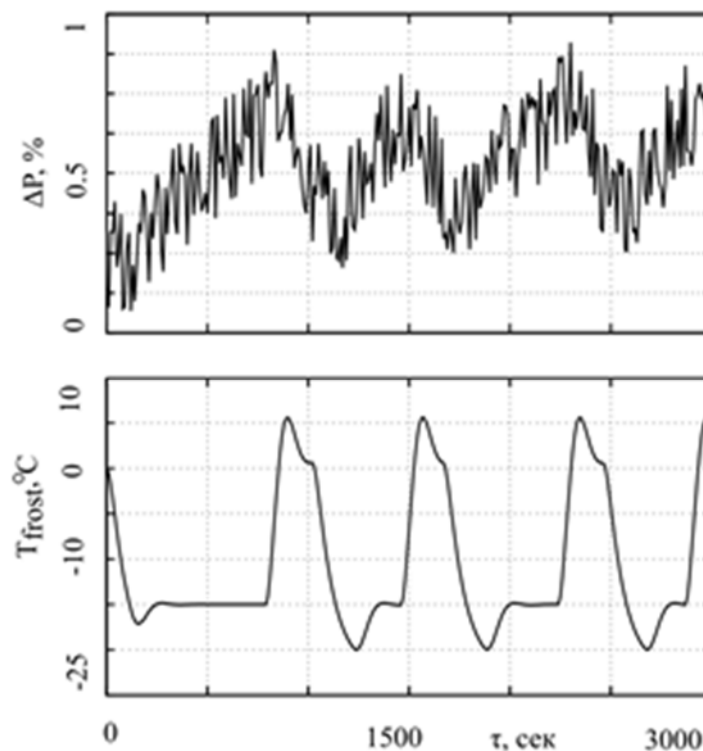


Рисунок 2.18 – Переходные процессы в системе рекуперации с учетом помех

Анализ переходных процессов, представленных на рисунке (Рисунок 2.18), показывает, что наличие шумовой составляющей в сигнале перепада давления приводит к существенным искажениям оценок степени заиневаания теплообменника. Колебания измерительного сигнала вызывают ложные пересечения пороговых значений, что приводит к преждевременному срабатыванию гистерезисного элемента и инициированию режима оттаивания при отсутствии критического обледенения.

Указанное поведение системы проявляется в виде частых и кратковременных переключений режимов работы, сопровождающихся нестабильностью управляющего воздействия и колебаниями температуры на выходе теплообменника. В условиях реальной эксплуатации подобные режимы

приводят к снижению энергетической эффективности установки, увеличению износа исполнительных механизмов и ухудшению условий работы вентиляционной системы в целом.

Следует отметить, что применение традиционных методов фильтрации измерительного сигнала, таких как апериодические или скользящие фильтры, не всегда обеспечивает требуемый эффект. Это связано с тем, что фильтрация неизбежно вносит дополнительную задержку в сигнал, что при управлении процессом заиневаания может привести к запаздыванию момента перехода в режим оттаивания и, как следствие, к превышению допустимой степени обледенения теплообменника.

В связи с изложенным возникает необходимость использования более устойчивых методов оценки состояния процесса заиневаания, основанных на использовании математической модели объекта и измерений доступных параметров. Одним из таких подходов является применение наблюдателей переменных состояния, позволяющих восстанавливать внутренние переменные системы по зашумлённым измерениям и управляющим воздействиям.

Применение наблюдателя обеспечивает сглаживание случайных помех и формирование оценки степени заиневаания, обладающей меньшей чувствительностью к шумам измерительного канала. Это позволяет существенно повысить надёжность алгоритма переключения режимов и

обеспечить устойчивую работу системы рекуперации в условиях реальной эксплуатации.

Структурная схема системы управления с использованием наблюдателя переменных состояния процесса заиневаания и результаты моделирования приведены на Рисунках 2.17 – 2.19.

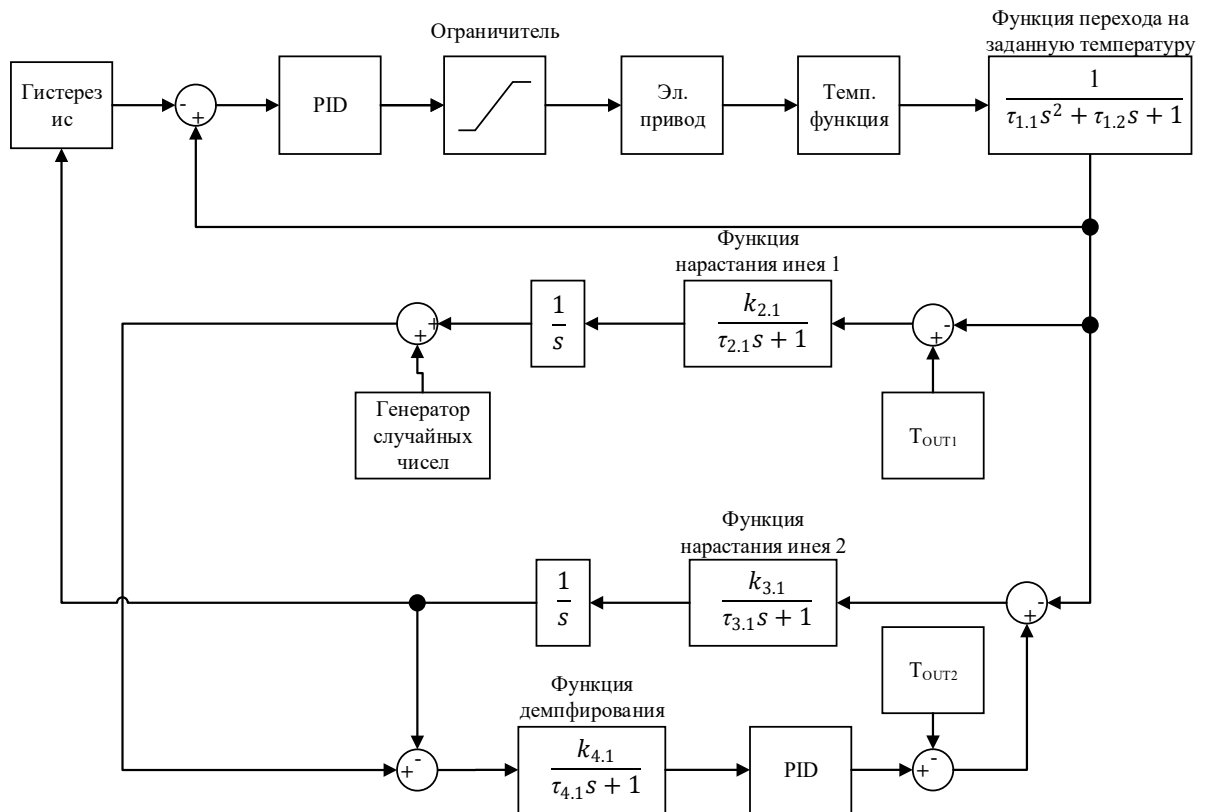


Рисунок 2.19 – Структурная схема системы с наблюдателем переменных состояния процесса заиневаания

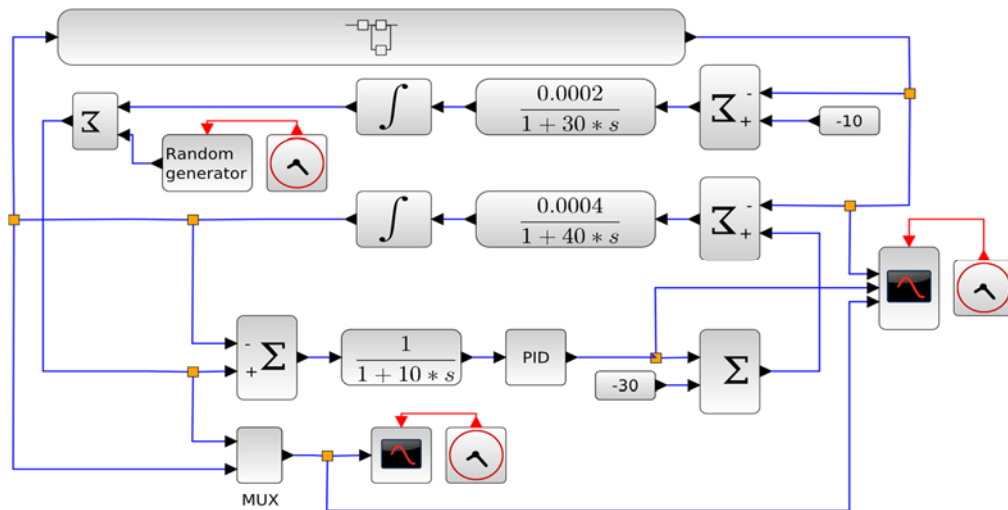


Рисунок 2.20 – Структурная схема системы с наблюдателем переменных состояния процесса заиневаания в среде XCos SciLab

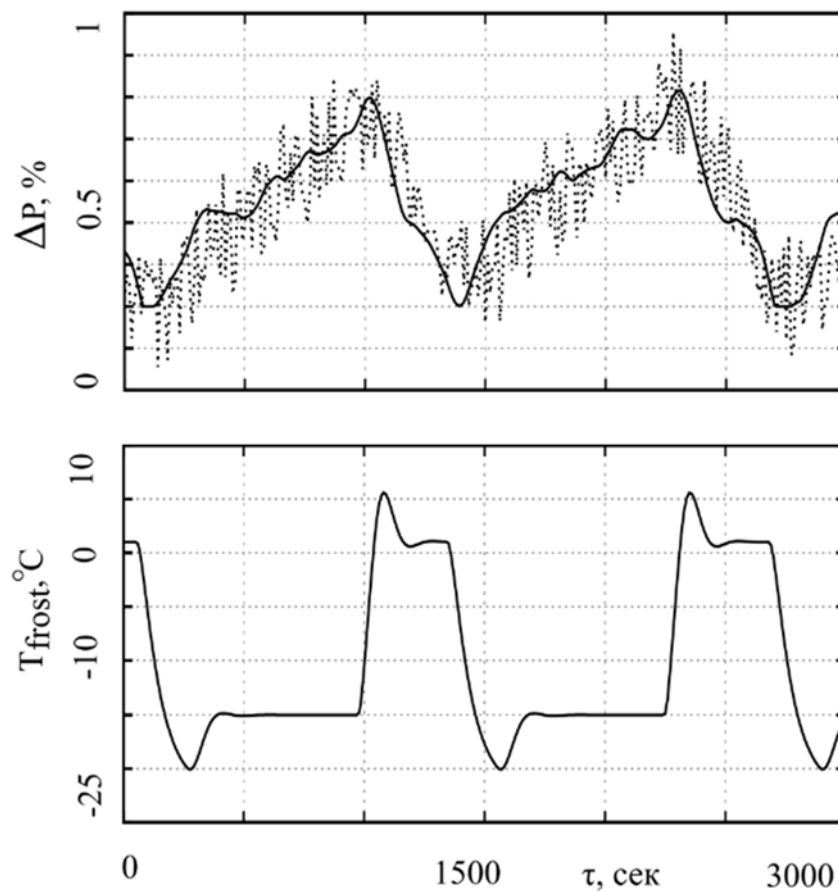


Рисунок 2.21 – Переходные процессы в системе с наблюдателем переменных состояния процесса заиневаания

Анализ переходных процессов, представленных на Рисунке 2.20, показывает, что использование наблюдателя переменных состояния позволяет существенно снизить влияние шумовой составляющей сигнала перепада давления на работу системы управления. Оценка степени заиневаания, формируемая наблюдателем, имеет сглаженный характер и сохраняет физически корректную динамику изменения, соответствующую реальному процессу образования инея на поверхности теплообменника.

Введение наблюдателя приводит к устранению ложных срабатываний гистерезисного элемента, которые имели место при прямом использовании зашумлённого измерительного сигнала. Управляющее воздействие формируется более устойчиво, без резких колебаний, что положительно сказывается на температурном режиме на выходе теплообменника и снижает количество переходов системы в режим оттаивания.

Следует отметить, что наблюдатель не только выполняет функцию фильтрации шумов, но и обеспечивает восстановление внутреннего состояния объекта управления на основе математической модели и доступных измерений. Это позволяет учитывать инерционные свойства процесса заиневаания и динамику теплопередачи, что невозможно при использовании простых пороговых алгоритмов и стандартных фильтров.

В системе дополнительно реализован контур регулирования температуры образования инея, основной задачей которого является минимизация рассогласования между заданным и фактическим значениями температуры при

сохранении устойчивости системы управления. Использование данного контура позволяет адаптировать работу системы рекуперации к изменяющимся условиям окружающей среды и режимам эксплуатации.

Полученные результаты моделирования подтверждают, что система управления с наблюдателем обеспечивает устойчивую и помехоустойчивую оценку степени загрязнения теплообменника в широком диапазоне эксплуатационных условий. Это создаёт предпосылки для автоматизированного определения момента перехода между режимами работы системы рекуперации и снижения участия оператора в процессе управления.

Результаты, полученные в данном разделе, используются в дальнейшем для обоснования структуры системы автоматического управления и разработки алгоритмов оттаивания теплообменника, ориентированных на повышение энергетической эффективности вентиляционной установки и надёжности её функционирования.

2.3. Контроль состояния исполнительных компонентов

В результате выполненного в разделе 2.2 анализа показано, что переходные процессы технологических параметров содержат информацию о текущем состоянии объекта управления и могут использоваться для повышения устойчивости и надёжности автоматизированных систем. Указанный подход может быть распространён не только на задачи управления режимами работы, но и на задачи косвенной диагностики состояния исполнительных механизмов в условиях отсутствия прямых средств контроля.

В ряде технических систем использование дополнительных датчиков для контроля работоспособности исполнительных механизмов затруднено или экономически нецелесообразно. Ограничения могут быть обусловлены агрессивной средой, высокими температурами, повышенной влажностью, а также конструктивными особенностями объекта. В таких условиях диагностика состояния системы осуществляется по косвенным признакам, формируемым в рамках штатного контура автоматического управления.

К системам данного типа относятся сушильные камеры пиломатериалов, в которых исправная работа циркуляционных вентиляторов и воздушных заслонок является одним из ключевых факторов обеспечения равномерности сушки. Внутри сушильной камеры поддерживаются повышенные температуры (более 60 °С), высокая влажность воздуха и присутствует древесная пыль [79, 81], при этом полезный объём камеры существенно ограничен загрузкой пиломатериалами. Визуальный контроль состояния оборудования осуществляется периодически, как правило с интервалом порядка трёх суток [82].

За указанный промежуток времени отказ одного или нескольких исполнительных механизмов может привести к существенному ухудшению качества продукции. К типовым дефектам относятся образование плесени, растрескивание и коробление пиломатериалов (Рисунки 2.20–2.22).



Рисунок 2.22 – Плесень на пиломатериале

В камере плесень возникает из-за застоя воздуха и конденсата на старте сушки, когда при закрытых вытяжках и высокой влажности агента сушки влага оседает на поверхности досок. Также проблема появляется при нарушении этапа кондиционирования, если финальная обработка паром проводится слишком долго при низкой температуре, а также при использовании грязных вагонеток или прокладок, являющихся источником спор.



Рисунок 2.23 – Растрескивание сухой древесины

Трещины являются следствием слишком агрессивного старта сушки, когда резкое повышение температуры вызывает быстрый перепад влажности между поверхностью и сердцевиной, и наружные слои, сжимаясь, разрываются. Торцевые трещины появляются из-за отсутствия герметизации торцов в сочетании с чрезмерно высокой скоростью циркуляции воздуха в начале процесса. Внутренние трещины формируются при слишком высоком влажностном градиенте, если преждевременно снизить относительную влажность в камере, не дав внутренним напряжениям времени на релаксацию.



Рисунок 2.24 – Деформация сухого пиломатериала

Коробление в камере происходит прежде всего из-за неравномерной аэродинамики, когда из-за неплотной укладки или ошибок в формировании штабеля скорость обдува по сечению различается, что приводит к неравномерной усадке досок. Деформацию также вызывает отсутствие или несвоевременное проведение промежуточной влаготеплообработки, в результате чего в материале накапливаются остаточные напряжения, которые

высвобождаются после выгрузки. Кроме того, использование некалиброванных прокладок внутри камеры приводит к тому, что доски провисают и фиксируют волнообразную форму в процессе сушки.

Возникновение указанных дефектов связано с нарушением равномерности распределения воздушных потоков и локальным изменением параметров микроклимата в объёме сушильной камеры. Экономические потери при этом могут достигать порядка 1 млн руб. за один цикл сушки [79]. При этом для формирования дефектов зачастую достаточно работы установки в нештатном режиме в течение одних суток [83, 84], тогда как кратковременные отклонения продолжительностью 2–4 часа могут не оказывать существенного влияния на качество продукции.

В условиях ограниченного доступа к объекту и отсутствия прямых средств диагностики целесообразно использовать данные, формируемые штатной системой автоматического управления. В сушильных камерах такими данными являются показания электронного психрометра, включающего «сухой» и «мокрый» датчики температуры. Указанные параметры используются для оценки влажности сушильного агента и поддержания заданных режимов сушки.

В ходе работы были проанализированы архивы переходных процессов температур сухого и влажного датчиков, зарегистрированные в условиях штатного автоматизированного режима управления. Описание системы сбора и диспетчеризации данных приведено в главе 3, характеристики используемых

датчиков рассмотрены в главе 1. В указанных условиях алгоритмы управления исполнительными механизмами задаются технологической картой, а сами механизмы находятся в исправном состоянии.

Переходные процессы температур сухого и влажного датчиков, а также управляющих сигналов исполнительных механизмов приведены на рисунке (Рисунок 2.25)

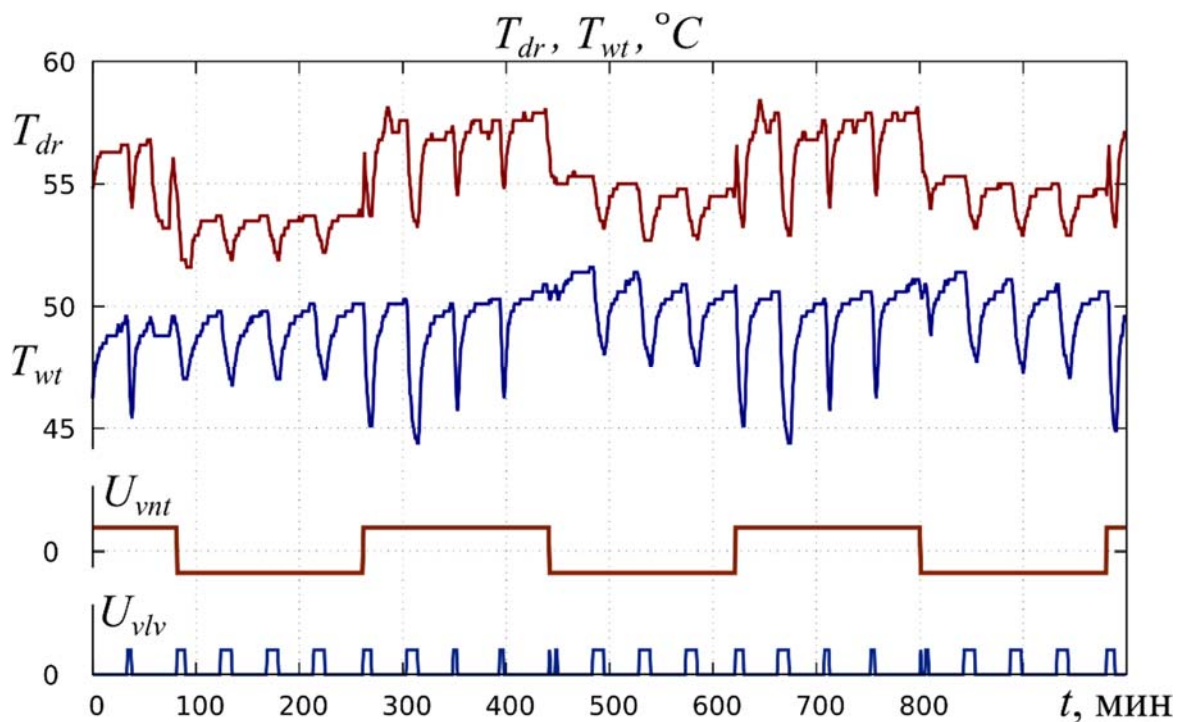


Рисунок 2.25 – Переходные процессы сигналов управления и температур

T_{dr} – температура сухого датчика; T_{wt} – температура влажного датчика;

U_{vnt} – управление двигателями вентиляции; U_{vlv} – положение заслонки.

Снятие переходных процессов при помощи «сухого» и «мокрого» датчиков позволило качественно оценить влажность в помещении комплекса осушения по психрометрической таблице [61] (Рисунок 2.26).

Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °С	Разность показаний сухого и влажного термометра, °С										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
0	100	81	63	45	28	11	—	—	—	—	—
2	100	84	68	51	35	20	—	—	—	—	—
4	100	85	70	56	42	28	14	—	—	—	—
6	100	86	73	60	47	35	23	10	—	—	—
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7	—	—
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	5	—
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	—
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39

Рисунок 2.26 – Определение влажности по показаниям «сухого» и «мокрого» датчиков температуры

Анализ представленных переходных процессов показывает наличие выраженной корреляции между управляющими воздействиями и динамикой температурных сигналов. При этом температура сухого датчика в большей степени отражает влияние изменения скорости циркуляции воздуха, обусловленного работой вентиляторов, тогда как температура влажного датчика более чувствительна к изменению положения воздушных заслонок и режимам воздухообмена. Указанные особенности обусловлены различиями в тепломассообмене и инерционными свойствами соответствующих процессов.

Помимо основной задачи определения влажности сушильного агента, переходные процессы температур содержат спектральные составляющие,

соответствующие периодическим управляющим воздействиям исполнительных механизмов. Для выделения указанных составляющих в задачах анализа сигналов традиционно применяется преобразование Фурье. Однако реализация данного метода в составе программируемых логических контроллеров может быть ограничена требованиями к вычислительным ресурсам и объёму оперативной памяти.

В связи с этим для анализа переходных процессов предложено использовать узкополосные фильтры, настраиваемые на заранее известные частоты управляющих воздействий [90, 91]. Такой подход позволяет учитывать априорную информацию о периодичности включения вентиляторов и изменении положения заслонок, а также существенно снизить вычислительную нагрузку.

Передаточная функция узкополосного фильтра имеет вид

$$W(s) = \frac{b_1 s}{a_0 + a_1 s + s^2} \quad (2.14)$$

Коэффициенты передаточной функции (2.14) определяются по выражениям

$$a_0 = \omega_r^2, a_1 = \frac{\omega_r}{Q}, b_1 = a_1 k, \omega_r = \frac{2\pi}{T_p}, Q = \frac{\omega_r}{(\omega_{max} - \omega_{min})}, \quad (2.15)$$

где ω_r – выделяемая частота из спектра, выраженная в радианах.

Параметры узкополосного фильтра выбираются исходя из характеристик управляющих воздействий исполнительных механизмов сушильной камеры.

Резонансная частота ω_r определяется периодом T_p , соответствующим циклическому изменению управляющего сигнала, например реверсу циркуляционных вентиляторов или периодическому изменению положения воздушной заслонки. Таким образом, настройка фильтра осуществляется с учётом априорно известной периодичности работы исполнительных механизмов, заданной алгоритмом управления.

Добротность фильтра Q характеризует ширину полосы пропускания и определяет степень селективности выделения спектральной составляющей. При увеличении значения Q полоса пропускания сужается, что позволяет более точно выделять требуемую частоту, однако при этом возрастает чувствительность фильтра к изменению параметров сигнала и увеличивается время переходного процесса. При уменьшении Q фильтр становится менее избирательным, но обладает большей устойчивостью к отклонениям частоты и шумовым составляющим. Выбор значения добротности осуществляется как компромисс между селективностью фильтра и устойчивостью его работы в условиях реальных переходных процессов.

Коэффициент усиления k используется для нормирования амплитуды выходного сигнала фильтра и подбирается таким образом, чтобы обеспечить сопоставимый уровень сигнала для дальнейшего анализа и сравнения с управляющими воздействиями. Это упрощает реализацию диагностических алгоритмов и повышает устойчивость работы системы при изменении масштаба входных сигналов.

Следует отметить, что предложенный способ параметризации фильтра не требует выполнения спектрального анализа в реальном времени и может быть реализован с использованием минимального набора арифметических операций. Это является существенным преимуществом при реализации алгоритма в составе программируемых логических контроллеров, функционирующих в режиме реального времени и имеющих ограниченные вычислительные ресурсы.

Для последующей реализации узкополосного фильтра в цифровой системе управления дифференциальное уравнение, соответствующее передаточной функции (2.9), приводится к форме, удобной для дискретизации. В качестве исходной используется форма Коши дифференциального уравнения второго порядка, на основе которой далее выводится разностное уравнение фильтра.

$$\frac{d^2y}{dt^2} = b_1 \frac{dx}{dt} - a_0y - a_1 \frac{dy}{dt} \quad (2.16)$$

Для перехода от непрерывного представления фильтра к дискретной форме, пригодной для реализации в программируемом логическом контроллере, используется билинейное преобразование (преобразование Тастина). Указанный метод широко применяется при цифровой реализации фильтров и регуляторов.

Преобразование Тастина [92, 93] позволяет аппроксимировать оператор дифференцирования с использованием конечных приращений при сохранении динамических характеристик фильтра. Это особенно важно при анализе

переходных процессов, поскольку обеспечивает корректное воспроизведение инерционных свойств объекта управления и предотвращает искажение формы переходной характеристики при дискретизации.

С учётом выбранного периода дискретизации t дифференциальное уравнение (2.11) приводится к разностной форме, удобной для реализации в цифровой системе управления.

Произведена замена дифференцирования обычным отношением приращений функций выхода и входа за конечное время дискретизации фильтра. В результате получается из (2.16) пригодное для программирования фильтра выражение разностного уравнения

$$y_0 = (2y_1 - y_2) + b_1 t_d (x_0 - x_1) - a_0 t_d^2 y_1 - a_1 t_d (y_1 - y_2), \quad (2.17)$$

где t_d – время дискретизации фильтра; y_0, y_1, y_2 – текущее, прошлое и позапрошлые значения выхода; x_0, x_1 – текущее и прошлые значения входа.

Ниже (Рисунок 2.27) показаны переходные процессы сигналов на выходе узкополосных фильтров, построенных в виде функциональных блоков на базе выражения (2.17), где в качестве параметров приняты T_p и Q , вычисленные согласно (2.15).

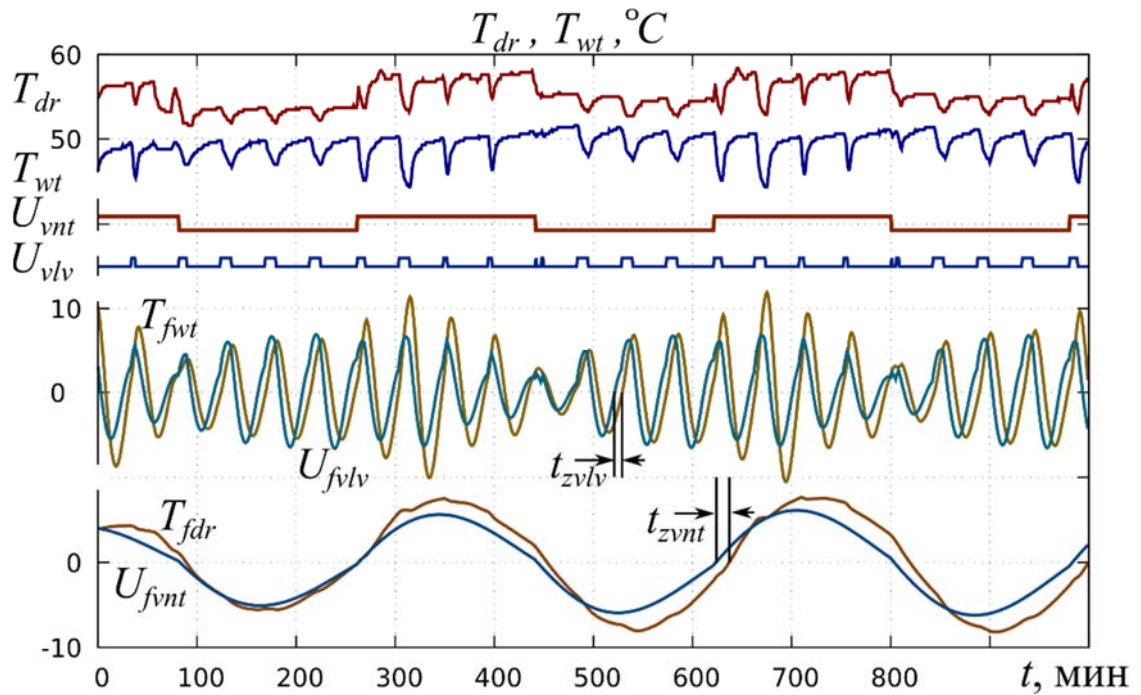


Рисунок 2.27 – Переходные процессы на выходе узкополосных фильтров

Представлены переходные процессы на выходе узкополосных фильтров, реализованных в виде функциональных блоков на базе разностного уравнения (2.12) с параметрами, вычисленными согласно (2.10) (Рисунок 2.25). Как видно из графиков, отфильтрованные сигналы, соответствующие управлению вентиляторами (U_{vnt}) и заслонками (U_{vlv}), а также температурам «сухого» (T_{dr}) и «мокрого» (T_{wt}) датчиков, демонстрируют выраженную периодическую составляющую, что подтверждает наличие тесной спектральной связи между управляющими воздействиями и откликом системы.

Ключевым наблюдением является факт наличия значимого фазового сдвига между этими сигналами. Анализ графиков позволяет количественно оценить это запаздывание:

Для канала управления вентиляторами и отклика температуры «сухого» датчика наблюдается задержка, составляющая приблизительно $t_{zvnt} \approx 15$ мин.

Для канала управления заслонками и отклика температуры «мокрого» датчика задержка меньше и оценивается как $t_{zv/v} \approx 9$ мин.

Физическая интерпретация выявленных временных сдвигов заключается в инерционных свойствах самого объекта управления — сушильной камеры. Разница в величинах запаздывания (15 мин против 9 мин) логично объясняется различной динамикой процессов, на которые влияют эти управления: изменение режима вентиляции затрагивает более крупные массы воздуха в камере, что приводит к большей инерционности, в то время как изменение положения заслонки быстрее сказывается на локальном влажностном режиме вокруг «мокрого» датчика.

На основе этого анализа был синтезирован диагностический алгоритм для контроля исправности каналов управления. Поскольку основным диагностическим признаком была выбрана корректность временной взаимосвязи (запаздывания) между командой и откликом, в структуру алгоритма были включены элементы, моделирующие ожидаемую динамику отклика.

Для этой цели были использованы три последовательно соединенных апериодических звена первого порядка, параметры которых были подобраны таким образом, чтобы общая переходная характеристика этой цепочки аппроксимировала измеренные времена запаздывания (t_{zvt} и $t_{zv/v}$) для соответствующих каналов. Таким образом, алгоритм формирует «эталонный» или «прогнозируемый» сигнал отклика температуры на основе текущего

управляющего воздействия, учитывая нормальную для системы инерционность.

Принцип работы диагностической системы заключается в следующем: реальный сигнал с датчика температуры сравнивается с сигналом на выходе модели запаздывания. В штатном режиме, при исправной работе исполнительного механизма (вентилятора или заслонки) и корректном распространении управляющего воздействия, эти сигналы будут совпадать по фазе и форме с допустимой погрешностью. Если же возникает неисправность (например, механический отказ, обрыв цепи управления, значительное снижение производительности), связь между командой и откликом нарушается. Это приводит к рассогласованию между реальным и смоделированным сигналами температуры, что фиксируется логикой алгоритма как диагностическое событие — признак нештатной ситуации в соответствующем канале управления.

Таким образом, предложенный подход позволяет перейти от констатации наличия фазового сдвига к созданию работоспособного алгоритма, который в реальном времени, без применения преобразования Фурье, осуществляет диагностику исполнительных устройств, используя лишь данные штатных датчиков температуры и знание периодов управляющих сигналов.

Проведённый анализ и изучение переходных процессов датчиков температуры в сушильной камере, в совокупности с практической реализацией, демонстрируют общий методологический принцип: задачу, основанную на

эмпирических наблюдениях технолога, можно формализовать и перевести в вид, пригодный для реализации на программируемом логическом контроллере (ПЛК). Ключевым аспектом здесь является преобразование качественных выводов о взаимосвязях параметров в математические зависимости и дискретные алгоритмы, работающие в реальном времени.

В рамках данной работы была успешно решена одна из типовых задач промышленной автоматизации — обнаружение нештатной ситуации в каналах управления электроприводами. Разработанный метод основан на комплексном анализе переходных процессов с «сухого» и «влажного» термометров, что позволяет косвенно, без установки дополнительных датчиков, контролировать состояние исполнительных механизмов. Конечным результатом стал алгоритм, разработанный на языке CFC (Continuous Function Chart), который структурно и функционально соответствует требованиям стандарта IEC 61131-3.

Преимущество такого решения заключается в его повторяемости и относительной простоте внедрения. Программист, работающий с большинством современных ПЛК, поддерживающих указанный стандарт, может реализовать данный алгоритм без необходимости глубокого погружения в физику процесса, используя готовые функциональные блоки фильтрации и моделирования запаздывания. Представленный подход не только решает конкретную техническую задачу, но и предлагает типовую методологию для диагностики систем, где прямое измерение состояния исполнительных устройств затруднено или экономически нецелесообразно.

Заключение к главе 2

В рамках второй главы рассмотрены технологические процессы работы рекуператора в составе систем вентиляции комплекса осушения пиломатериалов. Произведен синтез математической модели на основе известных решений с применением теплообменника в системах ГВС. Различия с рассматриваемой моделью заключаются в подогреваемой среде: система ГВС – вода; система вентиляции – воздух. Выполнено моделирование в программной среде SciLab xCos с последующим выводом результатов. При разработке были учтены особенности работы системы в условиях помех. В 3 главе рассмотрены натурные испытания объекта с алгоритмом, разработанным на основе представленной математической модели.

Процесс синтеза моделей для системы рекуперации включал две стадии. После разработки адекватной модели проводились полевые эксперименты без учёта влияния внешних возмущений, что привело к неконтролируемым переходам в режим работы с пониженной эффективностью. На второй стадии моделирования внешние воздействия были учтены и внедрён наблюдатель состояния, что обеспечило возможность качественной оценки степени замерзания на основе зашумлённого значения перепада давления в теплообменнике.

Для системы осушения пиломатериалов произведен анализ архива переходных процессов при работе в штатном состоянии. При анализе учитывались показания «сухого» и «мокрого» датчиков, управляющие сигналы

для заслонок и электродвигателей вентиляторов. Были замечены некоторые закономерности при запуске и останове вентиляторов, открытии и закрытии заслонок.

В третьей главе описаны результаты экспериментов с работой систем в нештатном режиме, обозначены закономерности показаний «сухого» и «мокрого» датчиков при различных состояниях заслонок и вентиляторов. Предложены варианты практического применения полученных результатов.

Глава 3. Реализация и обработка результатов

В текущей главе определена структура автоматизации технических средств с подробным обозначением всех компонентов структуры. Для организации сбора данных и контроля состояния определена система диспетчеризации. В главе представлена аппаратная реализация описанных во второй главе решений на основе общеизвестных промышленных средств. Произведен анализ полученных данных.

3.1. Организация средств управления и сбора данных

Для организации корректной работы систем управления и сбора данных необходимо предоставить работоспособную структуру аппаратной части. Для обоих случаев (система общеобменной вентиляции и комплекс осушения пиломатериалов) в рамках данной работы актуальна следующая структура (Рисунок 3.1).

Нижний уровень – уровень датчиков и исполнительных механизмов; средний уровень – уровень промышленных контроллеров (ПЛК), средств управления (а также средств связи с высоким уровнем); верхний уровень – сетевое оборудование, управляющий ПК или scada-система (уровень операторских и диспетчерских станций) [].

Ниже представлена структурная схема средств автоматизации (Рисунок 3.1) для узла рекуперации в составе вентиляционной установки.

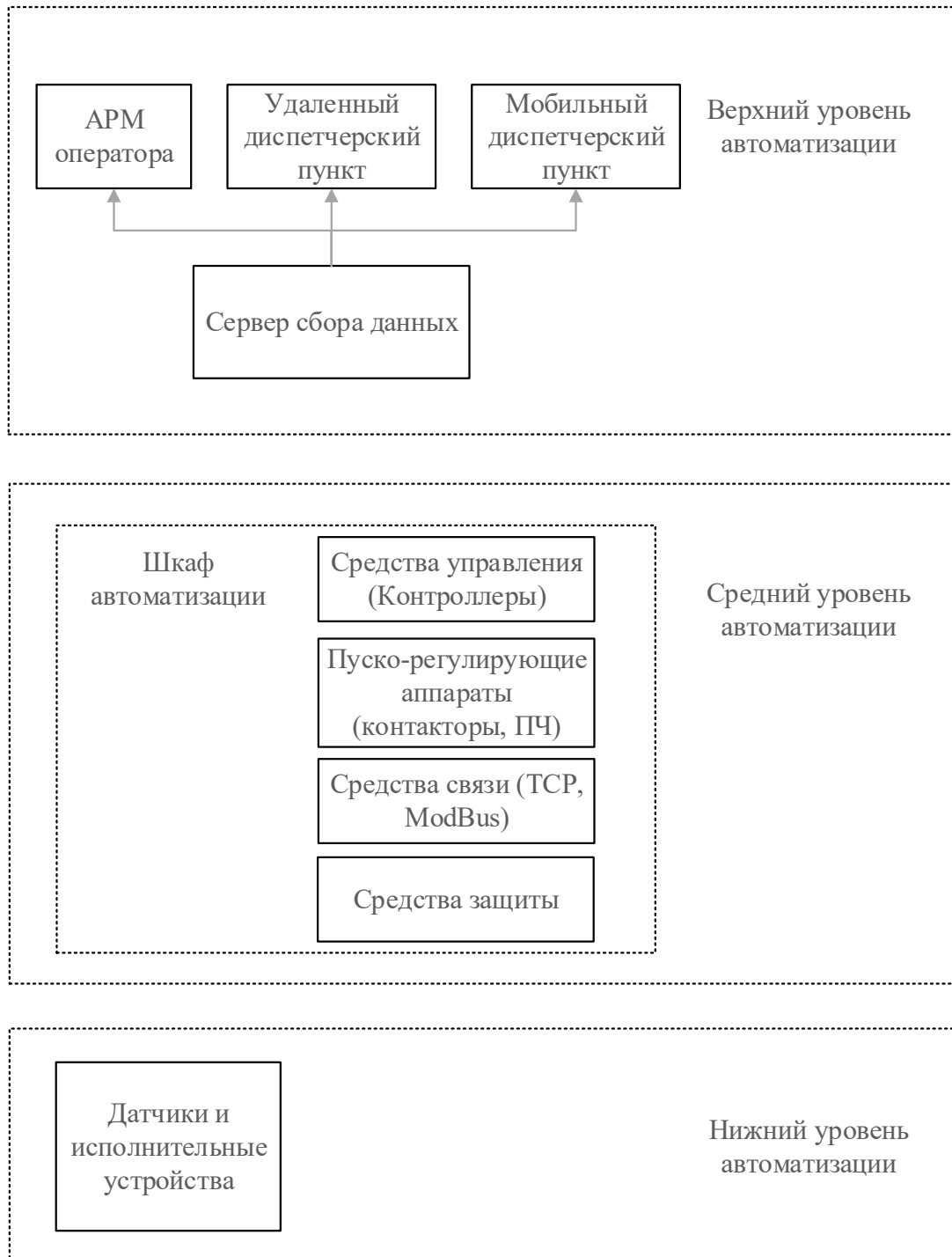


Рисунок 3.1 – Структура средств автоматизации объекта

Согласно стандартной структуре [85, 86] (Рисунок 3.1), к нижнему уровню автоматизации стоит причислить датчики температуры, датчики (реле) перепада давления, заслонки с электрическим приводом, а также циркуляционный насос.

К среднему уровню относятся частотный преобразователь для циркуляционного насоса и шкаф автоматизации с установленными в нем ПЛК для принятия и обработки сигналов с устройств нижнего уровня и передачи сигналов управления циркуляционным насосом. Стоит отметить, что изначально система выполнялась на ПЛК ВЭСТ-02 фирмы ООО «НПО ВЭСТ», однако для универсализации и распространения итогового решения описание выполнено для ОВЕН ПЛК, программирование которого осуществляется на платформе CoDeSys. Данная среда программирования поддерживается множеством ПЛК, в том числе и разработанными отечественными компаниями [Ошибка! Источник ссылки не найден., 87]. Также в составе шкафа автоматизации имеется средство связи для передачи данных на верхний уровень. Применяется устройство типа MOXA NPort [89], которое позволяет преобразовать сигнал по интерфейсу RS-485 в Ethernet.

К верхнему уровню автоматизации относятся сервер сбора данных, расположенный в городском диспетчерском пункте, АРМ оператора со стационарной SCADA-системой, мобильная SCADA-система [110].

На нижнем уровне автоматизации присутствуют датчики температуры, формирующие психрометр, электроприводные заслонки и вентиляторы.

К среднему уровню автоматизации относится шкаф автоматизации с установленным в нем ПЛК и средством передачи данных на верхний уровень. Как и в случае с системой рекуперации, ПЛК подключен к преобразователю RS-485-Ethernet.

Верхний уровень состоит из сервера приема и обработки данных, установленного в помещении оператора сушильной камеры, АРМ оператора, а также мобильного средства контроля состояния сушильной камеры.

Согласно Рисунок 3.1, взаимодействие между различными аппаратными компонентами осуществляется следующим образом.

Аналоговый сигнал от датчиков передаётся на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) регулятора, который затем обрабатывает полученную информацию. В данной системе используется скалярное управление, здесь частота вращения двигателя определяется входным напряжением и частотой, установленной преобразователем частоты. Установка параметров для преобразователя частоты производится при помощи аналогового сигнала 0–10 В, отправляемого от ПЛК.

Коммуникация между контроллером высокого уровня и системой осуществляется посредством интерфейса RS-485 (или RS-232), основанного на протоколе ModBus RTU. Для прямого подключения ПК к контроллеру необходимо использовать преобразователь интерфейса (RS-485 to USB) при использовании RS-485 или наличие COM-порта при использовании RS-232. Для удаленного доступа к устройствам и взаимодействия со SCADA-системой (Рисунок 3.2) потребуется интернет-коммуникатор.

Подробный выбор датчиков описан в главе 1.

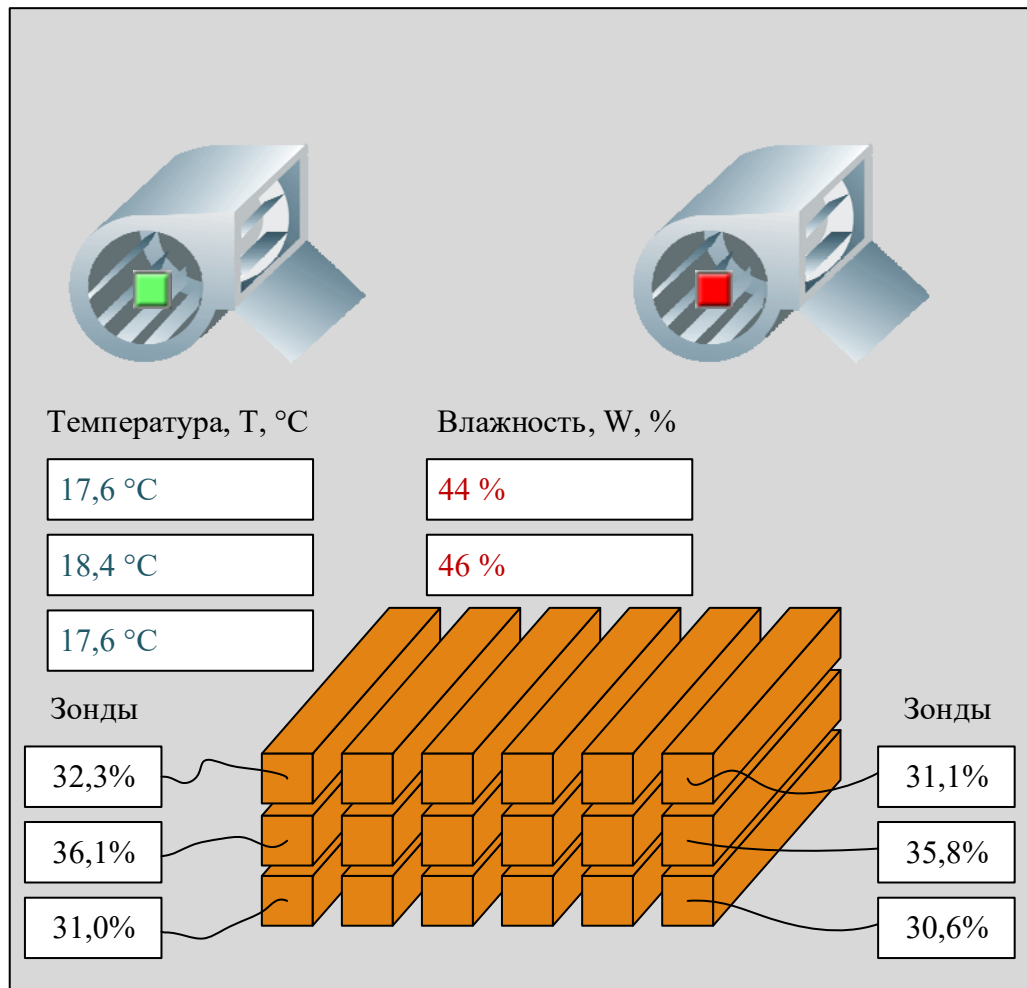


Рисунок 3.2 – Мнемосхема системы осушения пиломатериалов.

В работе определена структура аппаратных средств автоматизации, обеспечивающая реализацию разработанных алгоритмов управления для узла рекуперации и комплекса осушения пиломатериалов. Представленная иерархическая структура включает нижний уровень (датчики и исполнительные механизмы), средний уровень (программируемые логические контроллеры, частотные преобразователи) и верхний уровень, основу которого составляет система диспетчеризации. На верхнем уровне осуществляется централизованный сбор, архивация и визуализация технологических параметров. Мнемосхемы, реализованные в SCADA-системе, обеспечивают

оперативный контроль состояния оборудования, отображение текущих значений технологических переменных, регистрацию переходных процессов и формирование сигналов о возникновении нештатных ситуаций. Интеграция диспетчерского уровня в общую структуру автоматизации позволяет реализовать единое информационное пространство для мониторинга и управления объектом, снижая нагрузку на оперативный персонал и повышая надёжность контроля технологического процесса.

3.2. Реализация алгоритмов на ПЛК

Для интеграции данной модели с физическим устройством необходимо подключить модель к реальным ПЛК. Из системы моделирования удалены компоненты, связанные с моделью, и оставшиеся незадействованные связи представляют собой датчики или исполнительные механизмы (Рисунок 3.3).

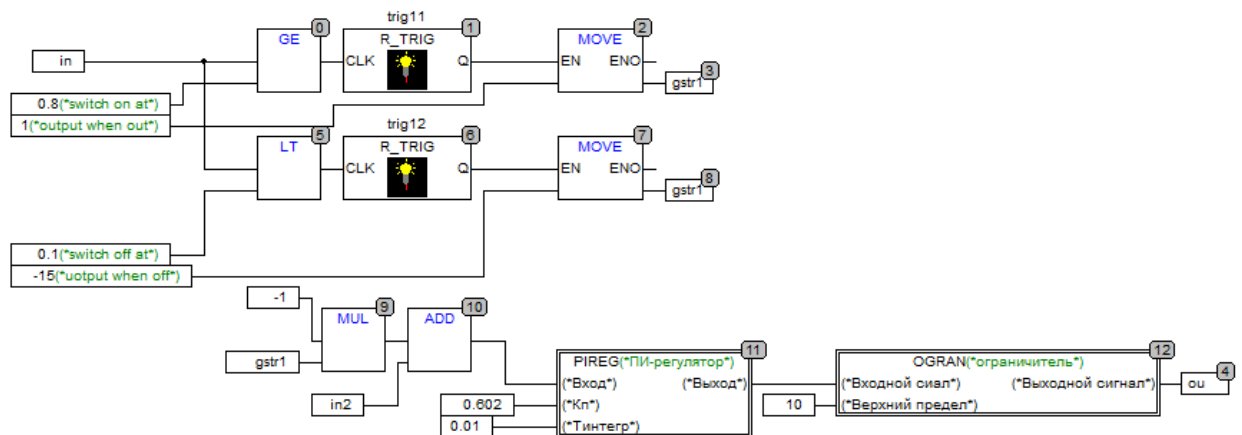


Рисунок 3.3 – Схема для настройки контроллера

Выбор логического контроллера производится из модельного ряда контроллеров ОВЕН ПЛК, так как данный вид программируемых контроллеров поддерживается средой CoDeSys [94, 95]. Основанием для выбора служит

описание моделей из главы 2. Структура для выбора контроллера обозначена на рисунке (Рисунок 3.4)



Рисунок 3.4 – Модельный ряд контроллеров ОВЕН ПЛК150-220

В результате был выбран ОВЕН ПЛК150-220.А-L.

Представленный контроллер питается от сети 220 В и имеет четыре аналоговых входа и два выхода, этого достаточно для реализации данного решения.

Ко входу «in» (in) разработанной модели необходимо подключить датчик перепада давления для контроля уровня заиневаания. Уровень заиневаания измеряется в относительных единицах (где 0 – полное заиневаание, 1 – без инея). Для данного датчика использован аналоговый вход 1.

Для оценки перепада давления используется дифференциальный преобразователь давления Polar Bear DPM-2500D.

Необходимо произвести настройку в CoDeSys (Рисунок 3.5)

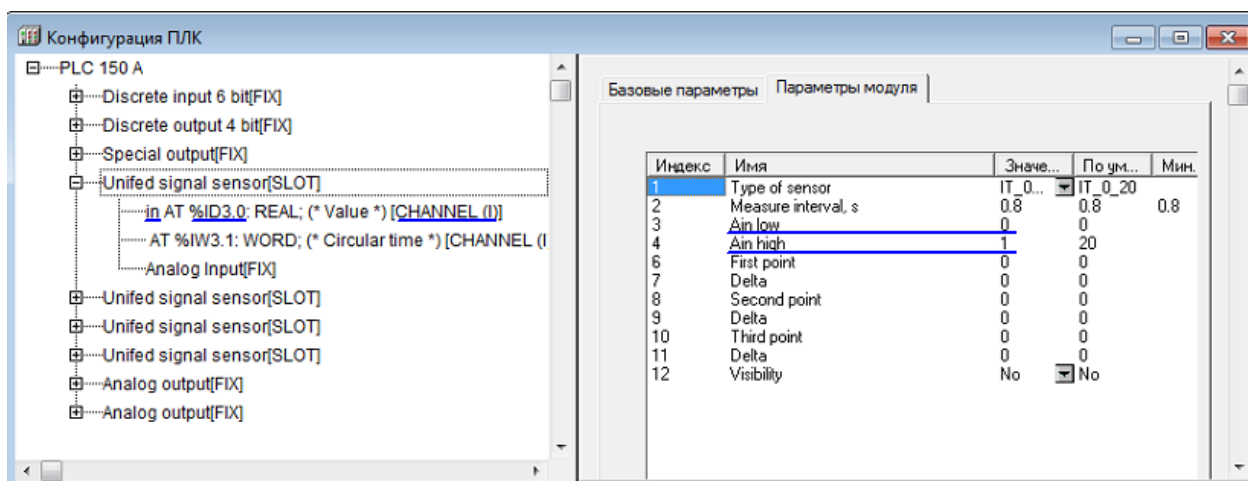


Рисунок 3.5 – Настройка датчика в среде CoDeSys

Данному входу соответствует идентификатор № 3. Также здесь присвоена переменная «in» и предельные значения соответствуют 0 и 1.

Аналогично производится настройка датчика температуры, который подключается ко входу «in2».

В случае ограниченного бюджета в системе можно использовать дифференциальное реле давления, переключающее систему в соответствующий режим при определенных заданных условиях.

В данном случае в системе применен датчик Polar Bear DPS-500N производства компании «Арктика».

Привязка датчика к системе осуществляется в программной среде CoDeSys, схема подключения представлена на Рисунок 3.6, где выход «relay1» является нормально открытым контактом реле давления, а «relay2» – нормально закрытым. При достижении предельных значений реле срабатывает и элемент «MOVE» пропускает сигнал задания ((*output when off*) и (*output when out*)), при этом фиксируясь триггером.

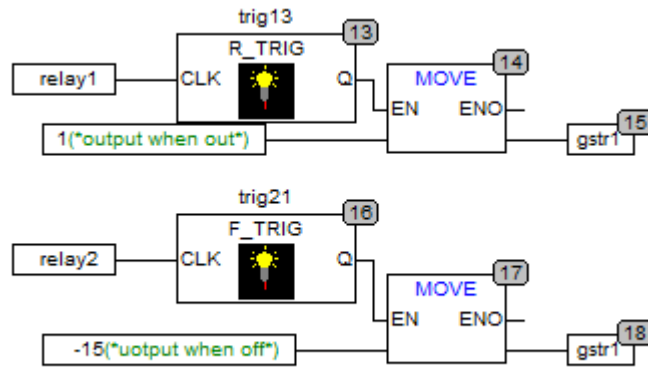


Рисунок 3.6 – Схема подключения выходов реле Polar Bear DPS-500N

Данные выходы будут подсоединены к дискретным входам предоставленного логического контроллера (Рисунок 3.7).

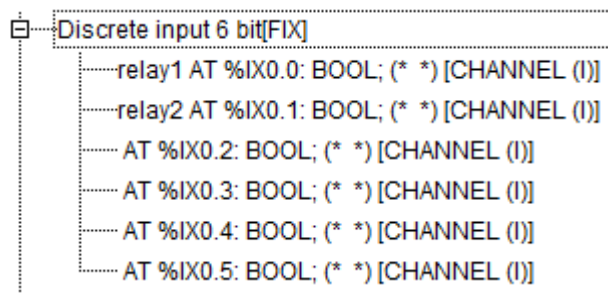


Рисунок 3.7 – Подключение выходов реле перепада давления

Выбраны датчики температуры с характеристикой PT1000.

Настройка в CoDeSys показана на Рисунок 3.8.

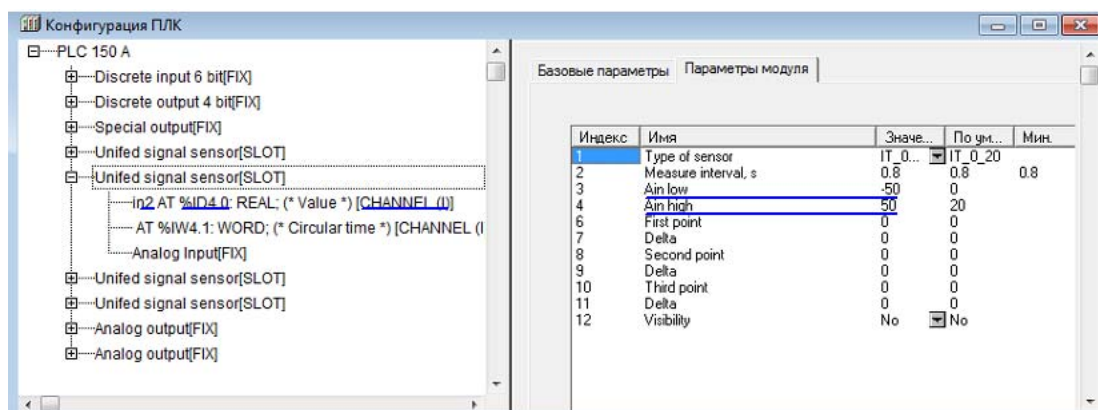


Рисунок 3.8 – Настройка датчика в среде CoDeSys

Данному входу соответствует идентификатор № 4. Также здесь присвоена переменная «in2» и предельные значения соответствуют –50 и 50.

Аналогично с выходом (Рисунок 3.9).

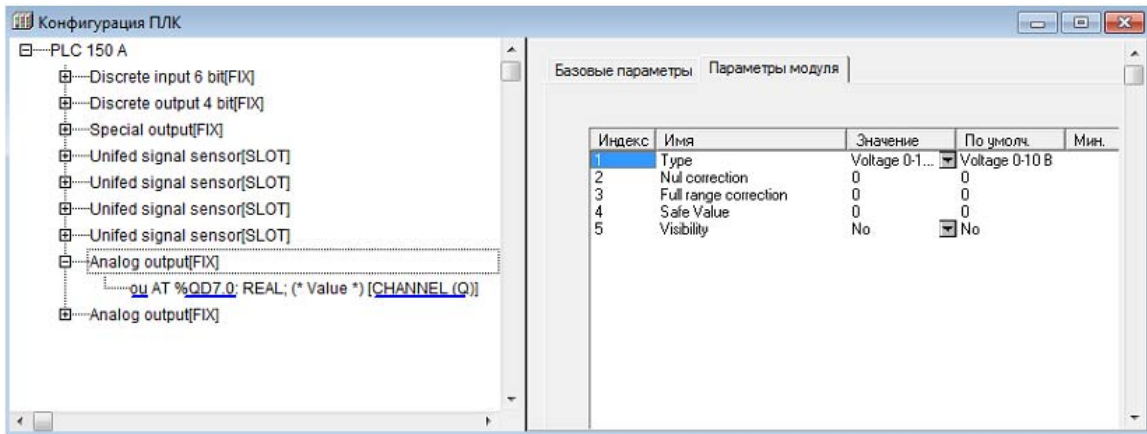


Рисунок 3.9 – Настройка аналогового выхода в среде CoDeSys

Выходу, соответствующему идентификатору Q, назначена переменная "ou", а пределы управляющего сигнала соответствуют диапазону от 0 до 10 В.

После внедрения данного алгоритма работы системы рекуперации на объекте практически полностью исчезли остановки, связанные с обмерзанием вытяжного канала вентиляции (Рисунок 3.10).



а – Вытяжной калорифер с инеем



б – Вытяжной калорифер после разморозки

Рисунок 3.10 – Вытяжной калорифер рекуператора до и после разморозки

На рисунке 3.10 представлено сопоставление состояния вытяжного калорифера до и после реализации предложенного метода разморозки: левая часть иллюстрирует наличие выраженных инеевых наростов, препятствующих штатной работе установки, правая — состояние теплообменника после завершения цикла оттаивания. Представленные фотоматериалы наглядно подтверждают эффективность предложенного подхода и работоспособность реализованного алгоритма в реальных условиях эксплуатации.

В работе выполнена практическая реализация разработанных алгоритмов управления и диагностики на базе программируемого логического контроллера. На основе синтезированных в главе 2 математических моделей осуществлена дискретизация непрерывных звеньев, выполнена настройка параметров регуляторов и произведена привязка программных модулей к физическим каналам ввода-вывода. Уделено внимание интеграции наблюдателя переменных состояния процесса заиввания, обеспечивающего устойчивую оценку степени обмерзания теплообменника в условиях зашумлённого измерительного сигнала. Результатом внедрения разработанного алгоритма в систему управления рекуперацией стало практическое устранение остановок, связанных с обледенением вытяжного канала.

3.3. Анализ данных в системе осушения пиломатериалов

В предыдущем параграфе рассмотрена реализация алгоритма разморозки вытяжного канала рекуператора, подтверждённая визуальным сопоставлением состояния калорифера. В отличие от данного подхода, диагностика исполнительных механизмов системы осушения пиломатериалов требует количественного анализа переходных процессов. В настоящем параграфе представлены результаты обработки архивных значений технологических параметров, зарегистрированных в штатных и нештатных режимах работы. Для оценки работоспособности вентиляторов и воздушных заслонок рассмотрены методы анализа сигналов управления и температурных откликов сухого и влажного датчиков.

Представлен алгоритм реализации блока диагностики (Рисунок 3.11) на языке непрерывных функциональных схем (CFC) стандарта IEC (МЭК)-61131-3 [76–78].

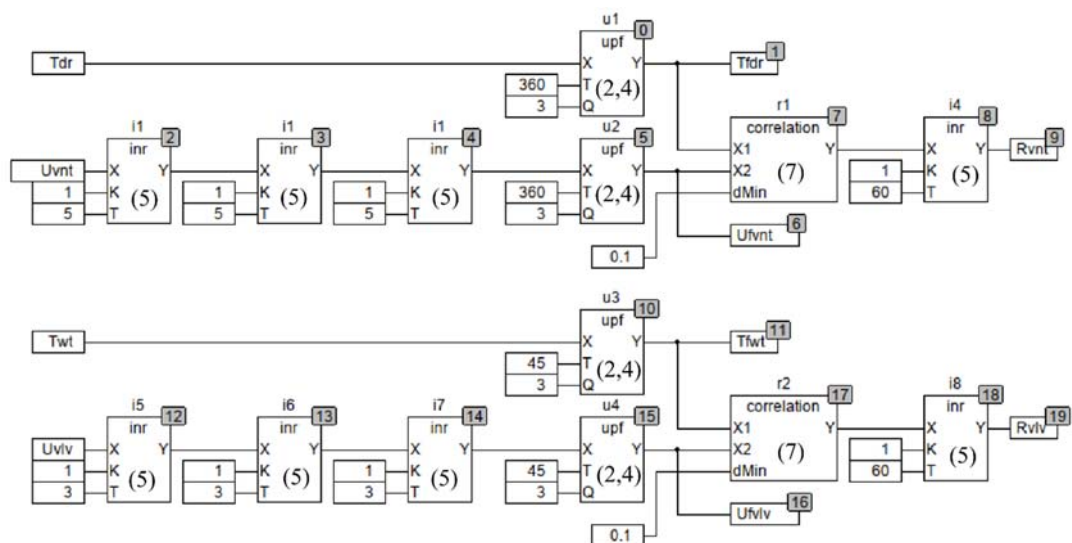


Рисунок 3.11 – Алгоритм блока диагностики на языке CFC

Функциональные блоки узкополосных фильтров реализованы согласно выражениям (2.15) и (2.17). Аперидическое инерционное звено представлено разностным уравнением:

$$y_0 = y_1 + \frac{t_d(kx - y_1)}{T_o} \quad (3.1)$$

где k – коэффициент передачи звена; T_o – время инерции.

На Рисунок 3.11 также присутствуют блоки вычисления нормированной корреляции сигнала управления и его отклика на значениях датчиков температуры. Из классического выражении для вычисления корреляции

$$R(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{\sum(u_{upf}T_{upf})}{\sqrt{\sum u_{upf}^2 \sum T_{upf}^2}} \quad (3.2)$$

принято решение вместо суммы по всей выборке использовать свойство аперидического звена (3.1) усреднять значения за время выборки, примерно равное времени инерции T_o . В выражении (3.2) u_{upf} – значение выхода узкополосных фильтров для сигнала управления; T_{upf} – значение выхода узкополосных фильтров для сигнала температуры.

Элемент вычисления корреляции без усреднения представлен выражением

$$r_i(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{u_{upf}T_{upf}}{\max(|u_{upf}T_{upf}|, \sigma)} \quad (3.3)$$

где существует вероятность деления на ноль, которая исключается введением малого значения ($\sigma \approx 0,1$) (3.3). С выхода элемента вычисления корреляции сигнал поступает на блок усреднения.

Ниже (Рисунок 3.12) представлены результаты работы блока диагностики в виде переходных процессов в штатном режиме работы камеры сушки.

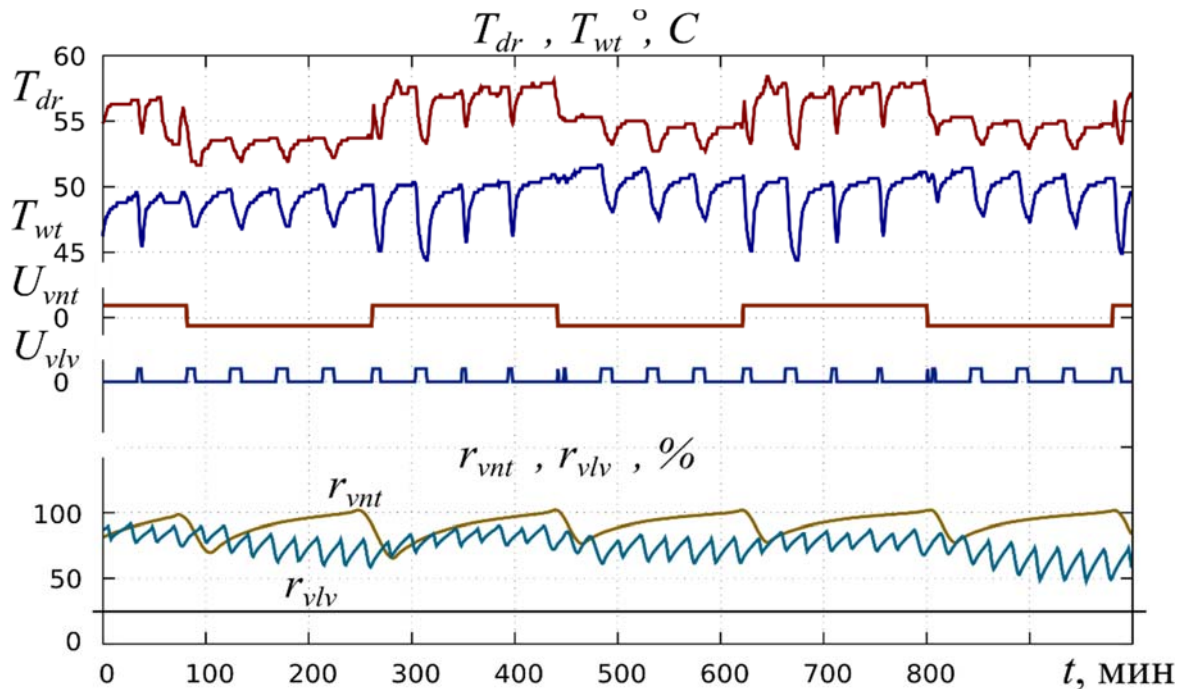


Рисунок 3.12 – Переходные процессы на выходах блоков корреляции

Сигнал на выходе блока корреляции нормирован относительно единицы, и, если принять критический уровень ($\approx 25\%$) корреляции спектра сигналов управления и температуры, можно, сравнивая с ним, принять решение о работоспособности электроприводов по каналу управления вентиляцией (r_{vnt}) и положением заслонки (r_{vlv}).

Для тестирования блока диагностики использованы архивные значения сигналов в условиях, когда оператор использовал ручной режим управления. В этом случае блок диагностики должен определить факт несоответствия управления и поведения объекта. Ниже (Рисунок 3.13) показаны переходные процессы системы в нештатной ситуации.

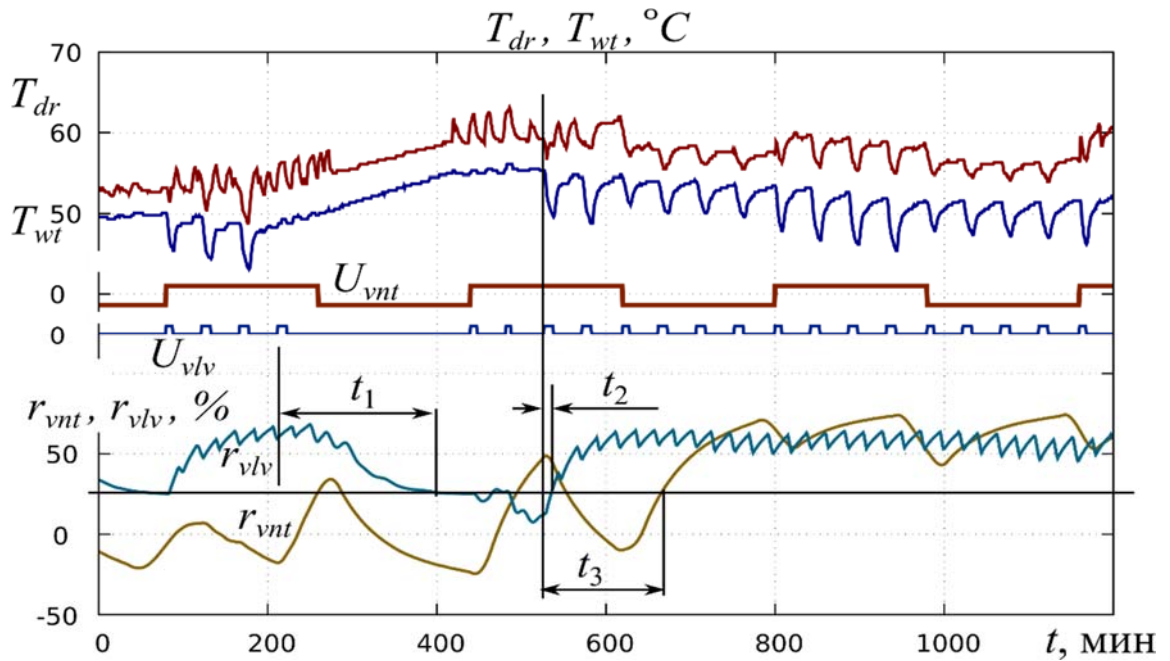


Рисунок 3.13 – Переходные процессы при нештатной ситуации

Анализ графиков демонстрирует отклонения в работе заслонок, вызванные нарушениями штатного режима функционирования. Выходные блоки корреляций обеспечивают корректную оценку управляемости системы и своевременное выявление аварийных ситуаций. Время восстановления нормального состояния составляет до 80 минут для канала управления положением заслонки, 5–8 минут для управления приводами заслонки и 60 минут для канала вентиляции.

На основании исследований [143] авторы представляют ключевые выводы, полученные в ходе анализа переходных процессов осциллирующего метода сушки. Основное внимание уделяется возможностям оценки влажности пиломатериала и работе резистивных датчиков влажности (РДВ). Было установлено, что постоянные времени влажного датчика температуры, хотя и могут быть точно аппроксимированы, не показывают прямой корреляции с

влажностью древесины и не могут быть использованы для её непосредственного определения. Напротив, психрометрическая разность (ΔT_1) — разность показаний сухого и влажного термометров — в периоды закрытия заслонок и перемешивания воздуха позволяет оценить равновесную влажность древесины (EMC - Equivalent Moisture Content) с высокой точностью, до 2%. На основе этого был разработан алгоритм автоматической тарировки РДВ, который рассматривается в работах других исследователей [143, 147].

Таким образом, выход показаний за пределы допустимой области является важным диагностическим признаком, который позволяет системе заблаговременно обнаружить неисправность и предотвратить порчу пиломатериала за счёт перехода на аварийный режим работы или остановки процесса.

Результаты исследования позволяют интегрировать механизм оповещения о возникновении нештатных ситуаций в систему мониторинга технологических процессов, обеспечивая оперативное реагирование оператора на отклонения в технологическом регламенте.

Разработанная принципиальная схема (Приложения 1, 2) пригодна для реализации в реальных условиях и служит руководством для монтажников при сборке и установке оборудования. Компоненты схемы выбраны согласно утвержденным методикам и доступны для приобретения. Монтажнику необходим квалификационный разряд не ниже третьего уровня и группа допуска по электробезопасности не менее третьей категории.

Эксплуатация и тестирование установки требуют соблюдения требований нормативных документов, включая «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей», «Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» и стандарты ГОСТ 12.3.019.

Заключение к главе 3

В главе представлены результаты реализации модели на реальном объекте. Разработана структура средств автоматизации для рекуперативной системы и комплекса осушения пиломатериалов. В качестве программного обеспечения выбран CoDeSys — популярная платформа для программирования ПЛК, совместимая с широким спектром контроллеров разных производителей, что обеспечивает унификацию реализованного решения. В настоящем проекте использован программируемый логический контроллер отечественного производства.

Проверка работоспособности системы проводилась непосредственно на реальном объекте и подтвердила свою эффективность: удалось решить проблему обледенения вытяжного канала вентиляции и устранить ложные срабатывания в условиях внешних помех.

Для системы осушения пиломатериалов проведен анализ переходных характеристик, позволивший установить зависимости между показаниями сухих и влажных датчиков температуры и работой исполнительных механизмов. Для обработки данных использовался узкополосный фильтр. Оценка работоспособности электродвигателей заслонок и вентиляторов производится блоком корреляции, а результатом проведенных исследований стал блок диагностики. Эффективность работы блока диагностики подтверждена результатами анализа процесса осушения, при котором оператор использовал ручное управление комплексом осушения пиломатериалов.

Тестирование блока диагностики проводилось с использованием архивных значений сигналов, зафиксированных в условиях ручного управления объектом оператором. Блок диагностики успешно определял несоответствие между управлением и поведением объекта, демонстрируя способность к оценке управляемости и выявлению нештатных ситуаций. Восстановление штатной ситуации занимало до 80 минут для канала управления положением заслонки, 5–8 минут для привода заслонки и 60 минут для управления вентиляцией.

Дополнительно сформулированы требования к квалификации обслуживающего персонала и описаны особенности организации системы связи объекта с оператором. Представлено описание системы диспетчеризации объектов, предусматривающее сбор и архивацию данных.

На основе собранных данных разработана принципиальная схема, пригодная для монтажа реальной системы. Эта схема послужила основой для монтажных работ и содержит всю необходимую информацию для специалистов по монтажу, что облегчает процесс сборки и установки. Все компоненты схемы подобраны в соответствии с методиками, изученными в процессе обучения, и соответствуют требованиям проекта.

Разработана и апробирована методика автоматизации процесса осциллирующей сушки пиломатериалов на основе комплексного анализа данных. Доказана эффективность алгоритмов тарирования резистивных датчиков влажности в реальном времени с использованием переходных

процессов сушки и психрометрических измерений. Предложенная система управления обеспечивает автоматический переход между этапами сушки с валидацией данных, диагностикой отказов и резервным управлением по равновесной влажности. Методика демонстрирует устойчивую работу для конкретных условий эксплуатации и пород древесины, обеспечивая снижение влияния человеческого фактора и улучшение качества конечной продукции. Дальнейшее развитие системы предполагает внедрение технологий искусственного интеллекта для повышения точности прогнозирования.

Заключение

В ходе выполнения диссертационного исследования были достигнуты следующие результаты:

Структурировано и описано функционирование технологического процесса сушки пиломатериалов, определены уровни автоматизации с учётом специфики объекта, что позволило разработать эффективные подходы к управлению производственными процессами.

Синтезирована математическая модель системы управления тепловым рекуператором, применяемого в вентиляционном оборудовании. Модель учитывает ключевые параметры объекта, позволяющие определять признаки наступления нештатных ситуаций. В частности, был использован перепад давления в вытяжном канале рекуператора как индикатор состояния системы. Процесс синтеза моделей для системы рекуперации включал две стадии. После разработки адекватной модели проводились полевые эксперименты без учёта влияния внешних возмущений, что привело к неконтролируемым переходам в режим работы с пониженной эффективностью. На второй стадии моделирования внешние воздействия были учтены и внедрён наблюдатель состояния, что обеспечило возможность качественной оценки степени замерзания на основе зашумлённого значения перепада давления в теплообменнике.

Разработан метод оценки состояния вытяжного канала, основанный на наблюдателе переменных состояния процесса заивевания. Этот метод

обеспечивает достаточно точную оценку степени обледенения, что позволяет оперативно реагировать на изменения в системе и переключаться между рабочими режимами даже в условиях внешних помех. Методика обеспечивает эффективное оттаивание элементов системы, поддерживая при этом требуемую производительность для возврата к нормальному функционированию после нештатных ситуаций.

Созданы методы анализа частотных характеристик и спектрального анализа переходных процессов психрометрической разности температур в системах осушения древесины. Эти методы позволяют объективно оценивать работу заслонок и вентиляторов без использования дополнительных датчиков перепада давления и влажности, что уменьшает сложность и стоимость технического обслуживания.

Доказано, что поддержание работоспособности системы осушения пиломатериалов и узла рекуперации воздуха возможно за счёт внедрения, по большей мере, программных решений и добавления функциональных модулей, без модификации физической структуры системы. Это существенно снижает издержки на модернизацию уже существующей инфраструктуры.

Разработан алгоритм автоматической калибровки резистивных датчиков в реальном времени, использующий данные переходных процессов и психрометрических измерений для компенсации погрешностей. Многоуровневая система управления включает автоматический переход между

этапами сушки, валидацию данных и резервное управление по расчетным параметрам при отказах датчиков.

Апробация подтвердила эффективность методики для конкретных условий, с необходимостью периодической корректировки коэффициентов при смене сезона или породы древесины. Перспективы развития связаны с интеграцией методов машинного обучения для повышения точности управления процессом сушки.

Подготовлена система дистанционного контроля и сбора данных о переходных процессах на объектах, что даёт возможность вести мониторинг их состояния в режиме реального времени, обеспечивая оперативное реагирование оператором на любые отклонения.

Несмотря на отсутствие интеграции системы рекуперации в состав комплексного осушителя пиломатериалов, данная система была успешно исследована в составе общеобменной вентиляции жилого дома в условиях сурового зимнего климата Якутии (посёлок Жатай). Результаты исследования подтверждают целесообразность применения предложенных методик для повышения надёжности и эффективности вентиляционных систем в сложных эксплуатационных условиях.

Полученные результаты представляют значительный интерес для развития технологий автоматизации и управления в сфере вентиляции и осушения, предлагая новые пути повышения эффективности и устойчивости работы соответствующих систем в экстремальных климатических условиях.

Список условных обозначений

1. *Штатный режим работы* – все компоненты системы работают исправно (датчики, насосы, вентиляторы, заслонки, рекуператоры).
2. *Нештатный режим* функционирования системы в контексте настоящей работы:
 - Обледенение вытяжного канала рекуператора, сопровождающееся невозможностью отвода вытяжного воздуха.
 - Нарушение работоспособности исполнительных устройств: вентиляторов, воздушных клапанов, электроприводов и других компонентов.
3. *Рекуператор в системах вентиляции* – устройство, позволяющее передавать тепловую энергию вытяжного воздуха приточному.
4. *Система диспетчеризации* – совокупность систем сбора, обработки и отображения данных на удаленном автоматизированном рабочем месте.
5. *Нижний уровень автоматизации* – уровень измерительных и исполнительных устройств.
6. *Средний уровень автоматизации* – уровень устройств управления, сбора и обработки первичных сигналов.
7. *Верхний уровень автоматизации* – уровень диспетчеризации, серверов, автоматизированных рабочих мест.
8. *Исполнительные устройства* – в рамках работы к ним можно причислить двигатели вентиляторов, частотные преобразователи, приводы жидкостных и воздушных клапанов.

9. Мнемосхема – совокупность сигнальных устройств и сигнальных изображений оборудования и внутренних связей контролируемого объекта, размещаемых на диспетчерских пультах, операторских панелях или выполненных на персональном компьютере. Информация, которая выводится на мнемосхему, может быть представлена в виде аналогового, дискретного и релейного сигнала, а также графически.
10. Тарировка – процесс корректировки показаний путем сравнения с эталонными значениями
11. T_{out} – Температура приточного воздуха до рекуператора.
12. T_{inp} – Температура приточного воздуха после рекуператора.
13. T_{room} – Температура вытяжного воздуха до рекуператора.
14. T_{frost} – Температура вытяжного воздуха после рекуператора.
15. T_{front} – Температура прямого теплоносителя в контуре рекуператора.
16. $T_{reverse}$ – Температура обратного теплоносителя в контуре рекуператора.
17. $Q_{потерь}$ – количество потерь, выбрасываемых на улицу установкой, Гкал/год.
18. G – производительность вентилятора, м³/час.
19. $T_{отоп.пер}$ – время работы установки в течение отопительного сезона, ч.
20. Δt – разница температур между удаляемым и наружным воздухом (среднее за отопительный сезон), °С.
21. ρ – плотность воздуха, кг/м³.
22. η – эффективность рекуператора.

23. ΔW – годовая экономия, кВт·ч.
24. $T_{\text{год}}$ – время работы установки в течение года, ч.
25. $N_{\text{сущ}}$ – электрическая мощность существующей установки, Вт.
26. $N_{\text{нов}}$ – электрическая мощность установки с рекуператором, Вт.
27. $\Delta \mathcal{E}$ – годовая экономия, руб/год.
28. $T_{\text{тэ}}$ – тариф на тепловую энергию, руб/Гкал.
29. $T_{\text{ээ}}$ – тариф на электрическую энергию, руб/Гкал.
30. τ – текущее время.
31. h – высота перемещения штока клапана.
32. $K_{\text{см}}(\tau)$ – коэффициент перемешивания теплоносителей во внешнем контуре в узле смешения.
33. k_{max}, k_h – коэффициенты, характеризующие нелинейные свойства процесса смешения.
34. $T_{\text{пр}}$ – время полного хода привода исполнительного механизма от 0 до 100 %.
35. $u(\tau)$ – управляющее воздействие электроприводом клапана, принимающее одно из дискретных значений.
36. $t_{\text{вд1}}(\tau)$ – температура теплоносителя на входе ТЭС во внешнем контуре.
37. t_1 – температура теплоносителя, поступающего из магистральной сети.
38. $T_{\text{см}}$ – постоянная времени смешения на клапане.
39. $T_{\text{т}}$ – постоянная времени в теплообменнике.
40. $T_{\text{бк}}$ – постоянная времени в промежуточном накопителе.

41. $T_{х.в}$ – постоянная времени в узле ввода холодной воды.
42. $t_{об}$ – температура обратного теплоносителя на выходе внешнего контура ТОС.
43. $t_{пл2}$ – температура теплоносителя на выходе внутреннего контура ТОС.
44. $t_{об2}$ – температура обратного теплоносителя на входе внутреннего контура ТОС.
45. k_T – коэффициент эффективности теплообменника.
46. $t_{пл3}$ – температура теплоносителя на выходе промежуточного накопителя, расположенного во внутреннем контуре.
47. $t_{об3}$ – температура обратного теплоносителя перед узлом смешения с холодной водой.
48. $\tau_{z(i)}$ – время транспортного запаздывания теплоносителя в i -м вторичном контуре (i -м стояке-ответвителе).
49. $t_{обz(i,j)}$ – эквивалентная температура обратного теплоносителя в инерционных звеньях, используемых для аппроксимации транспортного запаздывания.
50. $k_{х.в}$ – коэффициент влияния холодной воды на теплоноситель во внутреннем контуре.
51. $k_{ост}$ – коэффициент остывания теплоносителя во внутреннем контуре.
52. n – количество вторичных контуров (стояков-ответвителей) ТОС.
53. m – количество инерционных звеньев, аппроксимирующих транспортное запаздывание.

54. $t_{\text{ком}}$ – комнатная температура.
55. T_{T1} – постоянная времени первого теплообменника.
56. T_{T2} – постоянная времени второго теплообменника.
57. k_{t1} – коэффициенты эффективности первого теплообменника.
58. k_{t2} – коэффициенты эффективности второго теплообменника.
59. t_{out} – температура внешнего воздуха, поступающего в систему.
60. t_{inp} – температура поступающего в помещение воздуха.
61. t_{room} – температура из помещения.
62. t_{frost} – температура выходящего воздуха.
63. t_{front} – температура остывшего (прямого) теплоносителя.
64. t_{rev} – температура нагретого (обратного) теплоносителя.
65. $U_{\text{pid in}}(\tau)$ – входной сигнал регулятора.
66. $U_{\text{pid out}}(\tau)$ – выходной сигнал регулятора.
67. k_P – пропорциональный коэффициент регулятора.
68. k_I – интегральный коэффициент регулятора.
69. T_{dr} – температура сухого датчика.
70. T_{wt} – температура влажного датчика.
71. U_{vnt} – управление двигателями вентиляции.
72. U_{vlv} – положение заслонки.
73. ω_r – выделяемая частота из спектра, выраженная в радианах.
74. t_d – время дискретизации фильтра.
75. y_0, y_1, y_2 – текущее, прошлое и позапрошлые значения выхода.

76. x_0, x_1 – текущее и прошлое значения входа.
77. k – коэффициент передачи звена.
78. T_o – время инерции.
79. u_{upf} – значение выхода узкополосных фильтров для сигнала управления.
80. T_{upf} – значение выхода узкополосных фильтров для сигнала температуры.

Список сокращений

CFC – Continuous Flow Chart

CoDeSys – Controller development system

FBD – Function Block Diagram

SCADA – Supervisory control and data acquisition

АД – Асинхронный двигатель

АРМ – Автоматизированное рабочее место

АСУ ТП – Автоматизированная система управления технологическим процессом

АФХ – Амплитудно-фазовая характеристика

АЦП – Аналого-цифровой преобразователь

АЧХ – Амплитудно-частотная характеристика

ЗИ – Задатчик интенсивности

КПД – Коэффициент полезного действия

ЛАФХ – Логарифмическая амплитудно-фазовая характеристика

ЛАЧХ – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

ОС – Обратная связь

ПИ – Пропорционально-интегральный регулятор

ПИД – Пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

ПК – Персональный компьютер

ПЛК – Программируемый логический контроллер.

ПП – Переходный процесс

ПЧ – Преобразователь частоты

ТЗ – техническое задание

ШИМ – Широтно-импульсная модуляция

ГВС – горячее водоснабжение

ХВС – холодное водоснабжение

ТОС – теплообменная система

МР – микропроцессорный регулятор

ГВС – горячее водоснабжение

ОМС – осциллирующие методы сушки

РДВ – резистивный датчик влажности

Публикации автора

Статьи в журналах из перечня ВАК

1. Прохоров С.В. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией / С.В. Прохоров, В.В. Нгуен, А.А. Шилин и др. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 109–115.
2. Шилин А. А. Стабилизация температуры в рекуператоре вентиляционной установки с использованием регулируемого электропривода насоса промежуточного теплоносителя/ Шилин А. А., Букреев В.Г., Прохоров С.В., Нгуен В.В. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2020. – Т. 63. – №. 2-3. – С. 24-29.
3. Прохоров С.В., Шилин А.А., Примочкин И.А. Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры. Известия Юго-Западного государственного университета. 2021;25(4):70-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83>

Статьи в журналах из перечня Scopus

4. Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов// Известия Томского политехнического университета.

Инжиниринг георесурсов. –2024. –Т. 335. –№ 6. –С. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500

5. Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025 – Т. 336 – № 7 – С. 174–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201

Публикации в трудах конференций, индексируемых Scopus

6. Savrasov F. V. , Prokhorov S. -. , Shilin A. A. The computer simulation of hoarfrost's clearing process in the air recuperation system // Journal of Physics: Conference Series. - 2017 - Vol. 803 - №. 1, Article number 012134. - p. 1-5
7. Shilin A. A. , Prokhorov S. -. , Shabo A. K. , Bukreev V. G. A method for measuring the amount of hoar frost formation in the recuperation channels of ventilation systems using the adjustable mathematical model of this process // MATEC Web of Conferences . - 2017 - Vol. 141, Article Number 01032. - p. 1-5
8. Shilin A. A. , Bukreev V. G. , Prokhorov S. -. Pressure Pump Power Control in the Primary Circuit of the Heat Exchange System // MATEC Web of Conferences . - 2017 - Vol. 91, Article number 01043. - p. 1-5
9. Prokhorov, Sergey V, Krivoshein, Youri O, Shilin Aleksander A, Automatic control of hot water supply system on solar collectors. Far East Con-2019

10. V. Grechushnikov, O. Kachin and S. Prokhorov, "Automated System of Knowledge Base Acquisition for Lumber Drying Processes," 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 505-509, doi: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272810.

Публикации в трудах конференций

11. Гнеушев В. В. , Шилин А. А. , Прохоров С. В. Частотное управление рекуператором в системе вентиляции // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов II Всероссийской научно - практической конференции, Кемерово, 2-4 Декабря 2015. - Кемерово: КузГТУ , 2015 - С. 1-3.
12. Прохоров С. -. Защита от инея в системах рекуперации на основе поддержания температуры точки росы [Электронный ресурс] // Энергостарт: сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической школы, Кемерово, 11-25 Июля 2016. - Кемерово: КузГТУ , 2016 - С. 1-4.
13. Прохоров С. В. Рекуперативные установки в системах воздухообмена промышленных предприятий // Интеллектуальные энергосистемы: материалы III Международного молодежного форума. В 3 т., Томск, 28 Сентября-2 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 132-136
14. Нгуен В. В., Прохоров С.В. Вычисление энергетически оптимальной температуры холодной панели в системе осушения // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника:

- труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 20-21 Ноября 2018. - Новокузнецк: СибГИУ, 2018 - С. 53-58
15. Прохоров С.В.-. Особенности и проблемы эксплуатации рекуператора воздуха с промежуточным теплоносителем // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 20-21 Ноября 2018. - Новокузнецк: СибГИУ, 2018 - С. 84-90

Патенты на изобретение

16. Шилин А.А., Прохоров С.В., Нгуен В. В. Климатическая камера. Патент на изобретение RU 2718357 С1, 11.06.2020. Заявка № 2019133796 от 24.10.2019.
17. Букреев В.Г., Шилин А.А., Прохоров С.В. Устройство для управления теплопотреблением Патент на изобретение RU 2658193 С1, 19.06.2019. Заявка № 2017130115 от 24.08.2017.
18. Шилин А.А., Прохоров С.В. Устройство для утилизации тепла вытяжного воздуха. Патент на изобретение RU 2655907 С1, 29.05.2018. Заявка № 2017108375 от 13.03.2017.

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ

19. Прохоров С. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660910. Операционная система для программируемого логического контроллера (ПЛК) на базе процессора STM32/ Шилин А. А,

Кривошеин Ю. О., Прохоров С. В., Нгуен В. В. Заявка № 2020618110. Дата поступления 30 июля 2020 г. Зарегистрировано в бюллетене 15 сентября 2020 г.

20. Прохоров С. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610420. Приложение для отображения технологических параметров на основе платформы Android для программируемого логического контроллера (ПЛК) на базе процессора STM32/ Шилин А. А, Кривошеин Ю. О. , Прохоров С. В., Нгуен В. В. Заявка № 2020667577. Дата поступления 28 декабря 2020 г. Зарегистрировано в бюллетене 14 января 2021 г.

Список литературы

1. Badarudin A. Web-based real time air properties display application / A. Badarudin, P. Pratikto, M.A. Falahuddin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 830. – №. 4. – С. 042034.
2. Bell I.H. Algorithms for the calculation of psychrometric properties from multi-fluid Helmholtz-energy-explicit models / I.H. Bell, E.W. Lemmon, A.H. Harvey // International Journal of Refrigeration. – 2018. – Vol. 87. – P. 26–38.
3. Berquist J. Comparison of heat recovery ventilator frost control techniques in the Canadian Arctic: preheat and recirculation / J. Berquist, C. Banister, M Pellissier. // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Vol. 246. – P. 11010.
4. Ouazia B. Performance testing of a residential motorless air exchanger system / B. Ouazia, R. Glazer, F. Szadkowski, C. Hoyme // International Journal of Ventilation ISSN 1473-3315. – 2015. – Vol. 14. – P. 219–230.
5. Chen J. Uncertainty analysis in humidity measurements by the psychrometer method / J. Chen, C Chen. // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – № 2. – P. 368.
6. Correa-Hernando E. Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer / E. Correa-Hernando et al. // Computers and electronics in agriculture. – 2011. – Vol. 78. – № 2. – P. 167–175.

7. Jedlikowski A. Frost formation and freeze protection with bypass for counter-flow recuperators / A. Jedlikowski et al. // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2017. – Vol. 108. – P. 585–613.
8. Smith K.M. Development of a plastic rotary heat exchanger for room-based ventilation in existing apartments / K.M. Smith, S. Svendsen // *Energy and Buildings*. – 2015. – Vol. 107. – P. 1–10.
9. Lamrani B. Energy analysis and economic feasibility of wood dryers integrated with heat recovery unit and solar air heaters in cold and hot climates / B. Lamrani et al. // *Energy*. – 2021. – Vol. 228. – P. 120598.
10. Meng Y. Energy efficiency performance enhancement of industrial conventional wood drying kiln by adding forced ventilation and waste heat recovery system: A comparative study / Y. Meng et al. // *Maderas. Ciencia y tecnología*. – 2019. – Vol. 21. – № 4. – P. 545–558.
11. Nasr M.R. Experimental methods for detecting frosting in cross-flow air-to-air energy exchangers / M.R. Nasr et al. // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – Vol. 77. – P. 100–115.
12. Sonntag D. Humidity Sensors / D. Sonntag et al. // *Springer Handbook of Atmospheric Measurements*. – Cham: Springer, 2021. – P. 209–241.
13. Zhang W. An inexpensive, stable, and accurate relative humidity measurement method for challenging environments / W. Zhang, H. Ma, S.X. Yang // *Sensors*. – 2016. – Vol. 16. – № 3. – P. 398.

14. Шумилов Р.Н. Проектирование систем вентиляции и отопления / Р.Н. Шумилов, Ю.И. Толстова, А.Н. Бояршинова. 2-е изд., испр., доп. – СПб: Изд-во «Лань», 2014. – 336 с. ISBN 978-5-8114-1700-1. EDN TXPJXF.
15. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная ред. СНиП 23-01-99*. – М.: Минрегион России, 2012. – 109 с.
16. Стронгин А.С. Расчетные параметры наружного климата для проектирования систем холодоснабжения, вентиляции и кондиционирования воздуха / А.С. Стронгин, В.А. Воронцов, К.А. Кузнецов // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. – 2020. – № 7. – С. 20–29. EDN HOODMQ.
17. Пыжов В.К. Проектирование и эксплуатация систем кондиционирования, вентиляции и отопления: учебное пособие / В.К. Пыжов, В.К. Пыжов. – Иваново: Ивановский гос. энергетический ун-т им. В.И. Ленина, 2011. – 567 с. ISBN 978-5-89482-791-9. EDN QNPTNJ.
18. Болдин В.П. Калориферные установки / В.П. Болдин, В.Ю. Кузин, В.В. Сухов. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – 45 с. ISBN 978-5-528-00494-5. EDN POKVIS.
19. Лунина Ю.Ю. Вентиляционные системы зданий: результаты проектирования, монтажа и эксплуатации / Ю.Ю. Лунина // Актуальные направления научных исследований: теория и практика: Материалы

- Международной (заочной) научно-практической конференции / под общей редакцией А.И. Вострецова. – Минск, Беларусь, 16 февраля 2018. – Минск, Беларусь: Научно-издательский центр «Мир науки» (ИП Вострецов Александр Ильич), 2018. – С. 66–70. EDN YQFZIW.
20. Awbi, H.B. (Ed.). (2007). *Ventilation Systems: Design and Performance* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203936894>.
21. Ядарова О.Н. Комплексный контроль параметров регулирования системы вентиляции с заслонками / О.Н. Ядарова, Е.О. Федоров, Б.М. Гильденберг и др. // Вестник Чувашского университета. – 2016. – № 3. – С. 149–154. EDN WLWSXN.
22. Лопаткин Д.Д. Рекуператоры воздуха. Виды и принципы работы / Д.Д. Лопаткин // Аллея науки. – 2022. – Т. 1. – № 4 (67). – С. 335–337. EDN YUXATN.
23. Ермоц, В. П. Краткий обзор рекуператоров систем вентиляции. Определение КПД рекуператоров / В. П. Ермоц // Точная наука. – 2017. – № 19. – С. 9-13. – EDN YOCNPN.
24. Сазонова, А. А. Применение рекуператоров тепла в системах обеспечения микроклимата / А. А. Сазонова, К. В. Кельина // Научный альманах. – 2016. – № 4-3(18). – С. 178-181. – DOI 10.17117/na.2016.04.03.178. – EDN WAENGT.

25. Ястребов А.В. Рекуперация воздуха: виды, принципы работы, функции / А.В. Ястребов, В.Н. Зекин // Вестник науки. – 2022. – Т. 1. – № 4 (49). – С. 209–216. EDN JASWDF.
26. Вьюнов Д.А. Конструктивные особенности и принцип работы установок вентиляции и кондиционирования воздуха для чистых помещений / Д.А. Вьюнов, С.В. Угорова // Научный аспект. – 2020. – Т. 17. – № 2. – С. 2219–2229. EDN LAEABH.
27. Вдовичев А.А. Расчет температурной эффективности перекрестно-точных рекуператоров воздуха / А.А. Вдовичев, В.А. Пухкал, В.М. Уляшева // Строительство и техногенная безопасность. – 2022. – № S1. – С. 81–90. EDN QIJMHS.
28. Монтаж, эксплуатация и сервис систем вентиляции и кондиционирования воздуха: учебно-справочное пособие / под общ. ред. В.Е. Минина. 2-е изд., перераб. и доп. – СПб: Профессия, 2007. – 370 с. ISBN 978-5-93913-159-9. EDN QNNCDH.
29. Эксплуатация и наладка систем отопления, вентиляции и кондиционирования. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. – 151 с. ISBN 978-5-361-01080-6. EDN OMDOZC.
30. Ванюшова М.Е. К вопросу об отключении систем вентиляции и кондиционирования при пожаре / М.Е. Ванюшова, С.Г. Аксенов // Студенческий форум. – 2021. – № 40-2 (176). – С. 11–12. EDN NBWBIF.

31. Арбатский А.А. Проблема обледенения теплообменников утилизации тепла для систем вентиляции зданий / А.А. Арбатский, В.С. Глазов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): материалы международной (XX Всероссийской) научно-технической конференции. – Иваново, 29–31 мая 2019. Т. II. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2019. – С. 341–346. EDN KQXOPP.
32. Игнаткин И.Ю. Способ утилизации теплоты вытяжного воздуха с применением рекуперативного теплообменника / И.Ю. Игнаткин // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2018. – № 1 (56). – С. 143–148. DOI: 10.17238/issn2071-2243.2018.1.143. EDN XSVENN.
33. Джумаев, Д. У. Автоматизация чистых производственных помещений / Д. У. Джумаев // Наука через призму времени. – 2019. – № 5(26). – С. 73-77. – EDN FYPZOL.
34. Ключев В.В., Якимцова В.В., Пляхина Д.В. Защита воздухонагревателей от замерзания. – 2021.
35. Nourozi B. Energy and defrosting contributions of preheating cold supply air in buildings with balanced ventilation / B. Nourozi, Q. Wang, A. Ploskić // Applied Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 146. – P. 180–189.

36. Bai H.Y. A review of heat recovery technologies and their frost control for residential building ventilation in cold climate regions / H.Y. Bai et al. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Vol. 162. – P. 112417.
37. Al Douri J. Review regarding defrosting methods for refrigeration and heat pump systems / J. Al Douri et al. //E3S Web of Conferences. – EDP Sciences, 2021. – Vol. 286. – P. 01012.
38. Пат. 2176365 Российская Федерация, МПК. F24F 3/147 (2000.01) Способ работы теплообменника-утилизатора [Текст] / Бурцев С.И.; заявитель и патентообладатель ЗАО "Бюро техники кондиционирования и охлаждения". № 2001105108/06; заявл. 20.02.2001; опубл. 27.11.2001, Бюл. № 33. – 3 с.
39. Пат. 2281437 Российская Федерация, МПК. F24F 3/147 (2006.01) Установка утилизации тепла вытяжного воздуха [Текст] / Кокорин О.Я., Балмазов М.В.; заявитель и патентообладатель: Балмазов Михаил Валентинович (RU). № 2004114809/06; заявл. 17.05.2004; опубл. 10.08.2006, Бюл. № 32. – 4 с.
40. Удут Л.С. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 354 с.

41. Мальцева О.П. Системы управления электроприводов: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
42. Фесенко Э.О. Применение средств автоматизации при модернизации промышленных систем / Э.О. Фесенко // Инновационное развитие: потенциал науки и современного образования: монография. – Пенза: Наука и Просвещение (ИП Гуляев Г.Ю.), 2020. – С. 157–166. EDN CXDAFV.
43. Шувалов Д.Г. Энергоэффективные системы вентиляции здания с рекуперацией тепла / Д.Г. Шувалов, О.Ж. Турков, Д.А. Кругликов и др. // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2018. – № 9 (201). – С. 80–86. EDN IJNRSO.
44. Макуева Д.А. Особенности применения водных растворов пропиленгликоля в системах теплоснабжения жилых помещений / Д.А. Макуева // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2020. – № 2. – С. 32–33. EDN UTУНАI.
45. Зиборов Д.М. Обоснование методики расчета теплотехнических характеристик перспективных универсальных теплоносителей / Д.М. Зиборов // Наука и бизнес: пути развития. – 2014. – № 10 (40). – С. 33–36. EDN TJXRAB.
46. Маркаряпц Л.М. Улучшение микроклимата путем совершенствования вентиляции / Л.М. Маркаряпц, А.М. Никитин // Вестник Брянской

- государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 1. – С. 37–40. EDN THKUPD.
47. Тепляков А.А. Система вентиляции. Выбор технических средств / А.А. Тепляков // Colloquium-Journal. – 2019. – № 14-2 (38). – С. 196–200. EDN LHZWMT.
48. Бодров В.И. Энергоэффективность систем обеспечения параметров микроклимата / В.И. Бодров, М.В. Бодров // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2015. – № 7 (163). – С. 58–62. EDN XCOEMT.
49. Бенецкий В.О. Автоматизированная система процесса сушки древесины / В.О. Бенецкий, М.В. Годунов // Сборник научных трудов кафедры автоматики и промышленной электроники: Сборник статей / под ред. Е.А. Рыжковой. – М.: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2019. – С. 35–40. EDN OQMKRK.
50. Грозберг Ю.Г. Анализ современных автоматизированных систем управления установками сушки пиломатериалов / Ю.Г. Грозберг, Ю.В. Мателенок // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 3. – С. 73–79. EDN TNYHMJ.
51. Конышенко, Ю. С. Повышение энергоэффективности сушки древесины в камерах с ограниченной тепловой мощностью / Ю. С. Конышенко, Д. Л.

- Павлов, А. А. Орлов // Научные труды SWorld. – 2016. – Т. 2, № 1(42). – С. 30-38. – EDN VWEYIZ.
52. Чернышев А.Н. Технология аэродинамической сушки древесины хвойных пород без искусственного увлажнения // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2011. – № 30. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologiya-aerodinamicheskoy-sushki-drevesiny-hvoynyh-porod-bez-iskusstvennogo-uvlazhneniya> (дата обращения: 12.08.2024).
53. Датчик канальный температуры Pt1000 // Компания IECON – разработчик и производитель интеллектуальных систем управления технологическим оборудованием и процессами. URL: <https://www.iecon.ru/catalog/datchiki-temperature/kanalnye/pt1000/> (дата обращения: 23.11.2024).
54. Ермолаев В.П. Определение влажности воздуха в помещении / В.П. Ермолаев // Потенциал современной науки. – 2014. – № 7. – С. 32–38. EDN TANDDL.
55. Нуруллин Н.Ж. Численное моделирование работы пластинчатого противоточного рекуператора / Н.Ж. Нуруллин, А.М. Хворыстка // Тинчуринские чтения: Материалы XIV Международной молодежной научной конференции. В 3-х т. / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань, 23–26 апреля 2019. – Т. 2. Ч. 2. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 144–148. EDN NMGAXU.

56. Захаров, М. Е. Компьютерное моделирование теплообменника печи пиролиза для оптимизации процесса пиролиза углеводородов / М. Е. Захаров, Т. В. Ганджа // Компьютерные технологии и анализ данных (СТДА'2024) : Материалы IV Международной научно-практической конференции,, Минск, 25–26 апреля 2024 года. – Минск: Белорусский государственный университет, 2024. – С. 168-171. – EDN DWXVDZ..
57. Сорокина Я.Н. Сравнительный анализ эффективности роторного и пластинчатого рекуператоров воздуха / Я.Н. Сорокина, Е.Д. Родина, Д.В. Зеленцов // Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и направления развития: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пермь, 21 января 2018. – Т. Ч. 1. – Пермь: Общество с ограниченной ответственностью "ОМЕГА САЙНС", 2018. – С. 77–81. EDN YOZWLF.
58. Кирамов З.Р. Окупаемость энергосберегающего мероприятия по внедрению роторного рекуператора / З.Р. Кирамов // Передовые инновационные разработки. Перспективы и опыт использования, проблемы внедрения в производство: сборник научных статей по итогам четвертой международной научной конференции. – Казань, 31 мая 2019. Т. Ч. 1. – Казань: ООО «Конверт», 2019. – С. 124–126. EDN XBSUKF.
59. Швецов В.А. Применение рекуператоров в общественных зданиях и особенности расчета. Типы рекуператоров / В.А. Швецов, Ю.А. Орлова, О.В. Наумова // Основы рационального природопользования: Материалы

- VII Национальной конференции с международным участием. – Саратов, 18–19 ноября 2021. – Саратов: ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ, 2021. – С. 207–212. EDN PVQTWM.
60. Мерщиева И.П. Рекуперация тепла в здании / И.П. Мерщиева, А.А. Мерщиев // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2013. – № 4 (13). – С. 16–21. EDN RTXBGX.
61. Самодельный психрометр для сушильной камеры // Учебно-научная лаборатория измерительной техники и автоматизации. URL: <https://esd70.ru/articles/2014-10-17/3-samodelnyj-psihrometr-dlya-sushilnoj-kamery.html> (дата обращения: 23.11.2024).
62. Захаров, М. Е. Компьютерное моделирование теплообменного аппарата атомных электростанций для оптимизации теплотехнических характеристик / М. Е. Захаров, Т. В. Ганджа, К. Е. Захаров // Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2024. – № 1-1. – С. 335-337. – EDN COOKQG.
63. Хайбуллоев Б. Сравнительный анализ преобразователей температуры для систем автоматического регулирования / Б. Хайбуллоев // Молодая мысль: наука, технологии, инновации: Материалы XII (XVIII) Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – Братск, 13–17 апреля 2020. – Братск: Братский государственный университет, 2020. – С. 279–282. EDN ZEWWGB.

64. Шилин А.А. Упрощение модели сложной теплообменной системы для решения задачи релейного управления / А.А. Шилин, В.Г. Букреев // Теплоэнергетика. – 2014. – № 9. – С. 56. DOI: 10.1134/S0040363614080128. EDN SJDKOP.
65. Шилин А.А. Линеаризация модели теплообменной системы с аппроксимацией транспортного запаздывания / А.А. Шилин, В.Г. Букреев // Теплоэнергетика. – 2014. – № 10. – С. 49. DOI: 10.1134/S0040363614100117. EDN SLIRWD.
66. Иванова В.Р. Разработка алгоритма эффективного управления на базе ПЛК TM171PDM27S Schneider Electric / В.Р. Иванова, И.Ю. Иванов // Проблемы совершенствования топливно-энергетического комплекса: Материалы XV Международной научно-технической конференции. – Саратов, 06–09 октября 2020. – Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2020. – Т. Вып. 10. – С. 64–68. EDN QTALWJ.
67. Иванова В.Р. Разработка алгоритма для эффективного управления технологическим процессом промышленного предприятия на базе программируемого логического контроллера TM171PDM27S Schneider Electric / В.Р. Иванова, В.В. Новокрещенов, Н.В. Роженцова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 75–85. DOI: 10.30724/1998-9903-2020-22-2-75-85. EDN WLDLUX.

68. Дохтаева И.А. Определение достоинств среды программирования SciLab путем сравнительного анализа языков программирования MatLab и SciLab / И.А. Дохтаева, Е.Н. Рожина // Прогрессивные технологии и процессы: Сборник научных статей Международной молодежной научно-практической конференции: в 2-х т. – Курск, 25–26 сентября 2014. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2014. Т. 1. – С. 204–207. EDN SZМЕНХ.
69. Ефименко Я.Э. Фильтрация электрокардиосигнала в свободно распространяемом математическом пакете Scilab на языке программирования Scilab / Я.Э. Ефименко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов Двадцать второй Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 3-х т. – М., 25–26 февраля 2016. – М.: ИД МЭИ, 2016. – Т. 1. – С. 182. EDN WFАНКР.
70. Фатхулов И.А. Математическое моделирование процессов в источниках питания в пакете моделирования Scilab / И.А. Фатхулов // Актуальные вопросы современной науки: Сборник статей по материалам XIV международной научно-практической конференции. В 2 ч. – Томск, 26 сентября 2018. – Т. Ч. 1 (2). – Томск: Общество с ограниченной ответственностью «Дендра», 2018. – С. 110–115. EDN YRDBGP.
71. Чурсин Д.В. Системы частотного управления асинхронными электродвигателями / Д.В. Чурсин // Системы управления, технические

- системы: устойчивость, стабилизация, пути и методы исследования: Материалы молодежной секции в рамках IV Международной научно-практической конференции. – Елец, 25 апреля 2018. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2018. – С. 163–168. EDN XUADNB.
72. Островлянчик В.Ю. Измерение координат асинхронного двигателя в цифровых информационно-управляющих системах / В.Ю. Островлянчик, И.Ю. Поползин // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (61). – С. 7–20. DOI: 10.17212/1814-1196-2015-4-7-20. EDN VKFIMD.
73. Виту В.В. Исследование методов настройки ПИД-регулятора для объекта 2-ого порядка с запаздыванием / В.В. Виту, Р. Ньиренда, А.Ю. Сметанин, К.Ч. Симвака // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 01–20 мая 2016. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. – С. 3420–3424. EDN XE1UEF.
74. Ротач В.Я. Автоматизированная настройка ПИД-регуляторов - экспертные и формальные методы / В.Я. Ротач // Теплоэнергетика. – 1995. – № 10. – С. 9–16. EDN WNFSQZ.
75. Писарев А.В. Исследования методов определения параметров настроек промышленных ПИД-регуляторов / А.В. Писарев // Электронные средства

- и системы управления: Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – 2007. – № 2. – С. 76–79. EDN ТКВVTJ.
76. Зюбин В.Е. Программирование ПЛК: языки МЭК 61131-3 и возможные альтернативы / В.Е. Зюбин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 11. – С. 31–35. EDN KWLOVL.
77. Золотарев С.В. Интегрированный комплекс МЭК 61131-3 программирования CoDeSys / С.В. Золотарев, И.В. Петров // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2005. – № 4. – С. 29–33. EDN KWNISD.
78. Лиференко В. Программирование ПЛК и стандарты IEC 61131-3 / В. Лиференко // Компоненты и технологии. – 2006. – № 4 (57). – С. 82–83. – EDN MTFKUN.
79. Пиломатериалы производство и реализация // ТомскЕСО. Пиломатериалы. Производство и реализация. URL: <https://tomskeco70.ru/> (дата обращения: 28.11.2024).
80. Зарипов Ш.Г. Обоснование технологии осушения агента сушки методом конденсации / Ш.Г. Зарипов, Ю.С. Пунтусова // Деревообрабатывающая промышленность. – 2018. – № 1. – С. 27–32. EDN XQFKPR.
81. Зарипов Ш.Г. Совершенствование технологии сушки листовых пиломатериалов: специальность 05.21.05 "Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки": автореферат диссертации на

- соискание ученой степени доктора технических наук / Шакур Гаянович Зарипов. – Архангельск, 2016. – 22 с. EDN ZQACLP.
82. Богданов Е.С. Справочник по сушке древесины: справочник / Е.С. Богданов, В.А. Козлов, В.Б. Кунтыш, В.И. Мелехов. 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во «Лесная промышленность», 1990. – 304 с. ISBN 5-7120-0241-8. EDN URDEQI.
83. Чемоданов А.Н. Сушка древесины. Справочные материалы: для студентов всех специальностей лесотехнического профиля / А.Н. Чемоданов, Е.М. Царев, С.Е. Анисимов. – Вологда: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство «Инфра-Инженерия»", 2022. – 220 с. ISBN 978-5-9729-1032-8. EDN NPXMBO.
84. Киселева А.В. Древесиноведение и сушка древесины. Раздел: Сушка древесины: тексты лекций для студентов специальности 250403 - Технология деревообработки / А.В. Киселева, А.В. Киселева. – Воронеж: Воронежская государственная лесотехническая академия, 2009. – 59 с. ISBN 978-5-7994-0369-0. EDN REUNXR.
85. Луков Д.К. Автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) // European science. – 2019. – № 2 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/avtomatizirovannyye-sistemy-upravleniya-tehnologicheskim-protsessom-asu-tp> (дата обращения: 12.09.2024).
86. Турицын Ю.А. Обзор современных АСУТП и АСДУ на промышленных предприятиях / Ю.А. Турицын, И.В. Баранникова, И.А. Пасечник // ГИАБ.

- 2009. – № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-sovremennyh-asutp-i-asdu-na-promyshlennyh-predpriyatiyah> (дата обращения: 12.09.2024).
87. О совершенствовании моделей АСУ ТП нижнего уровня УЭЦН в условиях перевода нефтяных скважин в прерывистые режимы эксплуатации / А. С. Глазырин, Е. И. Попов, В. А. Копырин [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336, № 8. – С. 243-259. – DOI 10.18799/24131830/2025/8/5263. – EDN VOOUOQ.
88. ПЛК210 высокопроизводительный программируемый контроллер с расширенными сетевыми возможностями // Общество с ограниченной ответственностью «Производственное Объединение ОВЕН». URL: <https://owen.ru/product/plk210> (дата обращения: 12.08.2024).
89. Ethernet сервер последовательных интерфейсов, 1xRS-422/485, с адаптером питания NPort 5130 // MOXA – Решения MOXA для профессионалов в промышленных коммуникациях. URL: <https://moxa.ru.com/products/nport-5130> (дата обращения: 12.09.2024).
90. Витязева, Т. А. Методы многоскоростной обработки сигналов в задачах анализа variability сердечного ритма / Т. А. Витязева // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 79-86. – DOI 10.18127/j15604136-202204-10. – EDN AKHYWF.

91. Витязева Т.А. Способы повышения эффективности анализа ВСП / Т.А. Витязева // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2020: Материалы XXXIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань, 09–11 декабря 2020. – Рязань: ИП Коняхин А.В. (Book Jet), 2020. – С. 172–175. EDN HZWKQV.
92. Малёв Н.А. Цифровой алгоритм контроля функционирования электромеханического преобразователя постоянного тока / Н.А. Малёв, О.В. Погодицкий, О.В. Козелков, А.С. Малацион // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2022. – № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovoy-algoritm-kontrolya-funktsionirovaniya-elektromehaniческого-preobrazovatelya-postoyannogo-toka> (дата обращения: 12.08.2024).
93. Щербина Ю.В. Методика проектирования цифровых фильтров Баттерворта средствами пакета MathCAD / Ю.В. Щербина, Е.Б. Зуева // Вестник МГУП. – 2011. – № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-proektirovaniya-tsifrovyyh-filtrov-battervorta-sredstvami-paketa-mathcad> (дата обращения: 12.09.2024).
94. Gusarova A.A., Shilkina S.V. Modeling the operation of the system in the CODESYS software environmentper / A.A. Gusarova, S.V. Shilkina // 2019

- International Science and Technology Conference "EastConf". – Vladivostok, Russia, 2019. – P. 1–6. DOI: 10.1109/EastConf.2019.8725346.
95. Salari M.E. Choosing a test automation framework for programmable logic controllers in CODESYS development environment / M.E. Salari, E.P. Enoiu, W. Afzal, C. Seceleanu // 2022 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW). – Valencia, Spain, 2022. – P. 277–284. DOI: 10.1109/ICSTW55395.2022.00055.
96. Чернышев А.Н. Энергосберегающие технологии аэродинамической сушки древесины хвойных пород без искусственного увлажнения при производстве евроокон / А.Н. Чернышев // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2010. – № 25. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/energoberegayuschie-tehnologii-aerodinamicheskoy-sushki-drevesiny-hvoynyh-porod-bez-iskusstvennogo-uvlazhneniya-pri-proizvodstve> (дата обращения: 12.09.2024).
97. Chauhan J. An experimental approach for precise temperature measurement using platinum RTD PT1000 / J. Chauhan, U. Neelakantan // 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT). – Chennai, India, 2016. – P. 3213–3215. DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755297.
98. Miklyaev V.M. Application of Pt1000 C420 thin-film temperature sensors at superconducting and other types of facilities / V.M. Miklyaev, Y.P. Filippov, A.Y. Filippov // Phys. Part. Nuclei Lett. – 2020. – Vol. 17. – P. 44–56. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1547477120010124>

99. Измеритель влажности для фармацевтов и пищевиков (термогигрометр) ИВИТ-М.RS // Научно-производственная компания «Рэлсиб». URL: https://www.приборы-датчики.рф/goods/116062989-izmeritel_vlazhnosti_termogigrometr_ivit_m_rs_nlf (дата обращения: 12.09.2024).
100. Кривченко И. Датчики и первичные преобразователи Sencera / И. Кривченко // Компоненты и Технологии. – 2010. – № 102. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/datchiki-i-pervichnye-preobrazovateli-sencera-1> (дата обращения: 12.09.2024).
101. Полюшкин Н.В. Диспетчеризация системы отопления - от частного дома до теплового пункта / Н.В. Полюшкин // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2016. – № 9 (177). – С. 32–34. EDN GNHZQA.
102. Мазаник Н.В. Контроль состояния сушильного агента при камерной сушке пиломатериалов / Н.В. Мазаник, Д.П. Бабич, О.Г. Рудак // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2014. – № 2 (166). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontrol-sostoyaniya-sushilnogo-agenta-pri-kamernoy-sushke-pilomaterialov> (дата обращения: 15.08.2024).
103. Мазаник Н.В. Режимы и качество сушки пиломатериалов в сушильных камерах различных производителей / Н.В. Мазаник, Д.П. Бабич // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2 (175). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rezhimy-i-kachestvo-sushki>

- pilomaterialov-v-sushilnyh-kamerah-razlichnyh-proizvoditeley (дата обращения: 15.08.2024).
104. Кубланов М.С. Проверка адекватности математических моделей / М.С. Кубланов // Научный вестник МГТУ ГА. – 2015. – № 211 (1). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proverka-adekvatnosti-matematicheskikh-modeley> (дата обращения: 15.08.2024).
105. Шевцов М.М. Проверка адекватности моделей / М.М. Шевцов, С.Н. Русак // Современные методы интеллектуального анализа данных в экономических, гуманитарных и естественнонаучных исследованиях: Материалы международной научно-практической конференции. – Пятигорск, 24–26 ноября 2016. – Пятигорск: ООО «Рекламно-информационное агентство на КМВ», 2016. – С. 342–350. EDN ZILFAZ.
106. Некротюк А.В. Функционально-структурная модель системы местной вытяжной вентиляции рабочего места монтажника радиоаппаратуры / А.В. Некротюк, Е.В. Корепанов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2015. – № 1 (25). – С. 65–68. EDN TWMZPV.
107. Полосин И.И. Построение эффективного воздухообмена для помещений производств с местной вытяжной вентиляцией с использованием математической модели / И.И. Полосин, С.Н. Кузнецов, А.В. Портянников, А.В. Дерепасов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2009. – № 1 (11). – С. 191–195. EDN KVIUWX.

108. Сотников А.Г. Систематизация и обобщение характеристик местных вытяжных устройств – основа инженерной методики проектирования эффективных систем промышленной вентиляции / А.Г. Сотников, А.А. Боровицкий // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 6 (32). – С. 54–59. DOI: 10.5862/MCE.32.8. EDN PDZKGF.
109. Хохловский В.Н. Совершенствование процесса разработки программного обеспечения для ПЛК путем генерации кода из созданной математической модели объекта управления / В.Н. Хохловский, В.С. Олейников, В.А. Пересвет и др. // Modern Science. – 2020. – № 9-2. – С. 347–359. EDN JXXXXV.
110. Кочергин, М. И. Учебно-иллюстративные модули на основе многоуровневых компьютерных моделей / М. И. Кочергин, В. М. Дмитриев, Т. В. Ганджа // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 739-751. – DOI 10.25559/SITITO.019.202303.739-751. – EDN МАКРJN.
111. Матвеева А.А. Исследование программного обеспечения ПЛК с помощью среды Codesys и Vissim / А.А. Матвеева // Энергия-2022. Теплоэнергетика: семнадцатая Всероссийская (девятая Международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. В 6 т. – Иваново, 11–13 мая 2022. Т. 1. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2022. – С. 169. EDN SRMQSL.

112. Колентеев Н.Я. Принципы и этапы построения математических моделей и требования к ним / Н.Я. Колентеев, А.С. Кобелева // Специальная техника и технологии транспорта. – 2021. – № 9. – С. 189–198. EDN YWYXHO.
113. Кукушкин С. С. Методики упрощения математических моделей на основе использования нетрадиционной теории конечных полей / С.С. Кукушкин, А.А. Баранов // Двойные технологии. – 2007. – № 1 (38). – С. 42–48. EDN JMFPOS.
114. Пустоветов М.Ю. Подход к реализации на ЭВМ математической модели асинхронного двигателя, предназначенной для использования в качестве составной части моделей электротехнических комплексов и систем / М.Ю. Пустоветов // Моделирование. Теория, методы и средства: Материалы 16-ой Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск, 06–07 декабря 2016. – Новочеркасск: ООО «Лик», 2016. – С. 332–345. EDN XFAZZL.
115. Цветков Е.В. Моделирование асинхронного двигателя в неподвижных координатах в математическом пакете SCILAB / Е.В. Цветков // Молодежь и новые информационные технологии: Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых в рамках Программы развития деятельности студенческих объединений Череповецкого государственного университета «РАЙОН IT». – Череповец, 17–18 ноября

2016. – Череповец: Череповецкий государственный университет, 2016. – С. 140–145. EDN XDPONV.
116. Чернышев А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, И.А. Чернышев. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 218 с.
117. Макартичян С.В., Шилин А.Н., Стрижиченко А.В. Контроль влажности древесины и управление процессом ее сушки. – М.: ИД Акад. естествознания, 2014. – 175 с.
118. ГОСТ 16588-91 Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – М.: Стандартинформ, 2006. – 6 с.
119. Менде Ф.Ф., Шурупов И.А. Разработка и эксплуатация лесосушильных камер. Монография. – Харьков, 2014. – 68 с.
120. Energy consumption of beech timber drying in oscillation climates / G. Milić, B. Kolin, N. Todorović, Ž. Gorišek // *Drvna industrija*. – 2014. – Vol. 65. – P. 309–314. DOI: 10.5552/drind.2014.1367
121. Milić G., Kolin B. Oscillation drying of beech timber – initial experiments // COST E53. – 2008. – P. 115–124.
122. Сушильные камеры для сушки древесины // 2021–2023 «СКРОН»® URL: <http://www.scron.ru/> (дата обращения: 03.06.2025).
123. Ray P.P. Internet of Things based smart measurement and monitoring of wood Equilibrium Moisture Content // 2015 International Conference on Smart Sensors and Systems (IC-SSS). – 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/SMARTSENS.2015.7873612.

124. Мазаник Н.В., Бабич Д.П., Рудак О.Г. Контроль состояния сушильного агента при камерной сушке пиломатериалов // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2016. – № 2 (166). – С. 104–106.
125. Лызенко А.В., Буданов В.Ю., Кротова Л.Л. Анализ точности регулирования процесса сушки // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сб. ст. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск: СГТУ, 2007. – С. 42–45.
126. Comparison of wood moisture meters operating on different principles of measurement / A. Běřák, J. Zach, P. Misák, J. Vaněrek // Buildings. – 2023. – № 13 (2). – P. 531. DOI: 10.3390/buildings13020531.
127. Holger F., Veikko T. Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters. – Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2000. – 102 p.
128. Zhang J., Cao J., Sun L. A novel fusion technique based functional link artificial neural network for lmc measuring // 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. – 2007. – P. 17–35. DOI: 10.1109/iciea.2007.4318453
129. Simpson W.T. Equilibrium moisture content of wood in outdoor locations in the united states and worldwide. – Madison, WI: USDA Forest Serv., Forest Prod. Lab., 1998. – 14 p.

130. Мазаник Н.В., Бабич Д.П. Режимы и качество сушки пиломатериалов в сушильных камерах различных производителей // Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 2 (175). – С. 191–195.
131. Development and validation of a programmable logic device (PLD) based sensor and processor microarchitecture system for equilibrium moisture content calculation in wood industries / P. Tangirala, J.R. Heath, A. Radun, T. Conners // Proceedings of the 2006 IEEE Sensors Applications Symposium. – 2006. – P. 135–140. DOI: 10.1109/sas.2006.1634255
132. Прохоров С.В., Шилин А.А., Примочкин И.А. Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2021. – Т. 25. – № 4. – С. 70–83. DOI: 10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83.
133. Grechushnikov V.V., Kachin O.S., Prokhorov S.V. Automated system of knowledge base acquisition for lumber drying processes // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023: Proceedings. – Sochi, October 10–16, 2023. – P. 505–509.
134. Гигроскопические свойства древесины лиственных пород / С.Р. Лоскутов, О.А. Шапченкова, А.А. Анискина, З. Пастори // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26. – № 2. – С. 92–102. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-2-92-102

135. Common sorption isotherm models are not physically valid for water in wood / E.E. Thybring, C.R. Boardman, S.L. Zelinka, S.V. Glass // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2021. – Vol. 627. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2021.127214
136. Кречетов И.В. Сушка древесины. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 432 с.
137. Wood moisture content measurement accuracy of impregnated and nonimpregnated wood / J. Barański, A. Suchta, S. Barańska, I. Klement, T. Vilkovská, P. Vilkovský // *Sensors*. – 2021. – № 21. DOI: 10.3390/s21217033
138. Investigation of electrical characteristics using various electrodes for evaluating the moisture content in wood / S. Hwang, T. Lee, K. Ahn, S. Pang, J. Park, J. Oh, H. Kwak, H. Yeo // *BioResources*. – 2021. – № 16 (4). – P. 7040–7055.
139. Tamme V., Muiste P., Tamme H. Experimental study of resistance type wood moisture sensors for monitoring wood drying process above fibre saturation point // *Forestry Studies. Metsanduslikud Uurimused*. – 2013. – № 59. – P. 28–44.
140. Божелко И.К., Олехнович А.М., Снопков В.Б. Измерение электропроводности древесины, используемой для шпал // *Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. – 2006. – № 2. – С. 241–244.

141. Wood handbook: wood as an engineering material. – Madison, WI, USDA Forest Service, 2010. – 508 p.
142. Sramm A.J. The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content // *Industrial and Engineering Chemistry*. – 1927. – № 19 (9). – P. 1021–1025. DOI: 10.1021/ie50213a022
143. Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2025 – Т. 336 – № 7 – С. 174–188. DOI: 10.18799/24131830/2025/7/5201.
144. Прохоров С.В. Методика постановки эксперимента в среде CoDeSys на примере системы управления вентиляцией / С.В. Прохоров, В.В. Нгуен, А.А. Шилин и др. // *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 109–115.
145. Шилин А. А. Стабилизация температуры в рекуператоре вентиляционной установки с использованием регулируемого электропривода насоса промежуточного теплоносителя/ Шилин А. А., Букреев В.Г., Прохоров С.В., Нгуен В.В. // *Известия высших учебных заведений. Электромеханика*. – 2020. – Т. 63. – №. 2-3. – С. 24-29.

146. Прохоров С.В., Шилин А.А., Примочкин И.А. Синтез алгоритма диагностики работы электроприводов камеры сушки по датчикам температуры. Известия Юго-Западного государственного университета. 2021;25(4):70-83. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2021-25-4-70-83>
147. Гречушников В.В., Шилин А.А., Прохоров С.В. Синтез алгоритма автоматизированной подстройки параметров процесса сушки пиломатериалов// Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. –2024. –Т. 335. –№ 6. –С. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500
148. Savrasov F. V. , Prokhorov S. -. , Shilin A. A. The computer simulation of hoarfrost's clearing process in the air recuperation system // Journal of Physics: Conference Series. - 2017 - Vol. 803 - №. 1, Article number 012134. - p. 1-5
149. Shilin A. A. , Prokhorov S. -. , Shabo A. K. , Bukreev V. G. A method for measuring the amount of hoar frost formation in the recuperation channels of ventilation systems using the adjustable mathematical model of this process // MATEC Web of Conferences . - 2017 - Vol. 141, Article Number 01032. - p. 1-5
150. Shilin A. A. , Bukreev V. G. , Prokhorov S. -. Pressure Pump Power Control in the Primary Circuit of the Heat Exchange System // MATEC Web of Conferences . - 2017 - Vol. 91, Article number 01043. - p. 1-5
151. Prokhorov, Sergey V, Krivoshein, Youri O, Shilin Aleksander A, Automatic control of hot water supply system on solar collectors. Far East Con-2019

152. V. Grechushnikov, O. Kachin and S. Prokhorov, "Automated System of Knowledge Base Acquisition for Lumber Drying Processes," 2023 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2023, pp. 505-509, doi: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272810.
153. Гнеушев В. В. , Шилин А. А. , Прохоров С. В. Частотное управление рекуператором в системе вентиляции // Энергетика и энергосбережение: теория и практика: сборник материалов II Всероссийской научно - практической конференции, Кемерово, 2-4 Декабря 2015. - Кемерово: КузГТУ , 2015 - С. 1-3.
154. Прохоров С. -. Защита от инея в системах рекуперации на основе поддержания температуры точки росы [Электронный ресурс] // Энергостарт: сборник материалов Всероссийской молодежной научно-практической школы, Кемерово, 11-25 Июля 2016. - Кемерово: КузГТУ , 2016 - С. 1-4.
155. Прохоров С. В. Рекуперативные установки в системах воздухообмена промышленных предприятий // Интеллектуальные энергосистемы: материалы III Международного молодежного форума. В 3 т., Томск, 28 Сентября-2 Октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 132-136
156. Нгуен В. В., Прохоров С. В. Вычисление энергетически оптимальной температуры холодной панели в системе осушения // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника:

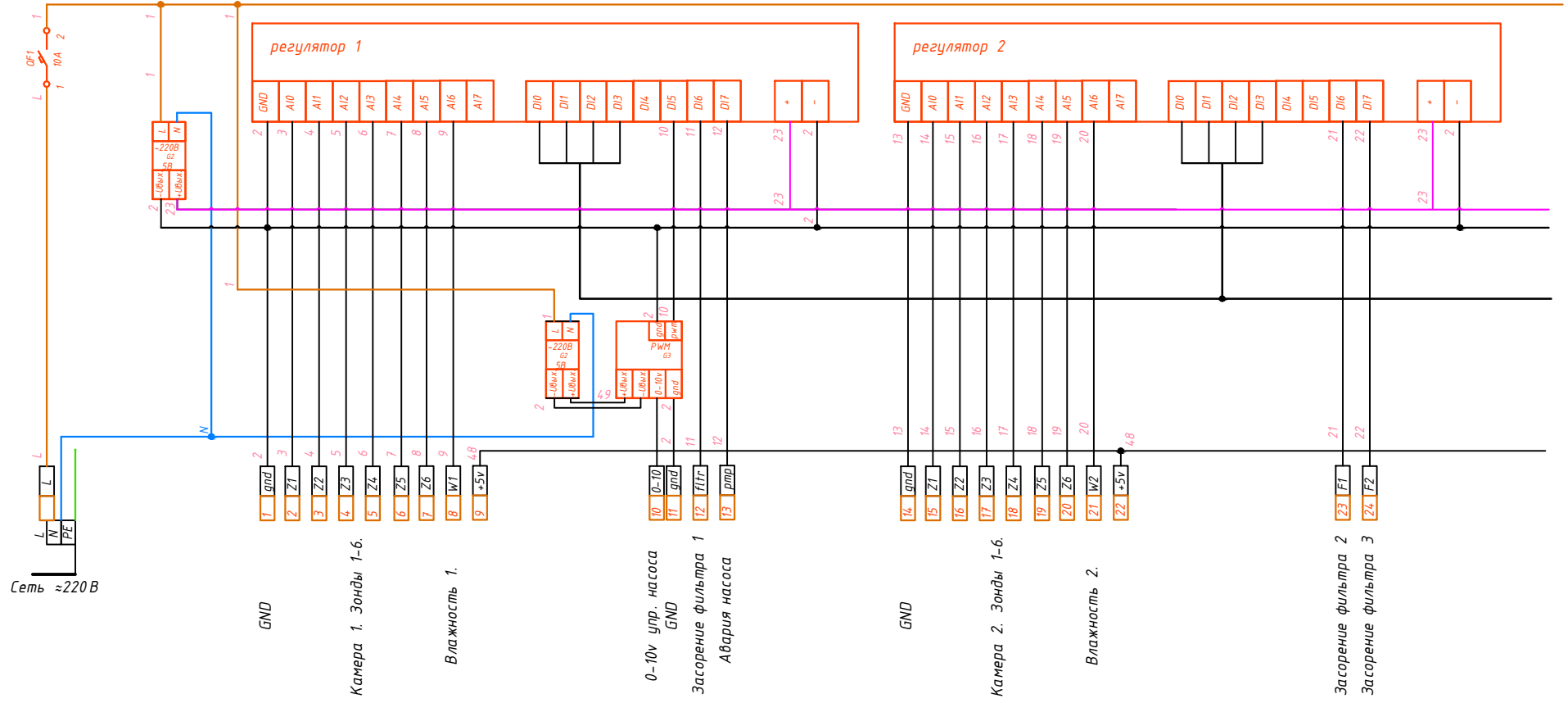
- труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 20-21 Ноября 2018. - Новокузнецк: СибГИУ, 2018 - С. 53-58
157. Прохоров С. В-. Особенности и проблемы эксплуатации рекуператора воздуха с промежуточным теплоносителем // Автоматизированный электропривод и промышленная электроника: труды Восьмой Всероссийской научно-практической конференции, Новокузнецк, 20-21 Ноября 2018. - Новокузнецк: СибГИУ, 2018 - С. 84-90
158. Шилин А.А., Прохоров С.В., Нгуен В. В. Климатическая камера. Патент на изобретение RU 2718357 С1, 11.06.2020. Заявка № 2019133796 от 24.10.2019.
159. Патент на изобретение: Устройство для управления теплопотреблением
Заявка: 2017130115, 24.08.2017 Опубликовано: 19.06.2018 Бюл. № 17
Автор(ы): Букреев Виктор Григорьевич (RU), Шилин Александр Анатольевич (RU), Прохоров Сергей Валерьевич (RU) Статус: действует
(последнее изменение статуса: 27.06.2018)
160. Патент на изобретение: Устройство для утилизации тепла вытяжного воздуха Заявка: 2017108375, 13.03.2017 Дата регистрации: 29.05.2018
Опубликовано: 29.05.2018 Бюл. № 16 Автор(ы): Шилин Александр Анатольевич (RU), Прохоров Сергей Валерьевич (RU) Статус: действует
(последнее изменение статуса: 18.06.2018)
161. Прохоров С. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020660910. Операционная система для программируемого

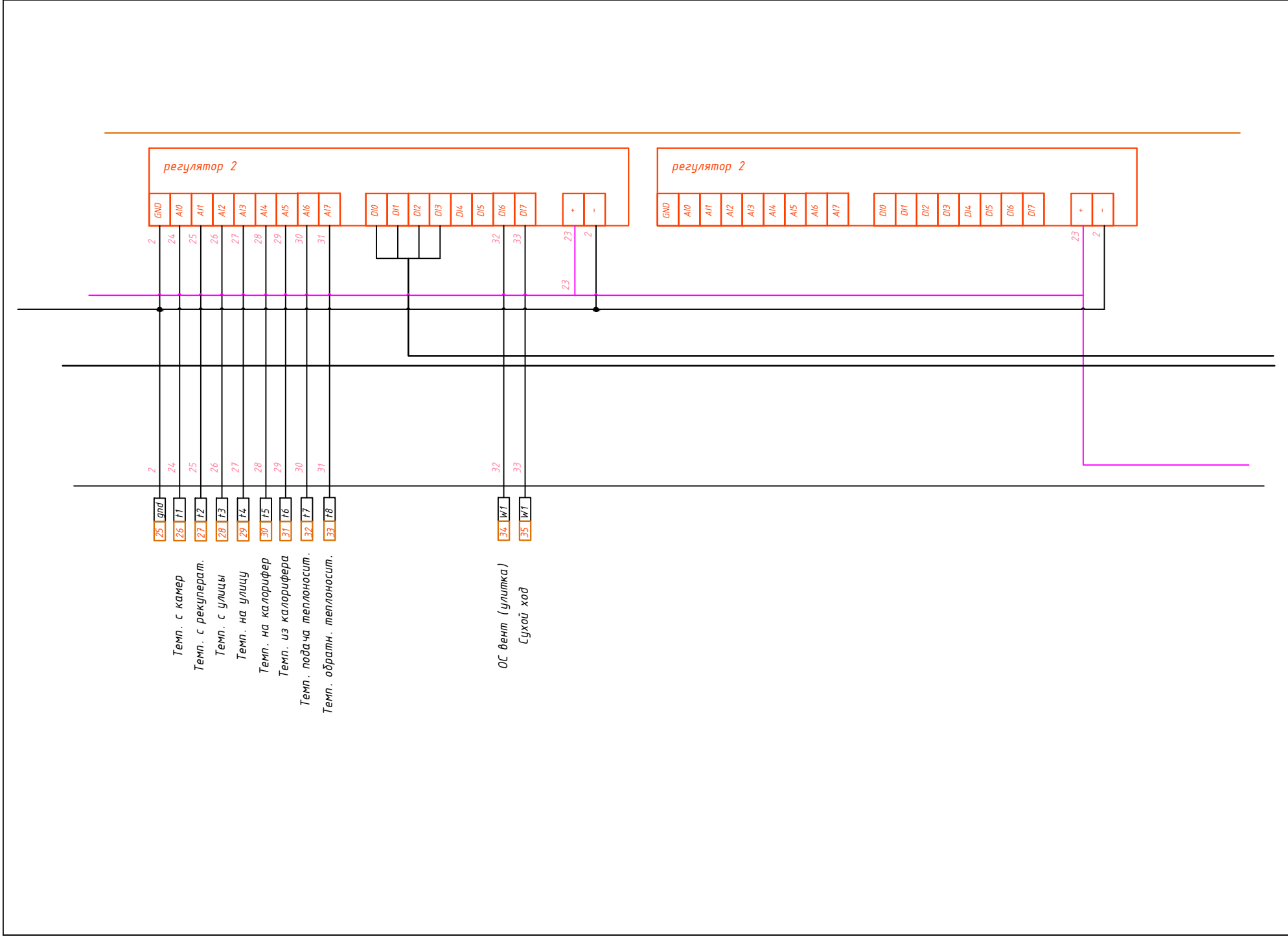
- логического контроллера (ПЛК) на базе процессора STM32/ Шилин А. А., Кривошеин Ю. О., Прохоров С. В., Нгуен В. В. Заявка № 2020618110. Дата поступления 30 июля 2020 г. Зарегистрировано в бюллетене 15 сентября 2020 г.
162. Прохоров С. В. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021610420. Приложение для отображения технологических параметров на основе платформы Android для программируемого логического контроллера (ПЛК) на базе процессора STM32/ Шилин А. А., Кривошеин Ю. О., Прохоров С. В., Нгуен В. В. – Заявка № 2020667577. Дата поступления 28 декабря 2020 г. Зарегистрировано в бюллетене 14 января 2021 г.
163. Прохоров С. В. Исследование режимов работы скалярного электропривода рекуператора в системе вентиляции : магистерская диссертация / С. Прохоров ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа энергетики (ИШЭ), Отделение электроэнергетики и электротехники (ОЭЭ) ; науч. рук. А. А. Шилин. — Томск, 2018. – Текст : электронный // Электронный архив ТПУ. – URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/49135> (дата обращения: 10.12.2025).
164. Прохоров С. В. Частотное управление рекуператором в системе вентиляции : дипломный проект / С. В. Прохоров ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ),

Энергетический институт (ЭНИИ), Кафедра электропривода и электрооборудования (ЭПЭО) ; науч. рук. А. А. Шилин. — Томск, 2016. [Электронный ресурс] // Электронный архив ТПУ: [сайт]. [2016]. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/25047> (дата обращения: 10.12.2025).

165. Гречушников, В. В. Исследование переходных процессов осциллирующего метода управления сушкой древесины для синтеза алгоритмов подстройки параметров резистивных датчиков влажности / В. В. Гречушников, С. В. Прохоров, А. А. Шилин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336, № 7. – С. 174-188. – DOI 10.18799/24131830/2025/7/5201. – EDN QHILDH.

Приложение Б. Шкаф управления. Схема электрическая принципиальная





25 gnd
 26 T1
 27 T2
 28 T3
 29 T4
 30 T5
 31 T6
 32 T7
 33 T8

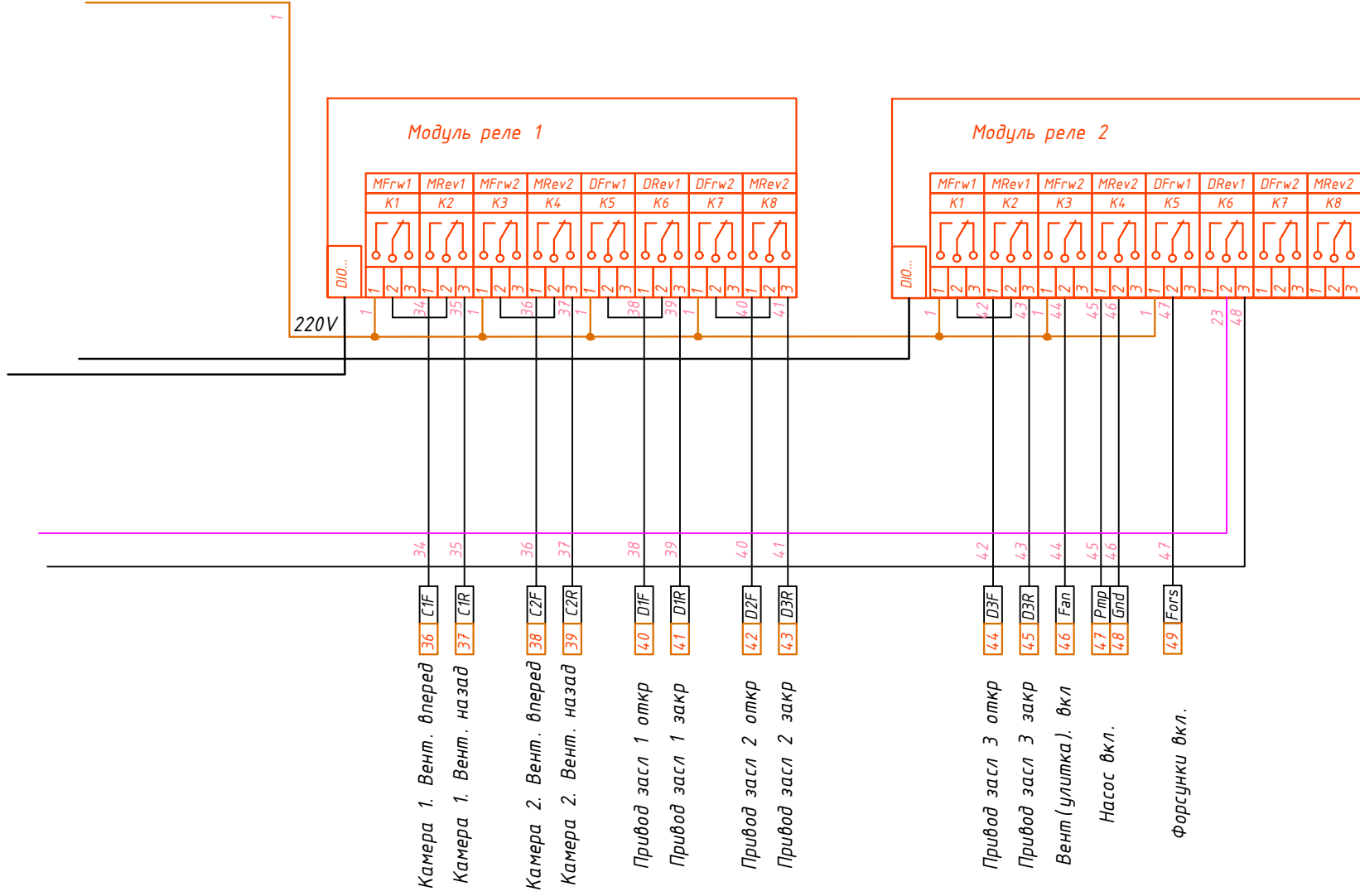
Темп. с камер
 Темп. с рекуперат.
 Темп. с улицы
 Темп. на улицу
 Темп. на калорифер
 Темп. из калорифера
 Темп. подача теплоносит.
 Темп. обратн. теплоносит.

34 TWT
 35 TWT

ОС венти (улитка)
 Сухой ход

регулятор 2

регулятор 2



Камера 1. Вент. вперед

Камера 1. Вент. назад

Камера 2. Вент. вперед

Камера 2. Вент. назад

Привод засл 1 откр

Привод засл 1 закр

Привод засл 2 откр

Привод засл 2 закр

Привод засл 3 откр

Привод засл 3 закр

Вент (улитка). вкл

Насос вкл.

форсунки вкл.

Приложение Г. Акт о внедрении результатов диссертационной работы соискателя.



ООО «НПО ВЭСТ»
ИНН 7020032645 КПП 701701001
Россия, 634009, Томская обл., г. Томск,
ул. Мельничная, дом 45а, помещение Ц001
тел.: (3822) 400-733
npowest.ru | info@npowest.ru



АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы соискателя

Комиссия в составе:

Председатель: Кривошеин Ю.О., директор ООО «НПО ВЭСТ»

Члены комиссии: Фокин Г.В., инженер КИПиА;

Чебучаков М.В., инженер-проектировщик систем ОВ.

Составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской квалификационной работы Прохорова С.В., использованы в программном обеспечении программно-логического контроллера (ПЛК) и при организации дистанционной работы с использованием диспетчерской системы НПО ВЭСТ.

1. На основе исследований разработан алгоритм для управления тепловым рекуператором с промежуточным теплоносителем для систем вентиляции, позволяющий корректно управлять исполнительными механизмами и предотвращать замерзание вытяжного канала. Алгоритм работы реализован на функциональных блоках (FBD) в программной среде AKIAR для ПЛК ВЭСТ-02.

2. Разработанная модель позволила провести эксперименты на удаленном объекте в п.Жатай, Республика Саха (Якутия) без непосредственного нахождения специалистов на объекте, что позволило сэкономить на командировочных расходах (для 2 специалистов на 6-8 дней) около 300 т.р.

3. Материалы исследований используются в качестве методических пособий для обучения персонала и клиентов организации при работе с системой диспетчеризации.

Председатель комиссии _____

Члены комиссии _____



Кривошеин Ю.О.

Фокин Г.В.

Чебучаков М.В.

Приложение Д. Акт о внедрении результатов диссертационной работы соискателя.



Общество с ограниченной ответственностью
Научно-производственная организация
«ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

ООО НПО «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»,
ИНН/КПП 1435313804/143501001
Россия 677902, Республика Саха
(Якутия), г. Якутск, поселок Жатай
ул. Комсомольская, д. 3, кв. 10
Тел: 8-913-821-46-96
e-mail: snkrutko@yandex.ru

АКТ

О внедрении результатов диссертационной работы соискателя

Комиссия в составе:

Председатель: Крутько С.Н., директор ООО НПО «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Члены комиссии: инженер КИПиА ООО НПО «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ» Михайлов
С.И., инженер КИПиА ООО НПО «ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ» Аполлонов А.А.

Составили настоящий акт о том, что результаты научно-исследовательской квалификационной работы Прохорова С.В., использованы при пусконаладочных работах и в период эксплуатации на объекте «Жилой дом по ул. Северная, 33/2», находящийся в п.Жатай, Республика Саха (Якутия)

1. На основе исследований соискателя была проведена работа по разработке и последующей реализации алгоритма, позволяющего корректно оценить степень заиневаания и обеспечить выход из нештатной ситуации при замерзании вытяжного вентиляционного канала в помещениях с повышенной влажностью.

2. Была успешно выполнена оценка уровня воздействия внешних электромагнитных и механических помех на систему, подверженную заиневаанию. Работы проводились удаленно, без физического присутствия на объекте. Решение проблемы заиневаания было достигнуто исключительно за счет программных инструментов, без внесения изменений в аппаратную часть. Реализация данного подхода обеспечила экономию порядка 100 тыс. рублей благодаря отсутствию необходимости внесения правок в исполнительную документацию и аппаратную часть системы.

Председатель комиссии: _____

Крутько С.Н.

Члены комиссии: _____

Михайлов С.И.

Аполлонов А.А.

