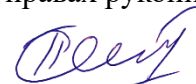


ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи



Прохоров Сергей

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами

Томск – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Шилин Александр Анатольевич**

доктор технических наук, доцент, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, профессор отделения электроэнергетики и электротехники

**Официальные оппоненты:**

**Бобырь Максим Владимирович,**

доктор технических наук, профессор, Юго-западный государственный университет, профессор кафедры программной инженерии

**Ганджа Тарас Викторович**

доктор технических наук, доцент, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании

Защита состоится 19 июня 2026 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.16. Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: Россия, 634028, г. Томск, Проспект Ленина, 2, ауд. 335



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
ДС.ТПУ.16, кандидат  
технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, consisting of a series of loops and strokes, positioned above the printed name of the academic secretary.

Надеждин И. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 повлечь порчу итогового продукта. К нештатным ситуациям, в контексте данной работы, относятся обмерзание вытяжного теплообменника рекуператора, отказы циркуляционных вентиляторов, некорректное положение воздушных заслонок и сбои 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: Н.У. Bai, Р. Liu, М. Justo Alonso, Н.М. 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 заиневаания 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 объем диссертации составляет 176 страниц, включая 5 приложений, 51 рисунок, 9 таблиц. Список литературы содержит 165 наименований.

### **Краткое содержание работы**

**Во введении** приведено обоснование актуальности научно-исследовательской работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведено исследование объекта автоматизации – сушильного комплекса пиломатериалов. Описана структура объекта по уровням автоматизации: нижний (исполнительные устройства и датчики), средний (ПЛК, шкафы управления) и верхний (АРМ, диспетчеризация). Выявлены и систематизированы основные проблемы, возникающие при эксплуатации: обледенение каналов рекуператора, отказ резистивных датчиков влажности в агрессивной среде, сложность контроля состояния вентиляторов и заслонок. Исследованы научные труды, в которых рассматриваются систематические проблемы, возникающие при эксплуатации. На основе анализа литературных источников сформированы концептуальные подходы к решению поставленных задач: определение степени заиневания вытяжного канала, путем применения датчика перепада давления, регулирование скорости циркуляционного насоса для управления эффективностью теплообмена рекуператора с целью контроля температуры точки росы для организации процесса оттаивания и использование психрометрического метода измерения влажности.

**В рамках второй главы** выполнен синтез математической модели теплообменной системы рекуператора, учитывающей динамические процессы образования инея на поверхности теплообменника. Реализована модель системы контроля заиневания с симуляцией в программной среде XCos SciLab. Произведен анализ переходных процессов и выявлены закономерности в поведении сухого и влажного датчиков температуры в составе электронного психрометра в зависимости от состояния реверсивных вентиляторов и технологических заслонок.

В частности, для синтеза математической модели теплообменной системы рекуператора, за основу была принята опубликованная модель теплообменная система (ТОС), обеспечивающая поддержание температуры в контуре горячего водоснабжения.

В работе за основу взята система рекуперации с промежуточным теплоносителем в составе вентиляционной установки. В отличие от модели, представленной авторами обозначенной работы, где используется один теплообменник, в текущей системе рекуперации описываются два теплообменника. Используя имеющуюся методологию, можно получить дифференциальное уравнение значения температуры выходящего воздуха. В результате модель системы может быть описана следующими дифференциальными уравнениями:

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

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;  $t_{out}$  – 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.

При этом для описания (1) были сделаны следующие допущения: температура наружного воздуха  $t_{out}$  и температура из помещения  $t_{room}$  имеют постоянную величину. В связи с тем, что времена переходных процессов в двигателе насоса и в преобразователе частоты на несколько порядков меньше, чем время переходных процессов, протекающих при замерзании калорифера, было решено пренебречь их влиянием.

В программной среде XCos SciLab была собрана модель АСУ ТП рекуперационной системы. Обозначены два режима работы: штатный (максимальная эффективность) и аварийный (режим оттаивания). На рис. 1 представлена имитационная модель системы рекуперации. Соответствующие переходные процессы в системе рекуперации отображены на рис. 2.

Условно, время нарастания инея, при котором передача воздушных потоков ухудшится на 90%, принято  $t_{y.g.} = 800$  с. Результат моделирования величины закупоривания инеем канала вентиляции в относительных единицах обрабатывается гистерезисным элементом, величина срабатывания 90 % закупоривания. После, необходимая заданная величина температуры сравнивается с величиной на выходе системы и преобразовывается в сигнал управления для ПИ-регулятора (Рис. 2).

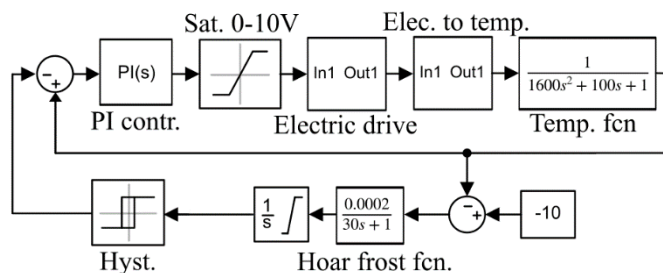


Рис. 1 – Имитационная модель системы рекуперации

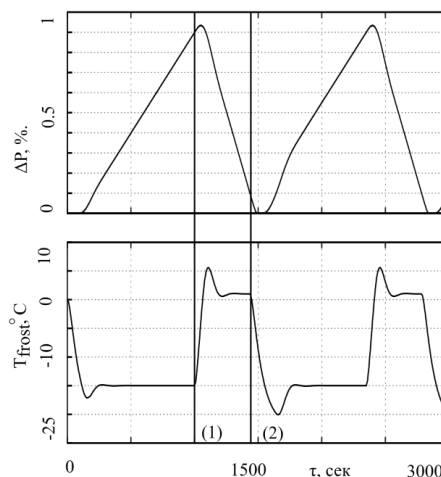


Рис. 2 – Переходные процессы в системе рекуперации

При достижении величины  $\Delta P = 90 \%$ , согласно заложенному алгоритму, срабатывает условие, при котором система переходит в нештатный режим работы с уведомлением оперативного персонала. После очистки канала вытяжной вентиляции, система возвращается в штатный режим работы. Если система не выйдет в штатный режим работы за определенный период времени, решением задачи займется обслуживающий персонал.

Основным показателем, влияющим на процесс образования инея, является температура внешней среды. Так, при определенной величине данного параметра начинается процесс заинеивания. Помимо температуры внешнего воздуха непосредственное влияние на процесс заинеивания оказывает влажность воздуха в установке. При очень сухом воздухе температура образования инея может опускаться до  $-30^\circ\text{C}$ , а при чрезмерно влажном, чуть ниже температуры точки росы. Данная связь между температурой и влажностью была замечена при эксплуатации автоматизированной системы рекуперации в Якутии (Россия). Основной задачей представленной модели является нахождение момента переключения из одного режима в другой, на основании величины образованного инея и последующая работа в режиме поддержания пониженной эффективности. В целом другие величины, влияющие на модель, исследованы не были, так как они не оказывают особого влияния на систему управления.

Однако в реальных условиях из-за влияния множества внешних факторов, качественно оценить степень заинеивания непосредственно на основании датчика перепада давления может оказаться невозможным. Измеренное значение перепада давления может включать в себя значительные помехи от электромеханической части системы рекуперации. Данная проблема является причиной случайных переключений между режимами. На рис. 3 представлена имитационная модель системы рекуперации, учитывающая влияние помех и переходные процессы в системе (рис. 4).

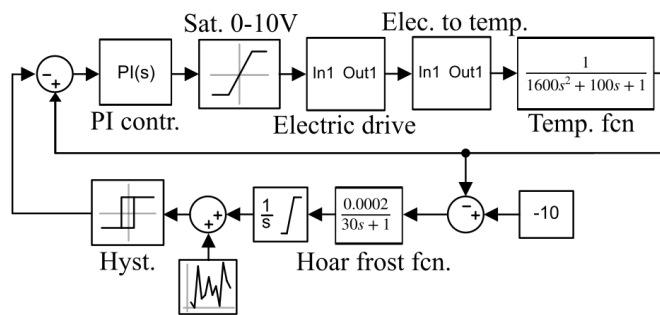


Рис. 3– Имитационная модель системы рекуперации с учетом помех

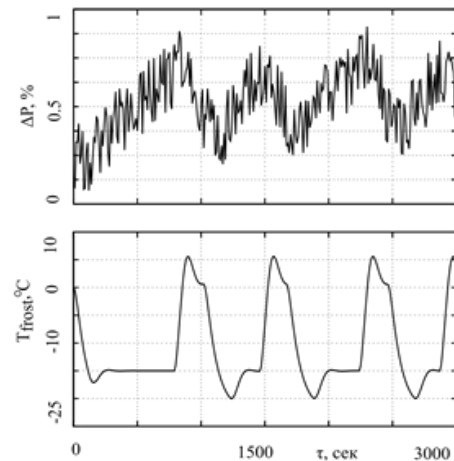


Рис. 4 – Переходные процессы в системе рекуперации с учетом помех

Для исключения случайных срабатываний датчик заиневаания может быть представлен в виде дифференциальных уравнений или динамической модели. Подобный метод оценки позволяет наблюдать тенденцию изменения процесса нарастания инея, благодаря использованию переменных состояния. Данное решение позволит эффективно реализовать системы управления с оттаиванием, поскольку математическая модель процесса не подвержена помехам от механической части системы.

Ниже представлена структурная схема системы с наблюдателем переменных состояния процесса (Рис. 5).

Показана эталонная модель, где динамические показатели эталонной модели отличаются от принятой системы без помех. Например, скорость образования инея завышена почти вдвое, а время его инерции увеличилось на треть. В систему добавлен контур подстройки температур образования инея, включающий в себя демпфирующее звено и ПИ-регулятор. Цель замкнутого контура – это подстройка такой системы, при которой минимальное рассогласование стремится к нулю.

На рис. 6 показано, что компенсационное значение на выходе ПИ-регулятора составляет 20 С, но в силу того факта, что параметры модели сильно отличаются от параметров объекта, описывающего этот процесс, абсолютного совпадения не наблюдается. В рамках исследования проблема ложного срабатывания гистерезисного элемента была устранена, что свидетельствует о достижении требуемого результата. Действительно, переход из режима в режим почти соответствует графику без помех и в них отсутствуют случайные срабатывания, которые возникают в схеме с помехами (Рис. 6).

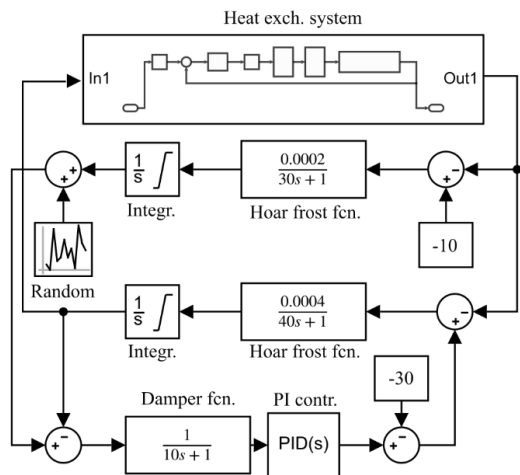


Рис. 5 – Структурная схема системы с наблюдателем переменных состояния процесса заиневаания

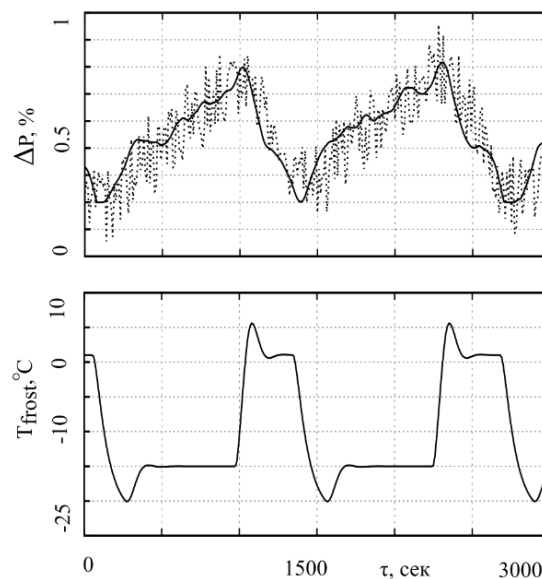


Рис. 6 – Переходные процессы в системе с наблюдателем переменных состояния процесса заиневаания

В результате структурная схема системы с наблюдателем переменной состояния степени заиневаания (Рис. 5) обеспечивает качественную оценку уровня замерзания по достаточно шумному значению перепада давления на теплообменнике.

Также в работе рассмотрена задача контроля влажности в комплексе сушки пиломатериалов. Так, с помощью средств сбора данных, были получены архивы переходных процессов состояния «сухого» и «мокрого» датчиков в сушильной камере.

Помимо основной задачи по определению взвешенной влажности внутри камеры сушки, экспертами были замечены некоторые закономерности при включении вентиляторов в реверс и открытии заслонок. На рис. 7 показаны переходные процессы в камере сушки: где  $T_{dr}$  – температура сухого датчика,  $T_{wt}$  – температура влажного датчика,  $U_{vnt}$  – управление двигателями вентиляции,  $U_{vlv}$  – положение заслонки.

Переходные характеристики сняты при работе в штатном режиме, при котором:

- используется автоматизированный режим управления, где алгоритм работы исполнительных механизмов заранее определен технологической картой;
- исполнительные устройства исправны и их влияние на поведение температур сухого и влажного датчика имеют достаточную корреляцию.

Из рис. 7 видно, что переходные процессы температур содержат в себе спектр сигналов управления. При этом на переходном процессе температуры

сухого датчика лучше отражена зависимость от состояния вентиляторов, а график температуры влажного датчика больше зависит от состояния заслонок.

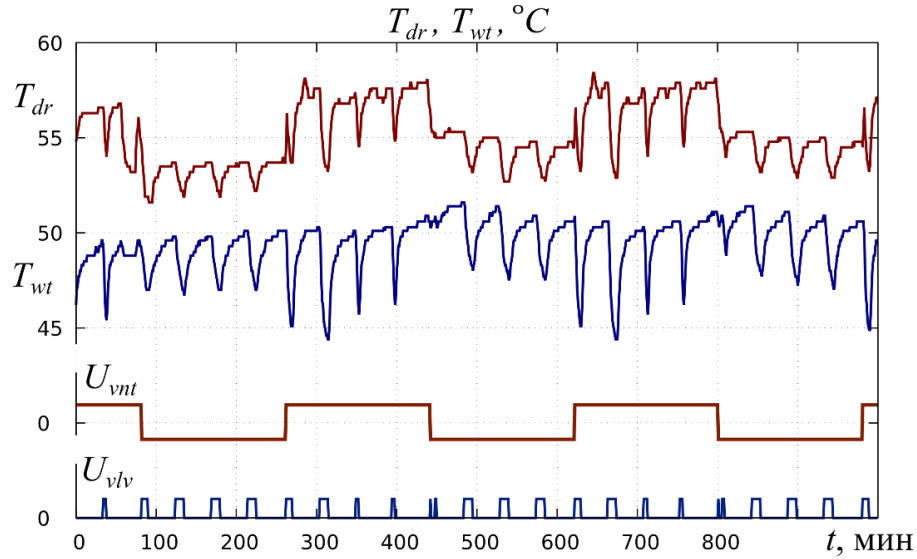


Рис. 7 – Переходные процессы сигналов управления и температур в камере сушки пиломатериалов

Для выполнения более детального анализа, предложено воспользоваться априорной информацией о периодичности управляющих сигналов в автоматизированном режиме работы и выполнить анализ с помощью управляемых узкополосных фильтров. Их применение, вместо преобразования Фурье, позволяет сократить вычислительную нагрузку ПЛК. Разностное уравнение фильтра представлено выражением

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

где  $t_d$  – время дискретизации фильтра,  $y_0, y_1, y_2$  – текущее, прошлое и позапрошрое значения выхода,  $x_0, x_1$  – текущее и прошлое значения входа.

Коэффициенты разностного уравнения (2) определяются по выражениям:

$$a_0 = \omega_r^2, a_1 = \frac{\omega_r}{Q}, b_1 = a_1 k, \omega_r = \frac{2\pi}{T_p}, Q = \frac{\omega_r}{(\omega_{max} - \omega_{min})}, \quad (3)$$

где  $\omega_r$  – выделяемая частота из спектра, выраженная в радианах. Для формирования функционального блока ПЛК удобней эту частоту представлять в виде двух входных параметров: периода  $T_p$  и добротности фильтра  $Q$  (3). Физический смысл значения добротности фильтра (2) представлен отношением резонансной частоты к полосе пропускания.

Ниже (Рис. 8) показаны переходные процессы сигналов на выходе узкополосных фильтров. Выделяемая частота из спектра, выраженной в радианах представлена в виде периода  $T_p$  и добротности фильтра  $Q$ .

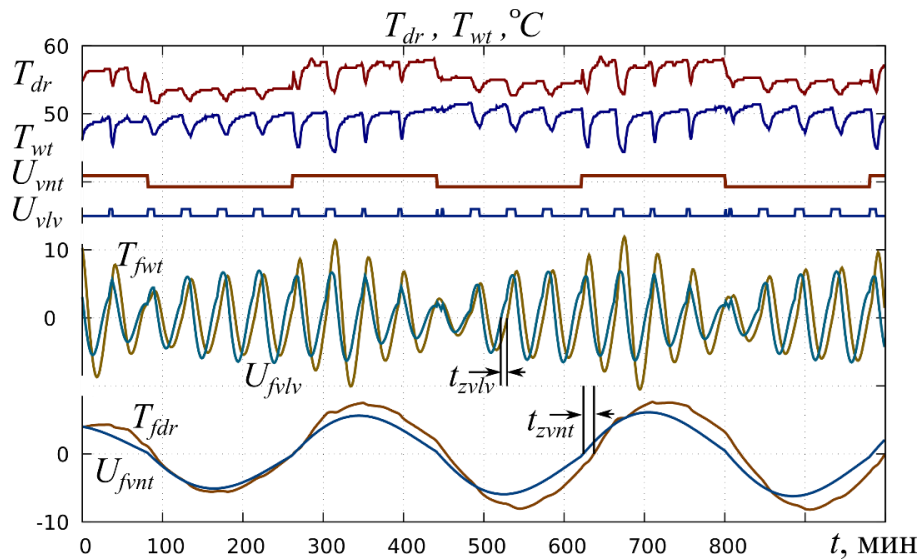


Рис. 8 – Переходные процессы на выходе узкополосных фильтров

Как видно из рисунка, сигналы управления и температуры имеют весьма похожую спектральную составляющую на выходе фильтров при этом наблюдается заметное смещение по фазе, выраженное значениями  $t_{zvnt} \approx 15$  м и  $t_{zvlv} \approx 9$  м. Это связано с инерционными свойствами объекта управления. Для синтеза алгоритма диагностики достаточно учесть только эффект запаздывания в функциональный блок диагностики включены элементы имитации запаздывания в виде трёх апериодических звеньев 1-го порядка.

В узкоспециализированных системах могут встречаться задачи, где требуется измерение нетривиальных физических величин для организации технологического процесса или автоматизированной системы. Такие измерения могут быть вполне понятны из их взаимосвязи с физическими величинами, которые измерены стандартными датчиками в условиях внешних воздействий и могут быть описаны как дифференциальные уравнения. Такая задача требует методики оценки значения нетривиальной физической величиной с учетом как статических, так и динамических связей. В результате выполненных задач в этой главе, получены математические модели и зависимости, адекватно отражающие процесс, достаточные для реализации на объекте.

В главе представлена математическая модель системы вентиляции с тепловым рекуператором, учитывающая динамику инеобразования в системе с двумя теплообменниками, позволяющая корректно оценить степень заиневаания с помощью наблюдателя переменных состояния. Отражен метод разморозки вытяжного канала, основанный на управляемом изменении эффективности теплообмена для поддержания температуры точки росы. Представлен метод диагностики исполнительных механизмов по спектральному анализу температур сухого и влажного датчиков электронного психрометра.



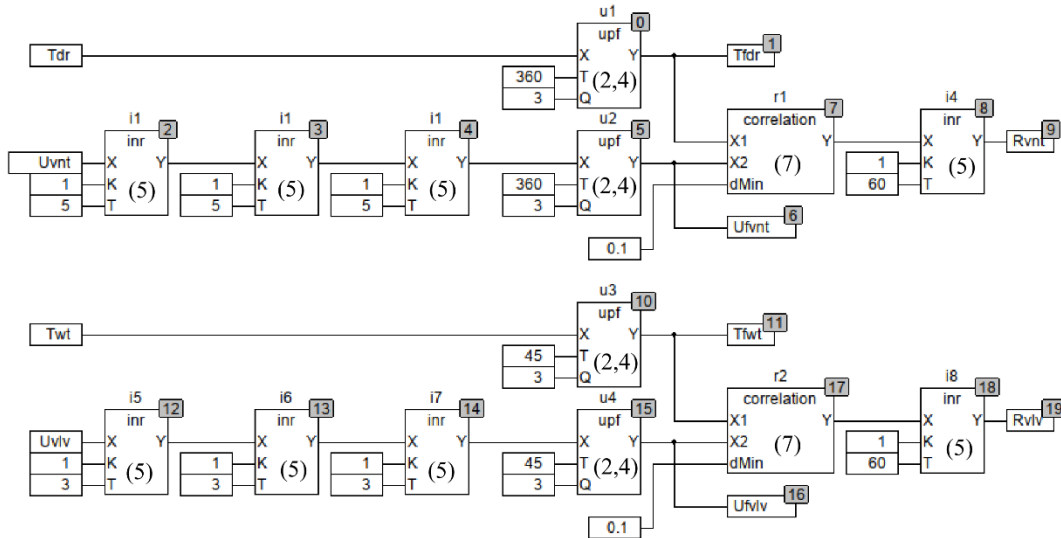


Рис. 10 – Блок-схема диагностики на языке CFC

Функциональные блоки узкополосных фильтров реализованы согласно выражениям (2) и (3).

На рис. 10 также присутствуют блоки вычисления нормированной корреляции сигнала управления и его отклика на значениях датчиков температуры. Из классического выражения для вычисления корреляции

$$R(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{\sum(u_{upf} T_{upf})}{\sqrt{\sum u_{upf}^2 \sum T_{upf}^2}} \quad (4)$$

Принято решение вместо суммы по всей выборке использовать свойство апериодического звена усреднять значения за время выборки, примерно равное времени инерции  $T_o$ . В выражении (4)  $u_{upf}$  – значение выхода узкополосных фильтров для сигнала управления;  $T_{upf}$  – значение выхода узкополосных фильтров для сигнала температуры.

$$r_i(u_{upf}, T_{upf}) = \frac{u_{upf} T_{upf}}{\max(|u_{upf} T_{upf}|, \sigma)} \quad (5)$$

Элемент вычисления корреляции без усреднения представлен выражением, где существует вероятность деления на ноль, которая исключается введением малого значения ( $\sigma \approx 0,1$ ) (5). С выхода элемента вычисления корреляции сигнал поступает на блок усреднения.

На рис. 11 представлены результаты работы блока диагностики в виде переходных процессов в штатном режиме работы камеры сушки.

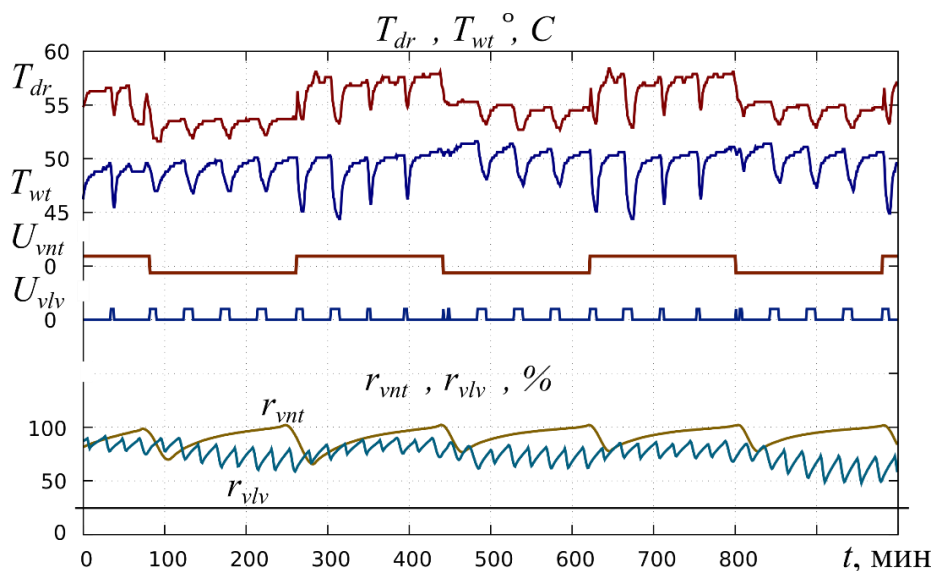


Рис. 11 – Переходные процессы на выходах блоков корреляции

Сигнал на выходе блока корреляции нормирован относительно единицы, и если принять критический уровень ( $\approx 25\%$ ) корреляции спектра сигналов управления и температуры, то 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 (Рис. 12). В этом случае блок диагностики должен определить факт несоответствия управления и поведения объекта.

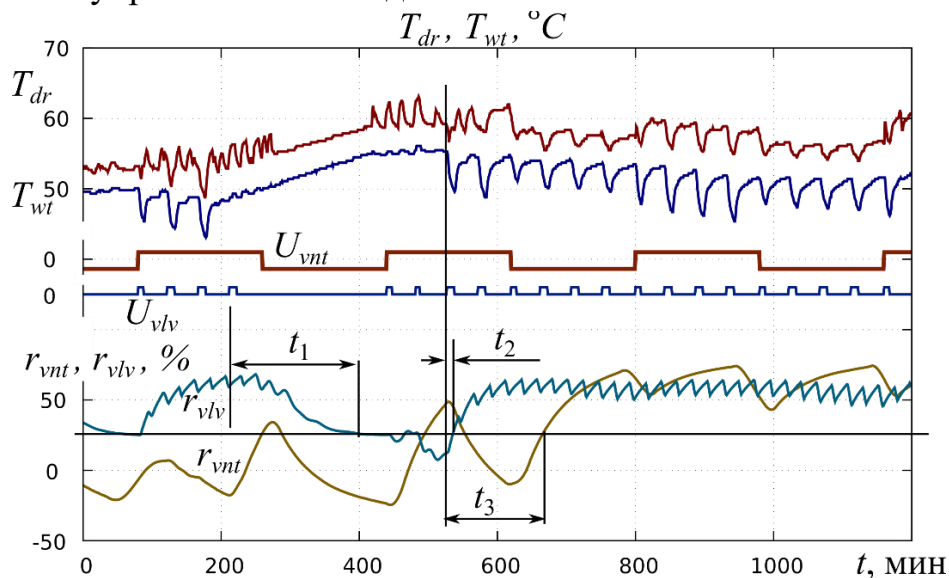


Рис. 12 – Переходные процессы при нештатной ситуации

Как видно из рис. 12 выход блоков корреляции адекватно оценивает управляемость объекта и обнаруживает нештатную ситуацию, в самом худшем случае, в течение 80 минут для канала управления положением заслонки. Восстановление штатной ситуации обнаруживается в течение 5-8 минут для

канала управления приводами заслонки и в течение 60 минут для канала управления вентиляцией.

Математическая модель и наблюдатель состояния позволяют выявлять нештатные режимы работы теплового рекуператора и корректно оценивать уровень заиневаания в условиях помех. Поддержание температуры в точке росы обеспечивает эффективное оттаивание и восстановление нормального режима работы. Частотный и спектральный анализ психрометрической разности температур позволяет контролировать работоспособность исполнительных элементов без дополнительных датчиков.

**Заключение.** В диссертационной работе решена научно-техническая задача повышения работоспособности автоматизированной системы управления вентиляцией с тепловым рекуператором в составе комплекса осушения пиломатериалов на основе методов регистрации и анализа переходных процессов.

Разработана система диспетчерского контроля и сбора данных удалённого технологического процесса, обеспечивающая регистрацию переходных процессов параметров системы вентиляции и осушения, архивирование технологической информации и вывод оперативных данных о состоянии объекта на автоматизированное рабочее место оператора.

Проведён анализ известных исследований по определению нештатных ситуаций на основе данных переходных процессов, по результатам которого разработаны и применены методы диагностики и управления режимами работы процесса вентиляции в комплексе осушения. Предложена математическая модель системы вентиляции с тепловым рекуператором, учитывающая динамические процессы заиневаания в двух взаимосвязанных теплообменниках, а также метод оценки состояния перепада давления в вытяжном канале с использованием наблюдателя переменных состояния в условиях помех. Разработан метод управления процессом разморозки вытяжного канала на основе поддержания температуры точки росы с сохранением пониженной эффективности теплообмена. Для диагностики состояния исполнительных механизмов применён метод спектрального анализа переходных процессов психрометрической разности температур сухого и влажного датчиков, позволяющий выявлять признаки нештатных режимов работы вентиляторов и заслонок без использования дополнительных измерительных средств.

Разработанные методы и алгоритмы реализованы в системе управления комплекса осушения пиломатериалов в виде программных модулей и функциональных блоков, не требующих изменения аппаратной конфигурации и технической документации. Реализация обеспечивает формирование системы автоматизированного контроля нештатных ситуаций и вывод диагностической

информации о состоянии технологического процесса на автоматизированное рабочее место оператора.

### **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 индексируемых Scopus**

4. Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V. Synthesis of an algorithm for automated adjustment of lumber drying based on linguistic information. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2024, vol. 335, no.6, pp. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2024/6/4500
5. Grechushnikov V.V., Shilin A.A., Prokhorov S.V. Transient processes of oscillating method of wood drying control for synthesis of algorithms for adjustment of parameters of resistive humidity sensors. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 2025, vol. 336, no. 7, pp. 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

### **Патент на изобретение**

16. Шилин А.А., Прохоров С.В., Нгуен В. В. Климатическая камера. Патент на изобретение RU 2718357 C1, 11.06.2020. Заявка № 2019133796 от 24.10.2019.
17. Букреев В.Г., Шилин А.А., Прохоров С.В. Устройство для управления теплотреблением Патент на изобретение RU 2658193 C1, 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.