

На правах рукописи



НГУЕН ВАН ВЬОНГ

**МЕТОД СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРОВ И АЛГОРИТМЫ КОНТРОЛЛЕРА
ДВУХКАНАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАМЕРОЙ СУШКИ
ПИЛОМАТЕРИАЛА**

05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Томск - 2021

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

Научный руководитель – Шилин Александр Анатольевич, доктор технических наук

Официальные оппоненты: Жмудь Вадим Аркадьевич, доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматики Новосибирского государственного технического университета

Майстренко Андрей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

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

Защита состоится 17 июня 2021 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд 201.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТУСУРа по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146, а также на официальном сайте ТУСУРа <https://postgraduate.tusur.ru/urls/kbymnnddw>

Автореферат разослан « __ » апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Костюченко Евгений Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

С появлением недорогих программируемых логических контроллеров (ПЛК) стало возможной разработка принципиально новых и недорогих систем управления для различных технологических процессов. При этом реализация разработанных элементов и алгоритмов не представляет трудности, поскольку средства визуального моделирования и тексты скриптов построенных среде MatLab или SciLab легко переносятся на языки, принятые в стандарте IEC 61131-3 для ПЛК. Разработка и развитие отлаженных проектов в данном стандарте значительно расширяет область применения универсальных ПЛК.

Несколько сложнее применять ПЛК в узкоспециализированных системах, где количество инсталляций не так велико по сравнению со стандартными задачами. Основной проблемой использования ПЛК является отсутствие элементов, подпрограмм и алгоритмов используемых для синтеза и построения таких систем управления. Можно найти достаточное количество готовых и весьма дорогих решений наподобие систем управления камерой сушки материалов, стоимость которых вместе с настройкой параметров достигает одного миллиона рублей. Тут возникает проблема доступности документации, математических моделей, встроенных алгоритмов и связей между ними в настраиваемом оборудовании. Как правило, производитель не предоставляет такую информацию, возможно полагая получить заказ на настройку оборудования от эксплуатирующей организации. Проблема встает еще более остро, когда между производителем и эксплуатирующей организацией существует много звеньев, представленных поставщиками, проектными организациями и другими участниками.

Использование недорогих ПЛК в данном случае затруднительно не по причине отсутствия технических возможностей, а по причине отсутствия библиотеки элементов и функциональных блоков призванных решить задачи управления. Разработка и синтез таких элементов системы становится актуальной задачей, позволяющей значительно уменьшить стоимость системы управления.

Для решения поставленной задачи в смежных областях науки есть множество работ. В области описания технологических процессов управления камерой сушки пиломатериалов можно отметить работы Е.С. Богданова, М.П. Дунаева. Разработкой непосредственно систем управления сушильной камерой также занимаются и публикуют работы в зарубежных изданиях Т.Г. Середа, С.Н. Костарев. Проблемами оптимизации посвящены работы Ю. А. Судник, В.С. Закиричного. Поскольку данная система как минимум двухмерная, как по входу, так и по выходу требуются решения в области многомерных систем, которые можно найти в трудах А.Н. Грибкова, Б.Г. Ильясова и др.. Для успешного при-

менения ПЛК для линеаризованных многомерных систем весьма полезны работы Т. Kaczorek.

Решением представленной проблемы может быть качественное математическое моделирование технологического процесса, позволяющее выявить режимы эксплуатации, когда персонал принимает решение перейти в ручной режим из-за неадекватного поведения автоматической системы. Подробная математическая модель технологического процесса позволит выполнить синтез системы управления, учитывающий все основные режимы эксплуатации. Однако такой подход предполагает подробное изучение рассматриваемого технологического процесса включающее описание физических процессов в сушильном агрегате. При этом сам метод не может претендовать на универсальность при повторной реализации подобной системы на другом объекте. По этой причине в данной работе не рассматриваются задачи исследования автоматизированных технологических процессов.

Преследуя цель практической реализации системы управления сушильными агрегатами целесообразно выбрать более простые методы исследования объекта, позволяющие построить обобщенную математическую модель объекта по результатам нескольких экспериментов. Далее следует выполнить синтез системы управления с учетом свойств математической модели, и при успешном результате сформировать методику настройки системы в целом. Такой подход позволит создавать несложно повторяемые системы управления на недорогих микропроцессорных устройствах.

Объектом исследования является система автоматического управления сушильными камерами.

Предметом исследования являются методы и алгоритмы управления в двухконтурной системе управления сушильной камерой.

Целью данной работы является развитие методов и алгоритмов управления системами осушения.

Для достижения поставленной цели необходимо определить и решить следующие **задачи**:

1. Исследовать основные направления развития методов управления системами осушения.
2. Разработать математическую модель многоконтурной системы управления.
3. Разработать экспериментальную установку системы осушения.
4. Исследовать адекватность математической модели на экспериментальной установке.
5. Разработать методику проектирования и синтеза системы управления.

6. Рассчитать согласно полученной методики систему управления на примере сушильной камеры для пиломатериала.
7. Реализовать разработанные алгоритмы в системе управления камерой сушки древесины.

Научная новизна:

1. Предложена математическая модель двухканальной системы, отличающаяся применением аппроксимированных поверхностей в качестве статической зависимости выходных переменных состояния от сигналов управления.
2. Предложен метод аппроксимации поверхности построенный на полиноме Лагранжа, отличающийся от алгоритмов поиска минимума среднеквадратичной невязки прямым методом вычисления.
3. Предложена методика синтеза двухканальной нелинейной системы управления осушением, отличающаяся от традиционных использованием корректирующих множителей для обеспечения устойчивости и управляемости четырех-контурной системы..

Практическая значимость выполненных исследований, заключается в возможности использовать математическую модель и реализовывать алгоритмы управления на недорогих микропроцессорах в актуальных задачах сушки древесины и хранения материалов в условиях влажной внешней среды. По результатам работы успешно выполнен проект системы управления технологическим процессом сушки пиломатериалов.

Методология и методы исследования построены на основе анализа математических моделей основных элементов системы, исследования работы основных режимов методов моделирования. Адекватность разрабатываемых моделей проверена на экспериментальной установке, разработанной автором.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель системы управления процесса сушки пиломатериалов, построенная на основе архивных данных установившихся значений и позволяющая учесть нелинейные свойства объекта управления при изменении заданных значений потока воздуха и мощности подогрева в камере осушения.
2. Метод аппроксимации статических связей на базе полинома Лагранжа при вычислении параметров объекта управления, использующий прямой нерекурсивный алгоритм, который определяет минимальные требования к вычислительным ресурсам программируемых логических контроллеров.
3. Методика синтеза четырех-контурной системы управления, основанная на анализе коэффициентов передачи контуров с использованием корректирующих множителей, гарантирующие устойчивость нелинейной двухка-

нальной системы во всех точках рабочей области изменения сигналов управления.

4. Программно-аппаратные решения, алгоритмы и функциональные блоки системы управления, реализующие основные режимы работы промышленной камеры осушения пиломатериалов с требуемой точностью.

Достоверность полученных результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований, проведенных на компьютерных моделях, а также на специально разработанном экспериментальном стенде. Результаты и выводы диссертационной работы в полной мере согласуются с результатами, полученными другими авторами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.05 – «Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления». В работе предложены новые функциональные блоки, элементы библиотеки для микроконтроллера, работа которых подтверждена результатами моделирования и применением в системе управления камерой сушки пиломатериалов (соответствует п. 1). Проведены экспериментальные исследования двухконтурной системы, выполнен анализ поверхности коэффициентов передачи по четырем контурам с обратной связью, выделены особые области изменения значения сигналов управления, в которых применена коррекция коэффициента передачи (соответствует п. 2). Использование полинома Лагранжа в качестве аппроксимации статических связей двухконтурной системы позволило разработать новый метод синтеза системы управления, обеспечивающий устойчивость в рабочей области функционирования системы (соответствует п. 3). Предложенный в работе метод синтеза двухконтурной системы позволяет повысить робастность системы управления и предсказуемость ее работы (соответствует п. 4).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных семинарах и конференциях: ГНИИ "Нацразвитие"; Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири-2018; Автоматизированный электропривод и промышленная электроника; Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – ФГБОУ ВО «ТУСУР», 2019; Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 2019 г.

Личный вклад. Автор принимал активное участие в разработке экспериментального стенда и программного обеспечения для реализации алгоритмов управления и формирования статистики. Является автором идеи использования полинома Лагранжа в качестве аппроксимирующей поверхности. Предложен-

ные автором алгоритмы двухконтурного управления реализованы в действующей системе управления сушкой пиломатериала.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 13 печатных публикациях; три из которых [1, 2, 3] изданы в журналах, рекомендованных ВАК; одна публикация [4] проиндексирована в базе Scopus и WoS; 6 – в тезисах докладов [5–10]; один патент на изобретение [11]; два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [12, 13].

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 155 страниц, включая 63 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 163 наименования.

Краткое содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая ценность выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен краткий обзор научных направлений, которые представляют интерес для синтеза систем управления осушением материалов. Также приведен обзор смежных направлений связанных с добычей воды на холодных панелях. Рассмотрены основные проблемы использования методов линейной теории автоматического управления при исследовании нелинейных объектов с изменяемыми параметрами объекта.

Показано, что хорошей управляемостью систем осушения в камерах обладают системы с обдуванием камеры и утилизацией влаги во внешнюю среду. Воздух, которым обдувается материал, должен иметь достаточно низкую влажность для обеспечения процесса сушки. Проблемы могут возникнуть при высокой влажности внешней среды. И не смотря, на то, что в этих условиях химические методы поглощения влаги весьма эффективны, можно использовать конденсационные методы сушки. При высокой влажности внешней среды или в замкнутых циклах кондиционной сушки необходимым элементом является холодная панель, где следует поддерживать температуру точки росы для эффективного выделения влаги на панели.

Приведены материалы научных работ, где утверждается, что максимальная эффективность выделения влаги достигается подбором скорости потока воздуха через холодную панель. Для реализации такого процесса требуется двухконтурная система управления нагревом и потоком, где связи между средствами управления и измеряемыми параметрами могут быть нелинейными и, возможно, неоднозначными.

Во **второй главе** рассмотрен метод формирования математической модели исключительно из результатов экспериментов. В первой части главы кратко отмечены сложности описания физических процессов и в качестве альтернативного решения предложен лабораторный стенд. В диссертации имеется структурная схема и фотографии стенда. При создании стенда применены технологии 3D-печати и программные средства CoDeSys для программирования ПЛК.

После выполнения экспериментальных исследований и анализа предложено решение использования интерполяционного многочлена Лагранжа. Для задачи интерполяции с двумя входными переменными многочлен представлен выражением

$$L(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M f_{nm} l_{nm}(x, y), \quad (1)$$

N и M – количество узлов интерполяции, в работе оба значения равны трем, f_{nm} – полученные в результате эксперимента значения выходов. Принято следующее соответствие: $x = U_f$, $y = U_h$, где U_f и U_h нормированные сигналы управления мощностью вентилятора и нагревателя.

Базисные полиномы $l_{nm}(x, y)$ определяются следующим обобщённым выражением

$$l_{nm}(x, y) = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^N \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq m}}^M \frac{(x - x_i)(y - y_j)}{(x_n - x_i)(y_m - y_j)}. \quad (2)$$

После подстановки данных эксперимента получены выражения описывающие статические связи входов U_f и U_h с температурой радиатора (холодной панели)

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{t}_r(U_h, U_f) = & 125.25 U_h^2 U_f - 156.5625 U_h^2 U_f^2 - 39.0625 U_h^2 + \\ & + 125.25 U_h U_f^2 - 101.7625 U_h U_f + \\ & + 46.905 U_h - 25.05 U_f^2 + 25.04 U_f - 1.881, \end{aligned} \quad (3)$$

и температуры в камере

$$\begin{aligned} \overset{\circ}{t}_b(U_h, U_f) = & -72.3125 U_h^2 U_f + 29.375 U_h^2 U_f^2 + 5.475 U_h^2 - \\ & - 2 U_h U_f^2 + 27.7625 U_h U_f + 32.965 U_h + \\ & + 0.7875 U_f^2 - 4.8475 U_f + 22.688. \end{aligned} \quad (4)$$

Приведены основные тезисы, позволяющие упростить математическую модель:

1. Поскольку функции Лагранжа (3) и (4) гладкие (рисунки имеются в основном тексте диссертации), можно рассматривать линейную систему в точках равновесного состояния. Таким образом, все точки могут быть точками

равновесного состояния, так как по обоим входным переменным поверхности не имеют разрывов любого рода.

2. Для обоих направлений изменения входных величин можно выбрать более медленное дифференциальное уравнение или передаточную функцию. Этот выбор обусловлен целью сохранения или улучшения условий устойчивости замкнутой системы при изменении динамических параметров.

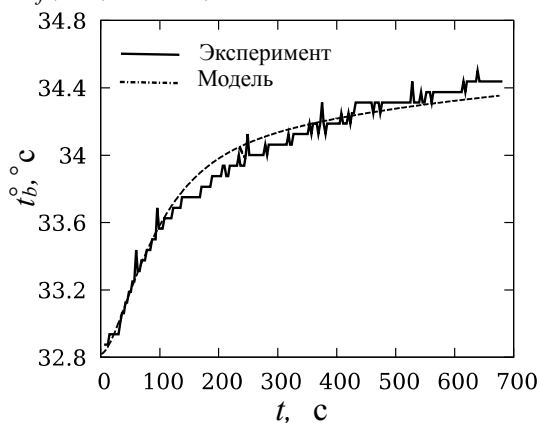
Далее приведены пояснения для второго тезиса, где в регуляторе используется ПИ-закон. Из полученных в результате экспериментов переходных процессов (рис. 1) принято решение использовать передаточную функцию объекта

$$W_{ob}(s) = \frac{k_o}{(1+T_1s) \cdot (1+T_2s)}, \quad (5)$$

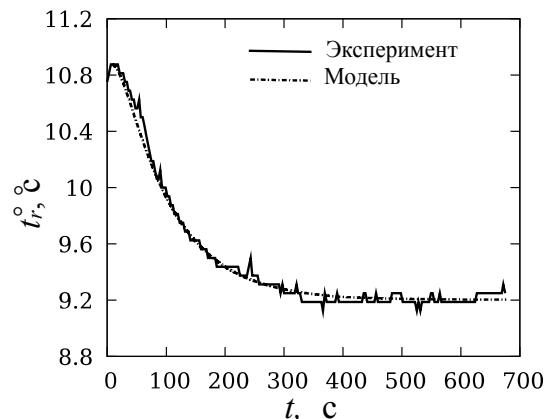
где $T_1=30$ с, $T_2=150$ с соответствуют медленному ПП, а $T_1=10$ с, $T_2=70$ с соответствуют быстрому ПП. Коэффициент передачи k_o , как показано в 3-й главе у каждого контура обратной связи свой и представлен функцией зависящей от значений управления. В работе применён метод D-разбиения для анализа устойчивости контура, где приведено пояснение к выбору k_o из возможных значений в различных точках равновесного состояния.

На рис. 6 показана структурная схема двухконтурного объекта. Статические связи в виде функций Лагранжа (3) и (4) реализованы в виде «суперблока» с двумя входами (U_h, U_f) и двумя выходами (T_b, T_r). Динамика объекта представлена блоками $Dob1$ и $Dob2$

Адекватность математической модели подтверждена сравнением результатов эксперимента и моделирования. Практически все результаты свидетельствуют об адекватности математической модели во всех точках равновесного состояния для значений управления $U_h \in (0.2 \dots 0.6)$, $U_f \in (0.2 \dots 0.6)$. На рис. 1 приведены результаты эксперимента, где начальным условиям соответствуют значения $(U_h, U_f) = (0.317, 0.368)$, целевым условиям соответствуют значения $(U_h, U_f) = (0.33, 0)$.



а) $\dot{t}_b(U_h = \text{const}, U_f - \Delta)$



б) $\dot{t}_r(U_h = \text{const}, U_f - \Delta)$

Рисунок 1 Переходные процессы при изменении мощности вентилятора

Для реализации экспериментов использована среда программирования CoDeSys, которая позволяет сохранять результаты экспериментов непосредственно на ПЛК. Использование устройств из проекта Arduino позволило получить совместно с виртуальным ПЛК из CoDeSys недорогой полнофункциональный ПЛК для управления экспериментальным стендом.

В конце главы приведена методика построения математической модели.

Важно отметить, что данная методика применима для двухмерных объектов, у которых чётко выражена статическая связь входов и выходов. То есть, её нельзя использовать для объектов с астатизмом.

Третья глава посвящена синтезу двухконтурной системы управления для объекта, представленного во второй главе. Система представлена структурной схемой в виде функциональных блоков среды SciLab на рис. 6. Предложено использовать ПИ-регулятор с вынесенным пропорциональным коэффициентом с целью формирования собственного коэффициента по всем четырём контурам с обратной связью (k_{bh} , k_{rh} , k_{bf} , k_{rf}).

На рисунке можно увидеть четыре замкнутых контура управления. Ниже приведём сокращённые последовательности обозначений переменных состояния или функциональных блоков для каждого контура:

1. $T_b \rightarrow E_{tb} \rightarrow k_{bh} \rightarrow U_h \rightarrow Dob1 \rightarrow NL \rightarrow T_b$.
2. $T_r \rightarrow E_{tr} \rightarrow k_{rh} \rightarrow U_h \rightarrow Dob1 \rightarrow NL \rightarrow T_r$.
3. $T_b \rightarrow E_{tb} \rightarrow k_{bf} \rightarrow U_f \rightarrow Dob2 \rightarrow NL \rightarrow T_b$.
4. $T_r \rightarrow E_{tr} \rightarrow k_{rf} \rightarrow U_f \rightarrow Dob2 \rightarrow NL \rightarrow T_r$.

Для настройки ПИ-регуляторов используется передаточная функция в заданной точке равновесного состояния, где k_o для каждого контура представлена значениями k_{hb} , k_{hr} , k_{fb} , k_{fr} . Их значения можно получить из частных производных нелинейной функции Лагранжа (3, 4). В результате коэффициенты передачи в точках равновесия представлены выражениями:

$$k_{hb}(U_h, U_f) = \frac{\partial t_b^\circ}{\partial U_h} = 10.95 U_h + 27.7625 U_f + 58.75 U_h U_f^2 - 2 U_f^2 - 144.625 U_h U_f + 32.965, \quad (6)$$

$$k_{hr}(U_h, U_f) = \frac{\partial t_r^\circ}{\partial U_h} = -78.125 U_h - 101.7625 U_f - 313.125 U_h U_f^2 + 125.25 U_f^2 + 250.5 U_h U_f + 46.905, \quad (7)$$

$$k_{fb}(U_h, U_f) = \frac{\partial t_b^\circ}{\partial U_f} = 27.7625 U_h + 1.575 U_f + 58.75 U_h^2 U_f - 72.3125 U_h^2 - 4 U_h U_f - 4.8475, \quad (8)$$

$$k_{fr}(U_h, U_f) = \frac{\partial t_r^\circ}{\partial U_f} = -101.7625 U_h - 50.1 U_f - 313.125 U_h^2 U_f + 125.25 U_h^2 + 250.5 U_h U_f + 25.04. \quad (9)$$

Для наглядности в диссертации имеются все трехмерные изображения этих коэффициентов для выражений (6)–(9) соответственно. Три из них не меняют свой знак. В диссертации показано, что для контуров с таким коэффициентом достаточно выбрать максимальное значение на поверхности и настроить ПИ-регулятор для обеспечения устойчивости во всей рабочей области.

На рис. 2 показана поверхность $k_{bf}(U_h, U_f)$, где можно увидеть изменение знака коэффициента передачи. Следовательно, на проекции можно определить область изменения значений управления, где возникает положительная обратная связь и нарушение устойчивости.

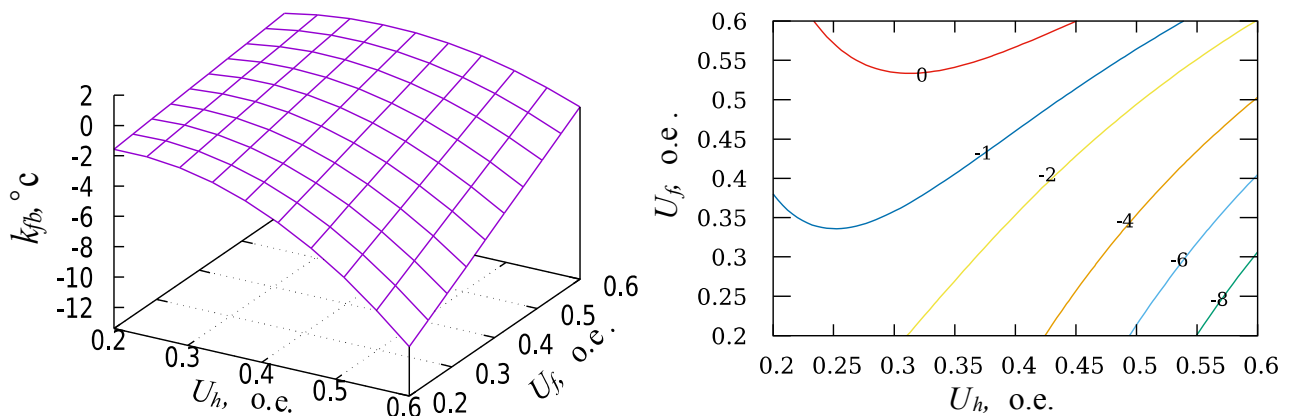
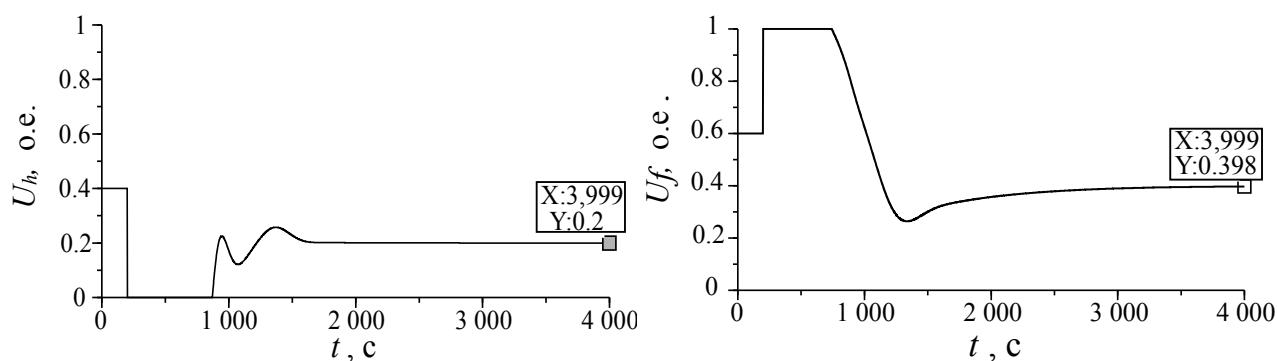
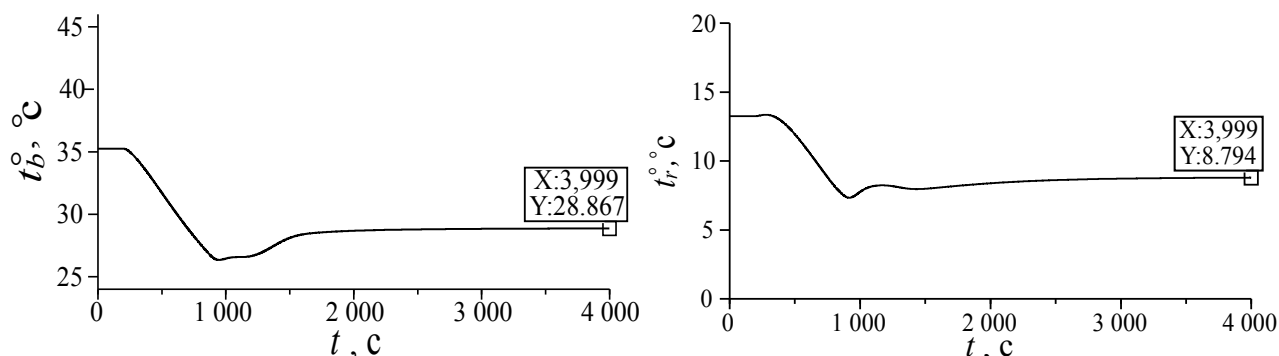


Рисунок 2 Поверхность коэффициента передачи $k_{bf}(U_h, U_f)$ и его проекция

В диссертации показано несколько переходных процессов, где влияние этого коэффициента приводит к ожидаемой потере устойчивости. Однако наличие четырех контуров, в некоторых режимах, позволяет системе управления достигать целевых значений выхода, даже при наличии положительной обратной связи. На этапе настройки системы управления реального объекта можно не обнаружить влияние положительной обратной связи.

На рис. 3 и 4 показаны результаты моделирования, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации.

Рисунок 3 Переходные процессы сигналов управления (U_h , U_f)Рисунок 4 Переходные процессы переменных состояния (T_b , T_r)

Для достижения целевых значений выхода нужно понизить значения обоих выходов. И именно это обслуживающий персонал на уровне интуиции понимает и считает, что с момента изменения (200 с) задающего воздействия U_f до времени соответствующего 850 с система ведёт себя неадекватно или даже неправильно. За это время 650 с персонал может принять решение перевести автоматическую систему в ручной режим.

В работе предложено решение включить в систему корректирующий множитель для k_{bf} исходя из его функции поверхности коэффициента в разных точках равновесного состояния. Анализ поверхности даёт представление, которое можно описать в виде лингвистических утверждений. Например, k_{bf} : максимальный; значительный; незначительный; бесполезный, в окрестности нуля – объект не реагирует на управление; незначительный с изменением знака; значительный с изменением знака. Множитель представлен выражением

$$m_{fb}(k_{fb}) = \begin{cases} m_0, & \text{if } \left(\frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} < n_0 \right), \\ m_0 + \left(\frac{m_1 - m_0}{n_1 - n_0} \right) \cdot \left(\frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} - n_0 \right), & \text{if } \left(n_0 \leq \frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} < n_1 \right), \\ m_1 + \left(\frac{m_2 - m_1}{n_2 - n_1} \right) \cdot \left(\frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} - n_1 \right), & \text{if } \left(n_1 \leq \frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} < n_2 \right), \\ m_2 + \left(\frac{m_3 - m_2}{n_3 - n_2} \right) \cdot \left(\frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} - n_2 \right), & \text{if } \left(n_2 \leq \frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} < n_3 \right), \\ m_3, & \text{if } \left(n_3 \leq \frac{k_{fb}}{k_{maxfb}} \right), \end{cases} \quad (10)$$

где $(n_0; n_1; n_2; n_3) = (0,1; 0,25; 0,75; 1)$,
 $(m_0; m_1; m_2; m_3) = (0; 0,2; 0,8; 1)$.

Параметры $(n_0; n_1; n_2; n_3)$ и $(m_0; m_1; m_2; m_3)$ обеспечивают плавный переход значения коэффициента передачи регулятора исключая резкие изменения с сигнала управления вентилятором.

Структурная схема двух-контурной системы с коррекцией k_{bf} показана на рис. 5

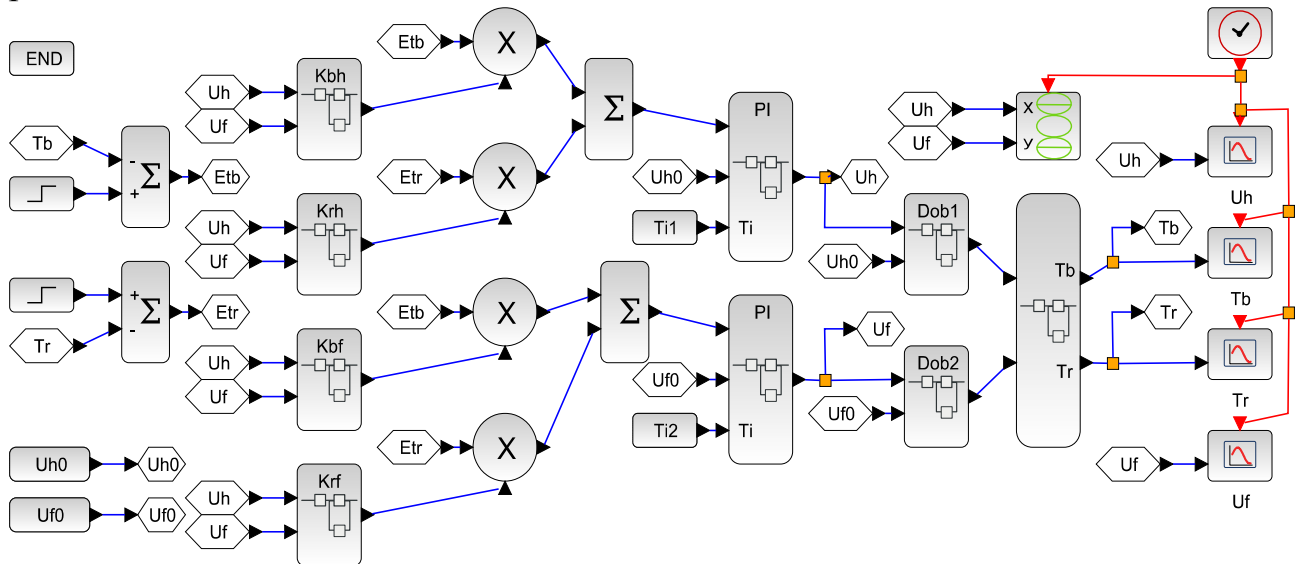
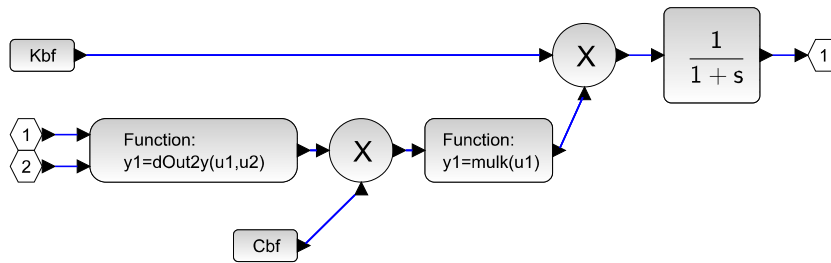


Рисунок 5 Структурная схема двух-контурной системы с коррекцией k_{bf}

В схему включены пропорциональные коэффициенты ПИ-регуляторов по всем четырем веткам обратных связей перемноженные на корректирующий множитель, который формируется в виде подпрограммы показанной на рис. 6

Рисунок 6 Структурная схема коррекции k_{bf}

Также система с коррекционными множителями обеспечивает предсказуемый выход из неустойчивой точки. Более наглядно это можно увидеть на параметрическом графике в виде траектории сигналов управления на рис. 7, где показаны траектории (U_h , U_f): слева без корректирующего множителя, справа с корректирующим множителем.

На траектории справа видно, что весь процесс проходит в рамках рабочей зоны ($U_h \in (0,2; 0,6)$; $U_f \in (0,2; 0,6)$) и обеспечивается выход из проблемной зоны (0,4;0,6).

В конце главы приведена обобщённая процедура синтеза элементов системы управления.

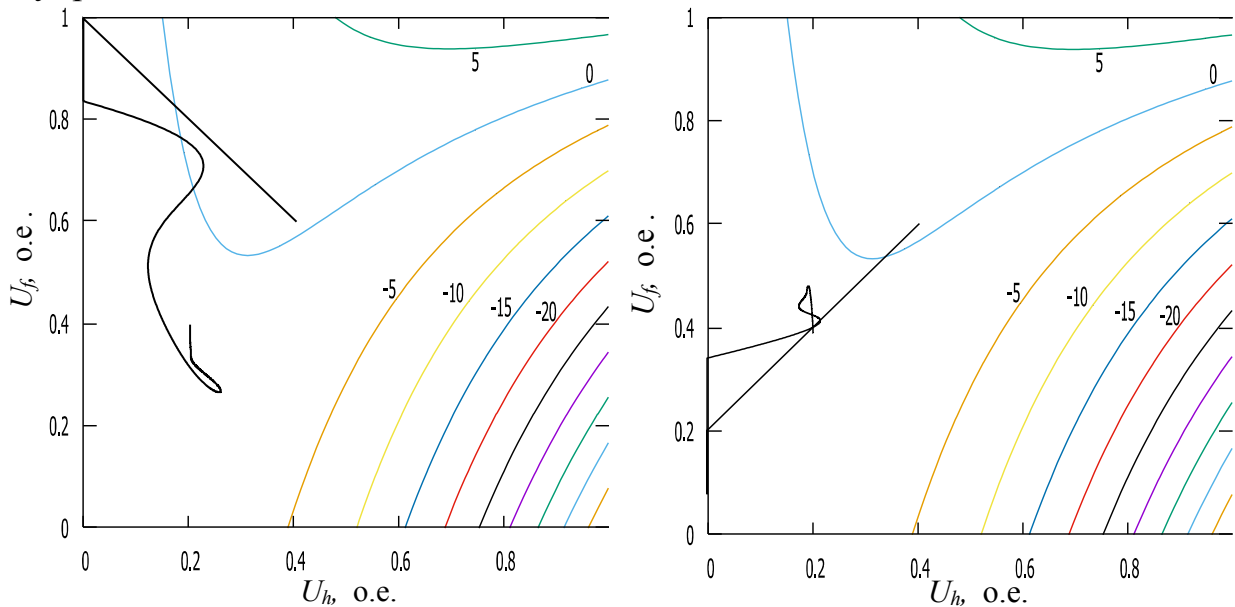


Рисунок 7 Траектории сигналов управления

В четвёртой главе рассмотрено применение предложенного метода синтеза в систему управление камерой сушки пилломатериала. Для реализации основных элементов и функциональных блоков необходимых для работы системы разработаны функциональные элементы ПЛК для вычисления влажности воздуха в камере и пилломатериала.

Датчик влажности воздуха реализован с помощью двух датчиков температуры с использованием психометрической таблицы влажности. Проведён анализ нескольких функций-аппроксимаций для вычисления влажности из показате-

ния термометров. Для вычисления коэффициентов применен метод наименьших квадратов, где коэффициенты аппроксимации можно вычислить с помощью матричного уравнения.

Для каждого полинома оценена погрешность вычисления согласно выражению среднеквадратичного отклонения

$$CKO = \sqrt{\frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} (z_i - \hat{z}_i)^2}. \quad (11)$$

Результаты сведены в таблицу, где дополнительно приведено количество вычислений и произведение количества вычислений на ошибку.

Поскольку сам метод, основанный на психометрической разности температур без учёта давления, состава воды имеет довольно большую погрешность от 2%, в использовании более точных аппроксимаций нет особого смысла. По этой причине использована аппроксимация

$$\hat{z}_2 = f(x, y, a_{02}, a_{12} \dots a_{32}) = a_{02} + a_{12}x + a_{22}y + a_{32}x^2.$$

Датчик влажности пиломатериала реализован исходя из данных о измерении электрического сопротивления исследуемого материала. Функция

$$L_R(\varphi) = \log_{10}(R(\varphi)), \quad (12)$$

где L_R – десятичный логарифм электрического сопротивления R , которое зависит от влажности древесины φ , в рабочей области измерений с незначительной погрешностью может рассматриваться как линейная.

В работе, после нескольких преобразований получено выражение

$$\varphi = \varphi_o + a_k \cdot \log_2 \left(\frac{R(\varphi_o)}{R(\varphi)} \right), \quad (13)$$

позволяющее вычислить влажность φ . Влажности φ_o соответствует сопротивление $R(\varphi_o)$, для определённой конструкции зонда, которую в процессе эксплуатации часто меняют. По этой причине требуется настройка φ_o и a_k для новой конструкции зонда.

В четвертой главе разработан модуль вычисления влажности материала с простой настройкой. Для настройки предварительно устанавливаются значения $\varphi_o = 0$, $a_k = 1$ и выполняется измерение двух экземпляров материала с различной влажностью $\widetilde{\varphi}_1, \widetilde{\varphi}_2$. Влажность этих экземпляров измеряется эталонным прибором, а результаты измерения φ_1, φ_2 используются в вычислении параметров согласно выражения

$$a_k = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\widetilde{\varphi}_2 - \widetilde{\varphi}_1}, \varphi_o = \varphi_1 \cdot \widetilde{\varphi}_2 - \frac{\varphi_2 \cdot \widetilde{\varphi}_1}{\widetilde{\varphi}_2 - \widetilde{\varphi}_1}. \quad (14)$$

ПЛК разработан на базе микропроцессора STM32f103, который имеет в себе все необходимые аппаратно поддерживаемые элементы. В диссертации приведена принципиальная схема, конструкция показана на рис. 8.

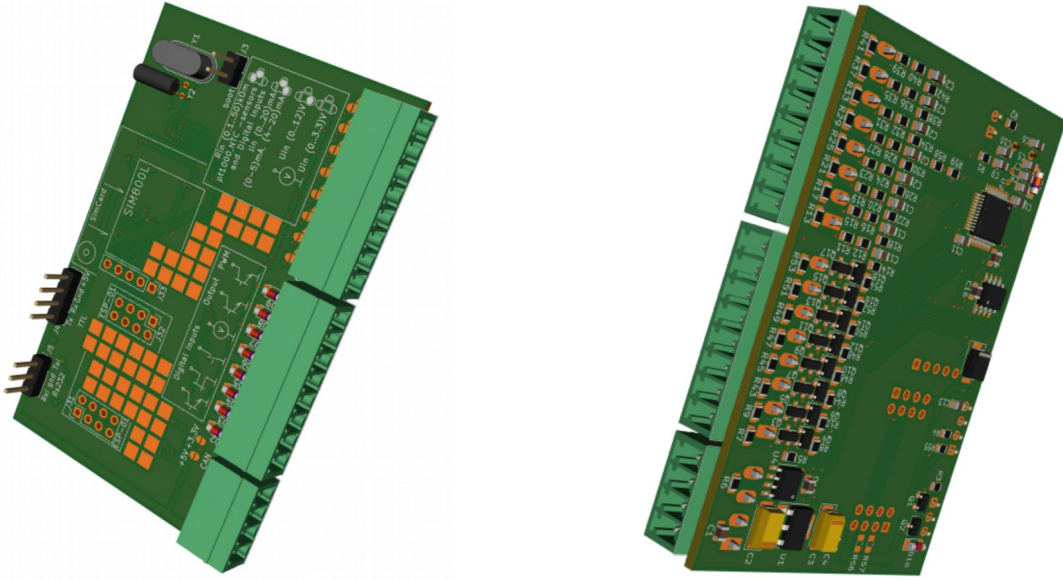


Рисунок 8 Изображение контроллера.

В качестве основы программного обеспечения принята свободно распространяемая операционная система реального времени RTos. Для обеспечения работы созданы и реализованы программные драйверы всех используемых периферийных элементов. Основные методы реализации, протоколы, библиотеки и модули отражены в свидетельствах о регистрации программ [12, 13].

Все выражения в (1,2) построены в рамках обобщённого полинома

$$l_{nm}(x, y) = (c_1 \cdot x^2 y^2 + c_2 \cdot x^2 y + c_3 \cdot x^2 + c_4 \cdot x y^2 + c_5 \cdot xy + c_6 \cdot x + c_7 \cdot y^2 + c_8 \cdot y + c_9). \quad (15)$$

Так для каждого l_{nm} можно определить вектор

$$L_{nm} = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_9), \quad (16)$$

а для каждой пары (x_n, y_m) вычислить вектор значений

$$P_{xy} = (x^2 y^2, x^2 y, x^2, x y^2, xy, x, y^2, y, 1). \quad (17)$$

Тогда выражение (15) можно записать в матричном виде

$$l_{xy} = L_{nm} \cdot P_{xy}^T. \quad (18)$$

Сложение базисных функций

$$L(x, y) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M z_{nm} l_{nm}(x, y) = L \cdot P_{xy}^T, \quad L = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M (z_{nm} \cdot L_{nm}), \quad (19)$$

где $N=3$ и $M=3$ – количество узлов интерполяции. Постольку значение z_{nm} – результат измерения выхода канала управления в точке (x_n, y_m) является скаляр-

ным значением, произведение на вектор соответствует поэлементному перемножению. Строка L соответствует по размерности строке в выражении (16).

$$\begin{aligned}
 l_{xy} &= c_1 x^2 y^2 + c_2 x y^2 + c_3 x^2 y + c_4 x y + c_5 x^2 + c_6 y^2 + c_7 x + c_8 y + c_9, \\
 \frac{\partial l_{xy}}{\partial x} &= 2c_1 x y^2 + 2c_2 y + 2c_3 x + c_4 + 2c_5 x + c_7, \\
 \frac{\partial l_{xy}}{\partial y} &= 2c_1 x^2 y + 2c_2 x + 2c_3 x^2 + 2c_6 y + c_8,
 \end{aligned} \tag{20}$$

записаны так, чтобы хорошо просматривалось матричное перемножение вектора L и столбца P_{xy} . Из выражения (20) видно, что для вычисления коэффициентов передачи в точках равновесного состояния можно пользоваться матричным перемножением (18)

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial l_{xy}}{\partial x} &= \partial L_x \cdot P_{xy}, \partial L_x = [0; 2c_1; 0; 2c_3; 0; c_2; 2c_5; c_4; c_7], \\
 \frac{\partial l_{xy}}{\partial y} &= \partial L_y \cdot P_{xy}, \partial L_y = [0; 0; 2c_1; 2c_2; c_3; 0; c_4; 2c_6; c_8].
 \end{aligned} \tag{21}$$

Выполнение всех необходимых экспериментов для подтверждения работы метода на действующем объекте практически невозможно, поскольку обслуживающий персонал не позволит рисковать пилотматериалом. По этой причине есть возможность привести лишь несколько переходных процессов, которые естественно возникли в моменты перехода между технологическими этапами сушки пилотматериала. На рисунках 9 и 10 показаны переходные процессы сигналов управления (мощности нагрева и степени открытия заслонки) и выхода (температуры и влажности). Из переходных процессов можно увидеть устойчивую работу, и что важно отсутствие ложных решений в условиях близких к состоянию закрытой заслонки. Зашумленный вид сигналов управления связан с тем, что влажность φ определяется по психометрической разности, где изменение температуры на пол градуса влечет за собой изменение оценки влажности в некоторых точках аппроксимации на 4-5%. Поскольку измерение АЦП подвержено шуму и ошибкам дискретизации, вариация измерения влажности значительна – $\pm 5\%$. В результате шумовая составляющая через пропорциональное звено ПИ-регулятора значительно влияет на сигналы управления (U_h, U_f).

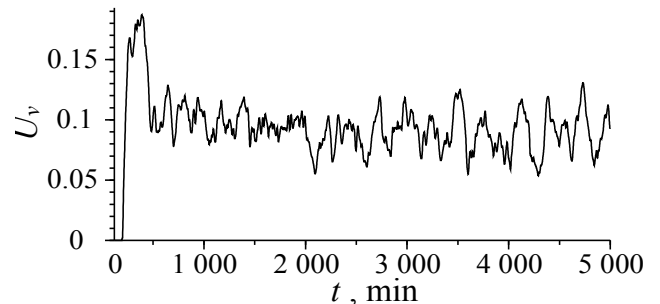
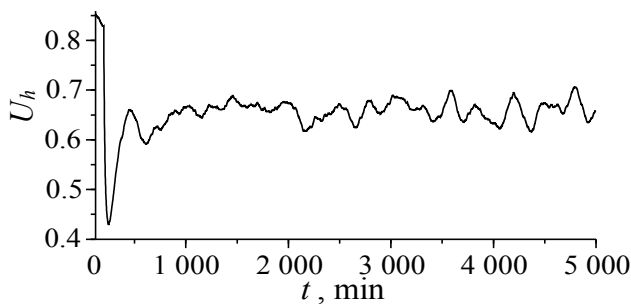


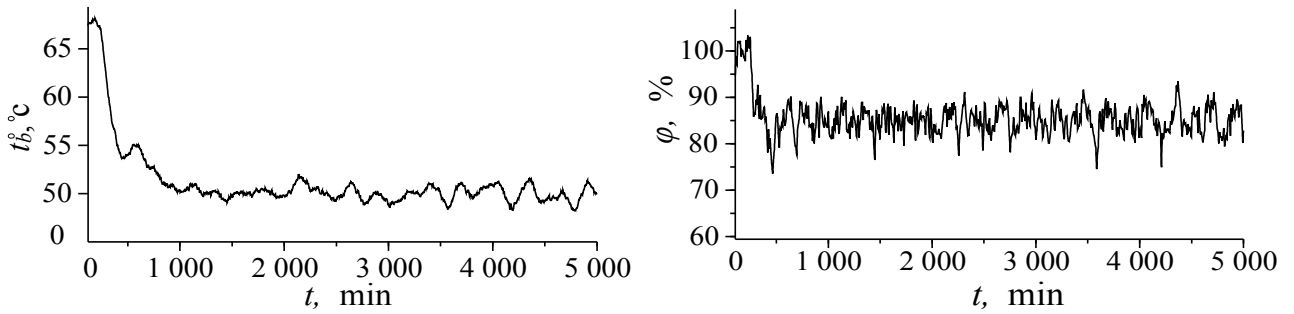
Рисунок 9 Переходные процессы сигналов управления (U_h, U_v)

Рисунок 10 Переходные процессы температуры и влажности в камере

Заключение. В диссертационной работе предложен метод построения математической модели объекта, отражающий его нелинейные свойства, отличающийся от известных применением многочлена Лагранжа для аппроксимации нелинейной статической связи. Преимущество такого метода заключается в использовании прямого вычисления, вместо итеративного, требующего большого объема вычислений. Метод построения математической модели предполагает использование экспериментальных данных. Для этого разработана экспериментальная установка, позволяющая выполнить большинство исследований в лабораторных условиях. Адекватность математической модели поведению экспериментальной установки показана методом сравнения переходных процессов в математической модели и в установке.

По результатам моделирования и анализа нелинейных свойств предложена методика синтеза системы управления включающая в себя весь необходимый набор функций, подпрограмм, алгоритмов и функциональных блоков, пригодных для реализации в ПЛК. Показано, что данную модель можно рассматривать как линейную в точках равновесного состояния, что позволяет использовать методы и подходы теории автоматического управления в линейных системах.

Для реализации разработанных методов, алгоритмов и функциональных блоков выбран действующий объект управления: камера сушки пиломатериала объемом 80 куб.м. Разработан недорогой ПЛК на базе микропроцессора STM32F103, позволяющий сохранять в EEPROM памяти переходные процессы входных и выходных сигналов, по которым сформирован массив исходных данных для построения математической модели.

По результатам реализации метода сформирована система автоматического управления, обеспечивающая устойчивую и предсказуемую работу исполнительской части сушильной камеры.

Полученные результаты работы могут быть полезны для синтеза двухконтурных нелинейных систем управления, где объект управления имеет опреде-

лённые результатами эксперимента или эксплуатации статические связи входов и выходов.

Публикации 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. Нгуен В.В. Метод измерения влажности пиломатериала реализуемый на ПЛК / Нгуен Ван Вьонг, А.А. Шилин, П.М. Момот // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021;25(1) – С. 113–124.

Публикации в трудах конференций, индексируемых WoS и Scopus

4. Perevoshchikov F. P. et al. Identification of Mathematical Model of Drying Unit / F P Perevoshchikov, N V Vuong, A K Shabo and A A Shilin // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 795. – №. 1. – С. 012021.

Публикации в трудах конференций

5. Вьонг Н. В., Слепцов Д. В., Шилин А. А. Математическая модель управляемой системы утилизации влаги из контейнеров //Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири. – 2018. – С. 115-119.
6. Нгуен В. В., Пластунова С. Н. Автономизация каналов управления многомерными объектами на основе компенсаторов //Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ" Нацразвитие". – 2020. – С. 48-51.
7. Нгуен В. В., Попов С. С. Применение метода наименьших квадратов и метода Лагранжа при обработке результатов эксперимента //Сборник избранных статей по материалам научных конференций ГНИИ" Нацразвитие". – 2020. – С. 51-53.
8. Нгуен В. В., Прохоров С. В. Вычисление энергетически оптимальной температуры холодной панели в системе осушения //Автоматизированный электропривод и промышленная электроника. – 2018. – С. 53-58.
9. Нгуен В. В., Устименко А. Н. Экспериментальная установка исследования процессов осушением воздуха на базе Arduino и CoDeSys //Электронные

средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – №. 1-2. – С. 87-91.

10. Перевощиков Ф. В., Выонг Н. В. Построение системы управления сушильной установки на базе математической модели //Современные проблемы машиностроения: сборник научных трудов XII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 28 октября-1 ноября 2019 г.—Томск, 2019. – 2019. – С. 112-117.

Патент на изобретение

11. 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.

Свидетельство о регистрации программ для ЭВМ

12. Нгуен В. 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.
13. Нгуен В. 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.

Подписано в печать 14.04.2021г. Тираж 100 экз.

Кол-во стр. 20 Заказ 4658

Бумага офсетная. Формат А5. Печать RISO

Отпечатано в типографии ООО «СПБ Графикс»

634030, г.Томск, ул. Советская 80, тел +7 903 954 7362