На правах рукописи

Нассер Абдулдаиам Абдулджалил Хаил

Метод, алгоритм и устройство для управления охлаждением деталей на основе нейро-нечеткого аппарата

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2017

Работа выполнена в Юго-Западном государственном университете на кафедре вычислительной техники

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Бобырь Максим Владимирович

Официальные оппоненты: **Дубинин Виктор Николаевич**
доктор технических наук, профессор, Пензенский государственный университет, профессор кафедры вычислительной техники (г. Пенза)

Захаров Алексей Александрович
кандидат технических наук, доцент, Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, доцент кафедры информационных систем (г. Муром)

Ведущая организация: **Белгородский государственный технологический университет** им. В.Г. Шухова (г. Белгород)

Защита состоится «27» декабря 2017 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.105.02 при ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» по адресу: 305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного государственного университета и на сайте https://www.swsu.ru/ds/d212.105.02/Disser%20Nasser.pdf

Автореферат разослан « » ноября 2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В последние десятилетия возрос интерес к разработке новых интеллектуальных методов управления сложными объектами и/или системами. Создание подобных методов с одной стороны возможно за счет совершенствования цифровых устройств вычислительной техники, обеспечивающих решение поставленных перед ними задач. С другой стороны, для успешного решения задачи необходимо создание математического, информационного и программного обеспечения для их функционирования. Так, например, для увеличения производительности обработки изделий на оборудовании с числовым программным управлением (ЧПУ) необходимо использовать режим высокоскоростной обработки (ВСО). При этом специализированое программное обеспечение содержит большое число перемещений исполняющих механизмов, превосходящее объем памяти микроконтроллеров, использующихся для обработки и хранения управляющих программ. Это определяет необходимость создания аппаратно-ориентированных устройств в составе системы управления охлаждения деталей для обеспечения параметров скорости и надежности оборудования с ЧПУ. В случае ВСО производительность повышается за счет увеличения скорости, которая ограничена температурными деформациями. Поэтому введение специализированных вычислительных устройств, позволяющих решать задачи, связанные с повышением производительности оборудования с ЧПУ, является одним из перспективных направлений интеллектуализации систем управления сложными объектами.

Разработкой интеллектуальных систем управления занимались такие ученые, как Новиков Д.А., Гречишников В. А., Кожевников Д. В., Кирсанов С. В., Кокарев В. И., Схиртладзе А. Г., Барановский Ю.В., Золотухин Н.М., Резников А.Н., Fuju T., Lee J.-K., Kohler E. и др. Однако для улучшения качественных и эксплуатационных показателей разрабатываемых устройств необходимо рассмотреть вопросы, связанные с их интеллектуализацией.

В настоящее время для интеллектуализации цифровых устройств вычислительной техники используются элементы искусственного интеллекта, к которым относятся нейронные сети, генетические алгоритмы, нечеткие множества и их гибридные модели. Нейро-нечеткие методы и использующие их устройства применяются в задачах, где возникают трудноуправляемые переходные процессы. Например, в устройствах управления движением метрополитена, доменными печами, сложными робототехническими комплексами, то есть в системах, относящихся к классу обучение-распознавание-действие.

В частности, создание специализированных устройств управления параметрами ВСО требует разработки принципиально новых методов

формирования выходного сигнала. Следует отметить, что их работа усложняется за счет внешних возмущающих воздействий, действующих при обработке деталей в режиме реального времени.

В связи с вышеизложенным, актуальной научно-технической задачей является разработка метода, алгоритма и устройства для управления охлаждением деталей на основе нейро-нечеткого аппарата.

Степень разработанности проблемы. В развитии теории и практики применения в устройствах управления сложных адаптивных, нечетких и нейро-нечетких систем большой вклад внесли российские и зарубежные ученые: Д.А. Поспелов, Я.З Ципкин, Л.А. Растригин, Л.С. Бернштейн, А.Н. Мелихов, А.П. Ротштейн, А.В. Леоненков, А.П. Еремеев, Ю.Н. Золотухин, С.М. Ковалев, Л.Г. Комарцова, Ю.И. Кудинов, К.Г. Малышев, L. Zadeh, H. Sugiura, M. Sugeno, T. Takagi, H. Tanaka, I.B. Turksen, R.R. Yager, T. Yasukawa, L.X. Wang и др. Однако, в работах этих ученых недостаточно проработаны вопросы, связанные с использованием гибридных технологий и применением мягких арифметических операторов в структуре нечетко-логического вывода.

Работа выполнена в рамках грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МД- 2893.2015.8 (Разработка и исследование теоретических основ, методов адаптивного нейро-нечеткого управления сложными техническими системами на основе мягких вычислений) и № МД- 707.2017.8 (Исследование, разработка и моделирование методов мягкого управления робототехническими комплексами на основе адаптивных нейро-нечетких обучающих систем), а также Государственного задания № 2.3440.2017/4.6 (Разработка методов обеспечения живучести интеллектуальных бортовых систем управления беспилотных транспортных средств).

Цель диссертационной работы – повышение точности функционирования вычислительного устройства для управления охлаждением детали на основе оценки средней квадратической ошибки.

В соответствии с целью работы были сформулированы и решены следующие **основные задачи:**

1. Анализ существующей элементной базы и современных вычислительных устройств, входящих в состав системы управления оборудованием с ЧПУ, с целью обоснования выбранного направления исследований.
2. Создание нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока (МННВСТ), передаваемого на преобразователь первичной информации (термоэлемент) для управления процессом охлаждения деталей.
3. Синтез алгоритма и специализированного программного обеспечения, осуществляющих контроль за функционированием нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей.

4. Разработка структурно-функциональной организации нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей и экспериментальные исследования нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, с целью улучшения эксплуатационных характеристик разработанного вычислительного устройства.

Объект исследования: вычислительные процессы при управлении охлаждением деталей.

Предмет исследования: нейро-нечеткий метод и алгоритм вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, и алгоритмы функционирования нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теория нечеткой логики и множеств, методы математического моделирования, вычислительной математики и статистики, основы теории построения алгоритмов, корреляционно-регрессионный анализ, а также теория проектирования вычислительных устройств и ЭВМ.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Нейро-нечеткий метод вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, основанный на анализе параметров режима резания и температуры в зоне резания, позволяет обеспечить редукцию средней квадратической ошибки при функционировании вычислительного устройства для управления охлаждением деталей за счет мягкого нейро-нечеткого аппарата вычисления управляющих величин.

2. Алгоритм управления температурными деформациями, отличающийся тем, что в его основе используется нейро-нечеткий метод вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, обеспечивает редукцию сложных вычислительных операций при охлаждении деталей за счет мягких арифметических операторов, использующихся в нейро-нечеткой сети.

3. Нейро-нечеткое устройство для управления охлаждением деталей обеспечивает редукцию средней квадратической ошибки и критерий оценки точности его функционирования.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. На основе созданного нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, разработаны способ и устройство для управления охлаждением деталей (Пат. РФ № 2586189), позволяющие обеспечить увеличение производительности системы охлаждения на 10-20%;

2. Разработанный алгоритм управления температурными деформациями позволил сформировать программу для ЭВМ №2015616744 «Оценка дисперсии и корня среднеквадратического отклонения при структурной адаптации нечеткого-логического вывода», позволяющую

повысить точность системы управления охлаждением деталей на основе показателя RMSE в 5,8 раз по сравнению с традиционными моделями.

Реализация результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «Компания «КурскИнформПродукт» в условиях опытно-промышленных испытаний системы нейро-нечеткого охлаждения деталей.

Предложенные алгоритмы управления температурными деформациями и расчета RMSE для оценки нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемого на преобразователь первичной информации, используются в практической деятельности ООО Фирма «Комплект монтаж автоматика», а также используются в учебном процессе кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета в рамках дисциплин «Интеллектуальные системы» и «Микропроцессорная техника» направления 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Соответствие паспорту специальности.

Согласно паспорту специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует пунктам 1 и 2 паспорта специальности (1. Разработка научных основ создания и исследования общих свойств и принципов функционирования элементов, схем и устройств вычислительной техники и систем управления. 2. Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик).

Апробация результатов исследования.

Диссертационная работа отражает результаты научных исследований, проводимых с 2010 по 2017 годы.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 18 международных и всероссийских научно-технических конференциях: Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов (г. Курск, 2010, 2013); Интеллектуальные и информационные системы (г. Тула, 2015); Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования (г. Вологда, 2014, 2015, 2016); Молодые ученые – основа будущего машиностроения и строительства (г. Курск, 2014); Инновации, качество и сервис в технике и технологиях (г. Курск, 2014); Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов (г. Барнаул, 2015, 2016); Качество в производственных и социально- экономических системах (г. Курск, 2014); Современные

инновации в науке и технике (г. Курск, 2014); Современные материалы техника и технологии (г.Курск, 2015); Информационные технологии в науке и производстве (г. Омск, 2015); Новые информационные технологии и системы (г. Пенза, 2015); Интеллектуальные и информационные системы (г. Тула, 2016); Мехатроника, автоматика и робототехника (г. Новокузнецк, 2017); всероссийской научно-практической конференции молодых ученых в рамках Программы развития деятельности студенческих объединений Череповецкого государственного университета «РАЙОN IT» (г. Череповец, 2016), а также на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ) с 2010 по 2017г.

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту научные положения разработаны соискателем лично. Работы [7,9,11-13,16,20-22,24,25,27] выполнены без соавторства. В научных работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: в [1, 4, 5, 6, 15] – разработано устройство для управления охлаждением деталей на основе нейро-нечеткого аппарата, в [2, 3, 10, 14, 23] – осуществлена оценка точности нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, на основе расчета показателя средней квадратической ошибки (RMSE – root mean square error), в [8, 17] – предложен нейро-нечеткий метод вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, в [18] – рассмотрены структурно-функциональные схемы нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей, в [19] – алгоритм управления температурными деформациями, в [26] – анализ устойчивости нечетких регуляторов.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 31 научная работа, в том числе 5 статей в научных рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, одна из которых в журнале, входящем в международные базы данных Scopus и Web of Science, получен 1 патент РФ на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 103 наименований и приложений. Работа изложена на 134 страницах машинописного текста и содержит 61 рисунок, 37 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, определяются область исследования, цель и задачи, обосновываются научная новизна и практическая значимость работы. Также выделяются основные положения, выносимые на защиту, приводится информация об апробации и общей структуре диссертации.

В первой главе проведен анализ современной элементной базы, специализированных устройств (рисунок 1) и моделей интеллектуализации процесса ВСО, использующихся в контуре управления оборудованием с ЧПУ для охлаждения изделий. Анализ показал, что наиболее перспективным с целью интеллектуализации процесса ВСО являются автономные устройства, контролирующие температурные деформации, возникающие в зоне резания. Гибридные технологии, основанные на нейронных сетях и моделях нечеткого вывода – нейро-нечеткие системы вывода (ННСВ) направлены на наиболее эффективное решение задач, связанных с обеспечением высоких требований по отношению к параметрам скорости и надежности оборудования с ЧПУ в режиме ВСО.

Рисунок 1 – Анализ специализированных устройств, используемых при охлаждении деталей

Поэтому при отсутствии общих рекомендаций по выбору типа ННСВ и оценке ее эффективности одним из важных этапов разработки интеллектуального устройства управления охлаждением деталей для повышения его эффективности работы является сочетание технологии нейронных сетей (НС) с нечеткой логикой (НЛ), что позволит компенсировать недостатки, присущие каждой из технологий.

Во второй главе разработан нейро-нечеткий метод вычисления силы электрического тока, передаваемого на первичный преобразователь информации (термоэлемент), который используется для управления температурными деформациями, возникающими при ВСО. Данный метод является основой для функционирования вычислительного устройства, реализованного на микроконтроллере Arduino Mega. Устройство при обработке деталей в режиме реального времени получает данные о температуре в зоне резания и информацию о текущих значениях подачи и скорости резания, затем с помощью нечетких правил вычисляется значение силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент. Если температура в зоне резания увеличивается, то необходимо усилить

интенсивность охлаждения путем увеличения силы электрического тока, подаваемого от микроконтроллера на термоэлемент. В противном случае необходимо ослабить охлаждение с помощью уменьшения подачи силы электрического тока, передаваемого от микроконтроллера на термоэлемент.

В общем виде МННВСТ отражает зависимость величины силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, от изменения параметров режима резания

$$M_{\text{ННВСТ}}(I) = f(T,S,V)\,, \qquad (1)$$

где *I, T, S, V*– величины силы электрического тока, температуры в зоне резания, подачи и скорости резания, соответственно.

Зависимость (1) требует большого объема памяти для хранения и/или обработки ее в микроконтроллере. С целью минимизации числа операций, необходимых для формализации зависимости (1), представим ее в виде нейро-нечеткой сети, где каждому слою соответствует определенная математическая функция (рисунок 2).

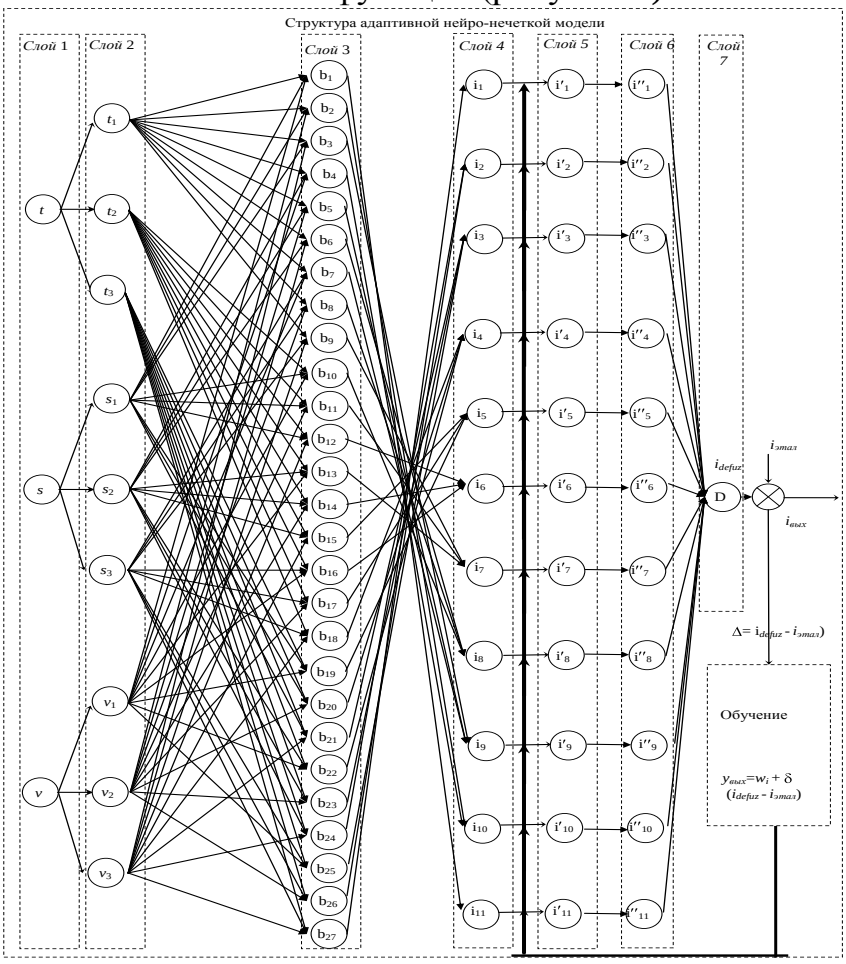


Рисунок 2 – Нейро-нечеткая сеть для вычисления силы электрические тока, передаваемого на термоэлемент

МННВСТ включает последовательность из восьми шагов:

Шаг 1. (Слой 2, рисунок 2). Фаззификация входных переменных, которые задаются треугольными функциями принадлежности (ФП).

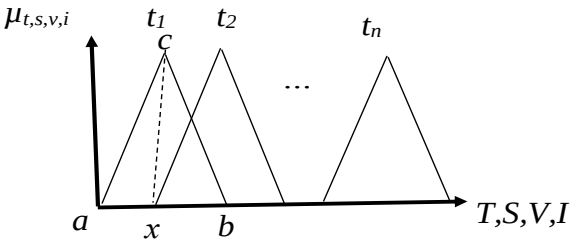
$$T=\{<t,\quad \mu(t)>\},\mathrm{S}=\{<\mathrm{s},\quad \mu(s)>\},\mathrm{V}=\{<\mathrm{v},\quad \mu(v)>\},\qquad (2)$$

где $\mu(t)\rightarrow[0,\ 1]$, $\mu(v)\rightarrow[0,\ 1]$, $\mu(s)\rightarrow[0,\ 1]$ – численные значения входных переменных: температуры в зоне резания T, подачи S, скорости резания V, соответственно.

При этом входные переменные описываются:

температура в зоне резания	подача	скорость резания
$T=[t_1]+[t_2]+....+[t_n]$, (3)	$S=[s_1]+[s_2]+....+[s_n]$, (4)	$V=[v_1]+[v_2]+....+[v_n]$, (5)
где t_1, t_2, t_3 – термы нечеткого множества температуры в зоне резания;	где s_1, s_2, s_3 – термы нечеткого множества подачи в зоне резания;	где v_1,v_2,v_3 – термы нечеткого множества скорости в зоне резания.

В графическом виде треугольная ФП входных и выходной переменных показана на рисунке 3:



$$f(x;a,b,c)=\begin{cases}0, & x\le a;\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a\le x\le b;\\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b\le x\le c;\\ 0, & c\le x.\end{cases}$$

где a, b, c – параметры треугольной функции принадлежности.

Рисунок 3 – Треугольная ФП входных и выходной переменной

Шаг 2 (Слой 3, рисунок 2). Разработка нечеткой базы знаний. Пусть нечеткой базой знаний называется совокупность нечетких правил вида «Если – То», определяющих взаимосвязь между входами и выходами нейро-нечеткой сети. Нечеткие правила (НП) записываются как:

$$\text{НП}_{1\ldots k}\text{: Если «}T=\mathrm{t_g}\text{» }\theta\text{ «}S=\mathrm{s_g}\text{» }\theta\text{ «}V=\mathrm{v}_g\text{» То «}I=\mathrm{i}_g\text{»},\qquad (6)$$

где k – количество нечетких правил; g – число термов в переменных; θ – знак, обозначающий жесткую и/или мягкую нечетко-логическую операцию нахождения минимума или максимума:

Жесткие арифметические операторы	
Минимум	Максимум
$\sum_{i=1}^{n} b_q=\sum_{q=1}^{n}\min(a_1,b_1)$	$\sum_{i=1}^{n} b_q=\sum_{q=1}^{n}\max(a_1,b_1)$
Мягкие арифметические операторы	
Минимум	Максимум
$\sum_{q=1}^{n} b_q=\sum_{q=1}^{n}\min_{\delta\,(a_1,b_1)}=\frac{a_1+b_1+\delta^2-\sqrt{(a_1-b_1)^2+\delta^2}}{2}$, $где\ \delta=0{,}01\ldots0{,}05$	$\sum_{q=1}^{n} b_q=\sum_{q=1}^{n}\max_{\delta\,(a_1,b_1)}=\frac{a_1+b_1+\delta^2+\sqrt{(a_1-b_1)^2+\delta^2}}{2}$, $где\ \delta=0{,}01\ldots0{,}05$

Нечеткая база знаний представлена в виде таблицы 1.

Таблица 1

Нечеткая база знаний

НП	Если			То
$НП_1$	t_1	s_1	V_1	i_{11}
$НП_2$	t_1	s_1	V_2	i_{10}
$НП_3$	t_1	s_1	V_3	i_9
…	..	..	..	..
$НП_k$	t_q	s_q	v_q	i_q

Шаг 3 (Слой 3, рисунок 2). Определение уровней отсечений в заключениях нечетких правил. Уровни отсечения заключений в нечетких правилах рассчитываются по формуле:

$$\sum_{i=1}^{n} b_q = \sum_{q=1}^{n} \Theta(t_o, s_q, v_r), \tag{7}$$

где q=1..z, z– количество заключений базы знаний; Θ – знак операции нахождения жесткого и/или мягкого минимума или мягкого максимума.

Шаг 4 (Слой 4, рисунок 2). Фаззификация выходной переменной, которая задается треугольной ФП

$$I = \{< i, \quad \mu(i) >\}, \tag{8}$$

где $\mu(i) \rightarrow [0, 1]$ – степень истинности выходной переменной силы электрического тока (ось ординат); i – фактическое значение силы электрического тока (ось абсцисс).

Функция принадлежности выходной величины – сила электрического тока задана

$$I = [i_1] + [i_2] + ... + [i_n] \ , \tag{9}$$

где i_1, i_2, …,i_n – термы нечеткого множества силы электрического тока, n – число термов нечеткого множества I.

Шаг 5 (Слой 5, рисунок 2). Расчет величины весовых функций, необходимых для обучения нейро-нечеткой сети

$$i'_i = \frac{b_q}{\sum_{l=1}^{n} b_q}. \tag{10}$$

Шаг 6 (Слой 6, рисунок 2). Объединение усеченных термов выходной переменной и построение нечеткого вектора i'', формирующего результирующую ФП:

$$i''_l = i'_1 [b'_1 \Theta \mu_i(i)_1] + i'_2 [b'_2 \Theta \mu_i(i)_2] + \ldots + i'_n [b'_n \Theta \mu_i(i)_n]. \tag{11}$$

где $b'_1 ... b'_n$ – коэффициенты отсечения предпосылок НП определяется по формуле 7 на основе нечетких правил, представленных в таблице 1.

Шаг 7 (Слой 7, рисунок 2). Дефаззификация результирующего нечеткого множества i_{defuz} в четкое значение, используя метод центра тяжести

$$i_{\text{defuz}} = \frac{\sum_{l=1}^{k} i \cdot i_l''}{\sum_{l=1}^{k} i_l''}. \qquad (12)$$

Шаг 8. Обучение нейро-нечеткой сети осуществляется на основе метода обратного распространения ошибки, т.е. на этом шаге выполняется корректировка весов выходной переменной $y_{вых}$ до тех пор, пока полученное значение i_{defuz} не станет максимально приближено к заранее известному эталонному значению $i_{\text{этал}}$ в соответствии с соотношением

$$y_{вых} = w_i + \delta(i_{\text{defuz}} - i_{\text{этал}}), \qquad (13)$$

где w_i – коэффициент обучения выходной переменной; δ – скорость обучения нейро-нечеткой сети (δ=0,01…0,07); i_{defuz} – фактическое значение силы электрического тока; $i_{этал}$ – эталонное значение силы электрического тока.

Нейро-нечеткая модель считается обученной при достижении критерия обучения Q минимального значения

$$Q = (i_{\text{defuz}} - i_{\text{этал}})^2 \to \min . \qquad (14)$$

Формулы (1)÷(14) формируют нейро-нечеткий метод вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент.

Отличительной особенностью нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока является, во-первых, введение на 2, 3, и 4 шагах мягких арифметических операторов. Это позволяет уменьшить среднюю квадратическую ошибку за счет учета всех входных информационных признаков, которые не учитывались в традиционных моделях нечеткого вывода. Во-вторых, число элементов в 1, 2 и 3 слоях подчиняется закону 3^R (где R – номер слоя (1,2,3) в структурной схеме нейро-нечеткой сети), что позволяет снизить вычислительную сложность процесса расчета выходного параметра за счет прогнозирования числа нечетких правил, необходимых для соблюдения условия полноты нечеткой базы знаний.

Оценка точности МННВСТ производится на основе расчета корня из средней квадратической ошибки RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{N} (i_{\text{defuz}} - i_{\text{этал}})^2}{N}} \to \min , \qquad (15)$$

где N – число элементов в обучающей выборке; $i_{этал}$ – эталонное значение.

Управление температурными деформациями ΔT осуществляется на основе критерия

$$\Delta T = \alpha l (t_1 - t_2) \to \min , \qquad (16)$$

где α – коэффициент линейного расширения материала; l – длина обрабатываемого материала; t_1 – эталонное значение температуры в зоне резания; t_2 – значение температуры в процессе обработки.

В критерии (16) минимизация температурных деформаций осуществляется за счет изменения температуры в зоне резания t_2. Для этого с помощью МННВСТ рассчитывается величина силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент. Далее термоэлемент, реализованный на элементах Пельтье, с большей и/или меньшей интенсивностью охлаждает технологическую систему станок-приспособление-инструмент-деталь.

Алгоритм управления температурными деформациями представлен на рисунке 4. Он синтезирован на основе метода МННВСТ (1)÷(14) и критериев (15)÷(16) и позволяет увеличивать скорость резания за счет уменьшения температурных деформаций путем вычисления силы электрического тока, изменяющего интенсивность охлаждения деталей.

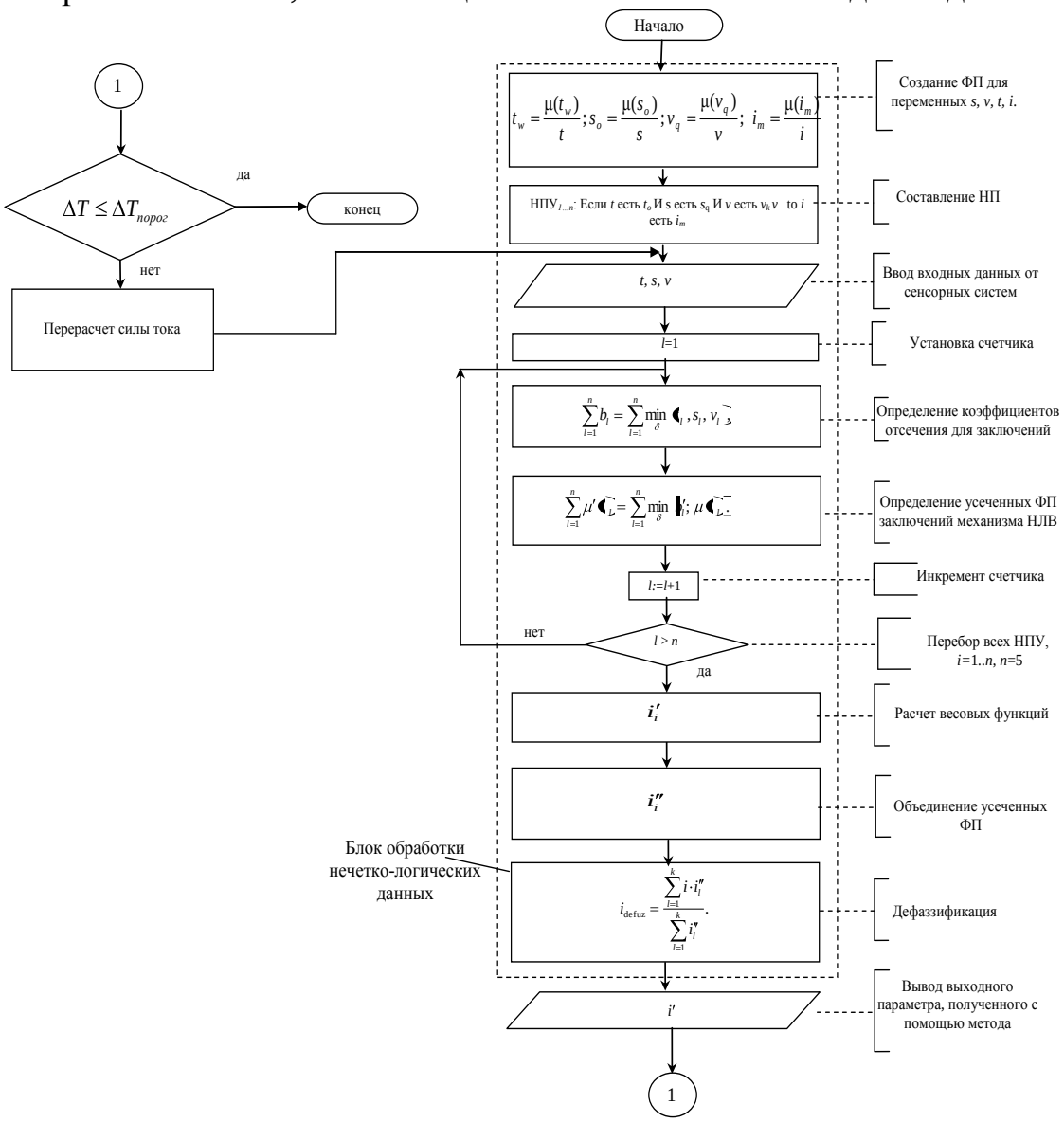


Рисунок 4 – Алгоритм управления температурными деформациями

Алгоритм управления температурными деформациями показан на рисунке 4. Его новизна заключается в формализации процесса управления охлаждением деталей за счет использования в структуре нейро-нечеткого вывода мягких арифметических операторов.

На основе разработанных метода и алгоритма создано специализированное программное обеспечение [Свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ № 2015616744], способ и устройство для управления охлаждением деталей оборудования (Пат. РФ № 2586189). Численное моделирование и функционирование способа детально рассмотрено в диссертации.

Третья глава посвящена вопросам, связанным с развитием вопроса обеспечения точности нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, используемого в нейро-нечетком устройстве для управления охлаждением деталей. Для этого предлагается механизм принятия управляющих решений, основанный на нейро-нечетких принципах управления, в котором на шагах композиции и дефаззификации используются различные нечетко-логические операции (рис. 5). На этапе композиции нечетко-логического вывода анализировались как жесткие, так и мягкие арифметические операции нахождения минимума и максимума, а на этапе дефаззификации традиционные методы, к которым относятся модели: центра тяжести, центра максимумов и центра сумм.

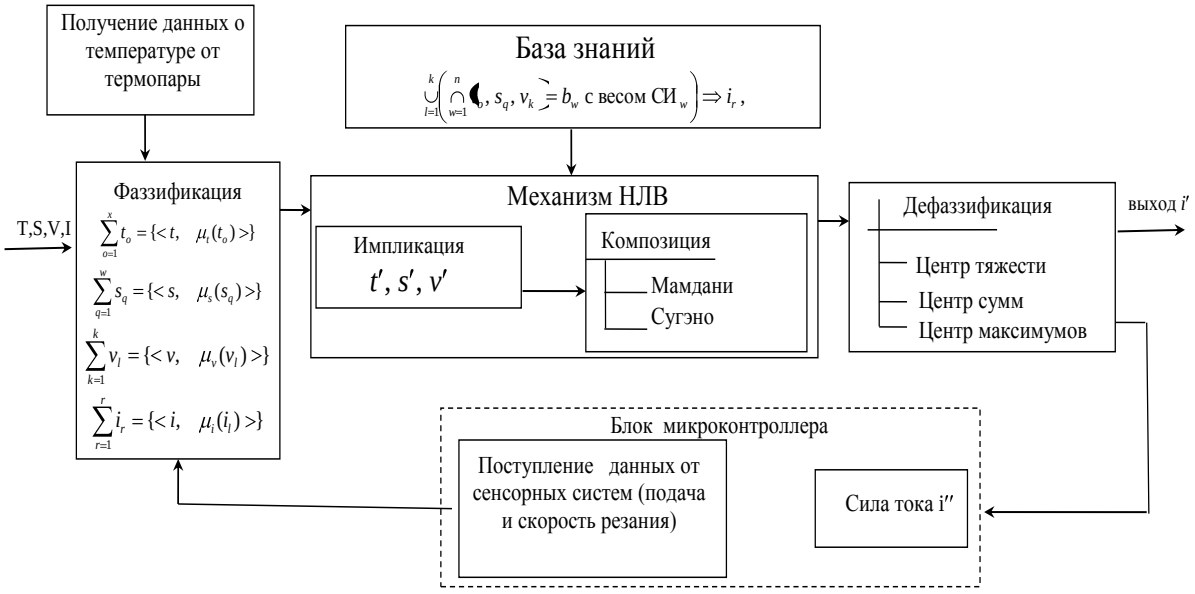


Рисунок 5 – Нейро-нечеткий механизм принятия управляющих решений

В ходе проведенного моделирования МННВСТ было установлено, что на его точность влияет модель дефаззификации (таблица 2), используемая в структуре нечетко-логического вывода. Схема вычислительного процесса нейро-нечеткого механизма расчета величины силы электрического тока представлена на рисунке 6.

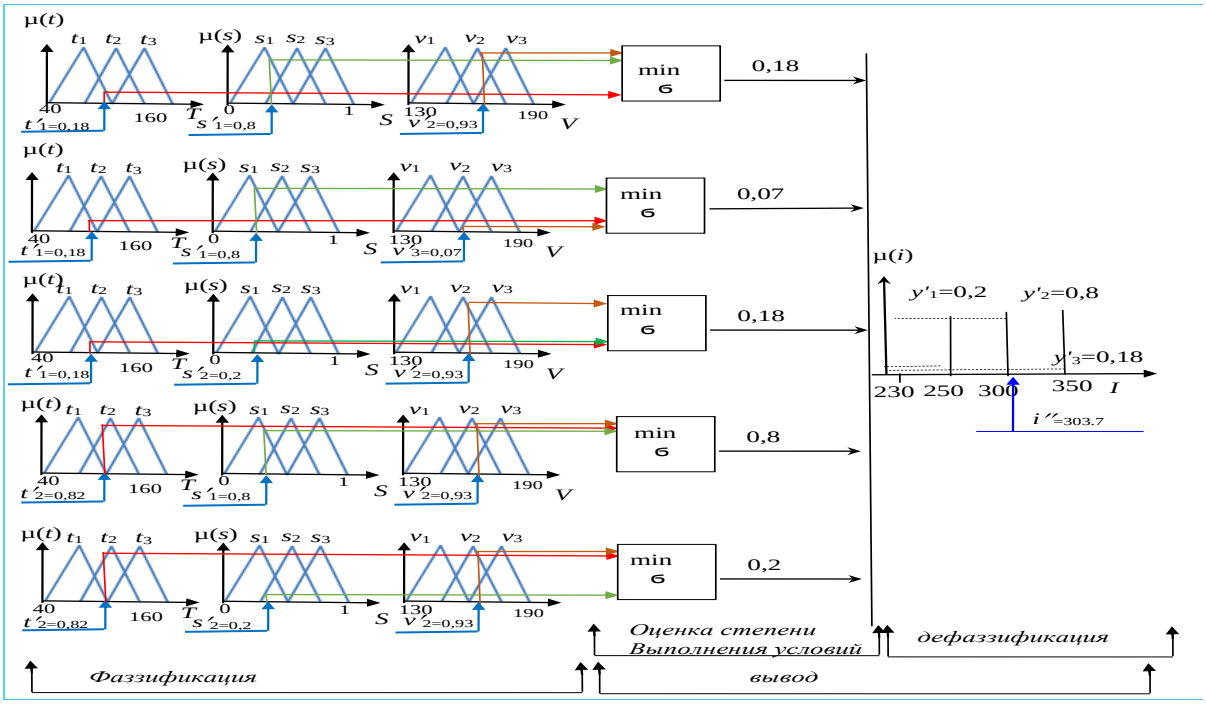


Рисунок 6 – Схема нейро-нечеткого механизма расчета величины силы электрического тока: при t=95°C, s=0,22 *мм/об* и v=163*м/мин*

Схема представлена для реализации пяти нечетких правил при следующих начальных условиях: t=95°C, s=0,22 мм/об, v=163м/мин. При реализации композиционного правила с использованием мягких арифметических операторов были рассчитаны три степени выполнения условий y_1=0,2, y_2=0,18, y_3=0,8. В правой части рисунка показана дефаззификация результирующей переменной величины силы электрического тока. Результаты моделирования величины силы электрического тока с использованием различных методов дефаззификации и расчет RMSE представлен в таблице 2.

Таблица 2

Расчет RMSE для различных моделей дефаззификации

	Модель дефаззификации					
Нейро-нечеткая модель	Центр тяжести	Центр сумм	Модель высот	Первый максимум	Последний максимум	Средний максимум
	RMSE					
С жесткими операторами	6.73	5.26	5.27	5.41	5.43	5.31
С мягкими операторами	**5.18**	5.2	5.98	5.36	5.45	5.33

Анализ данных, представленных в таблице 2, показал, что при использовании мягких арифметических операторов в структуре нейро-нечеткой сети и модели центра тяжести при дефаззификации RMSE минимален.

В четвертой главе представлена разработанная структурно-функциональная организация нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей (рисунки 7-8).

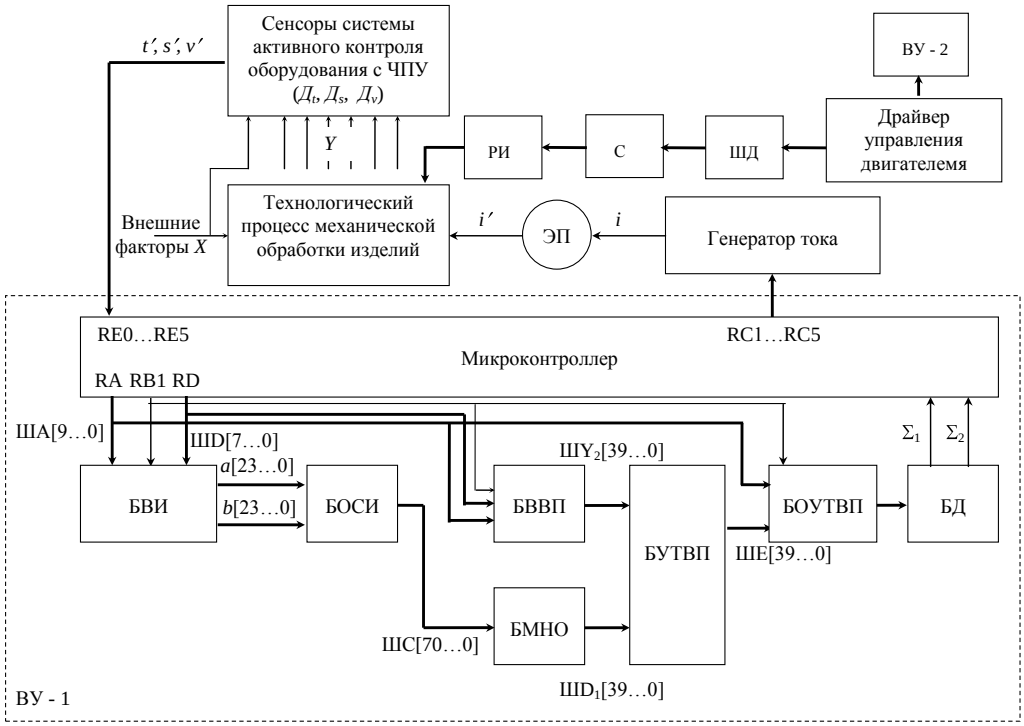


Рисунок 7 – Структурно-функциональная организация нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей, где ЭП – элемент Пельтье; БВИ – блок ввода информации; БОСИ – блок определения степеней истинности; БМНО – блок матрицы нечетких отношений; ББВП – блок ввода выходной переменной; БУТВП – блок усечения термов выходной переменной; БОУТВП – блок объединения усеченных термов выходной переменной; БД – блок дефаззификации; ШД – шаговой двигатель, РИ – режущий инструмент; ВУ-1 – вычислительное устройство, реализованное на базе микроконтроллера Arduino Mega ВУ-2 – вычислительное устройство, реализованное на базе микроконтроллера Arduino UNO; РИ – режущий инструмент; С- суппорт.

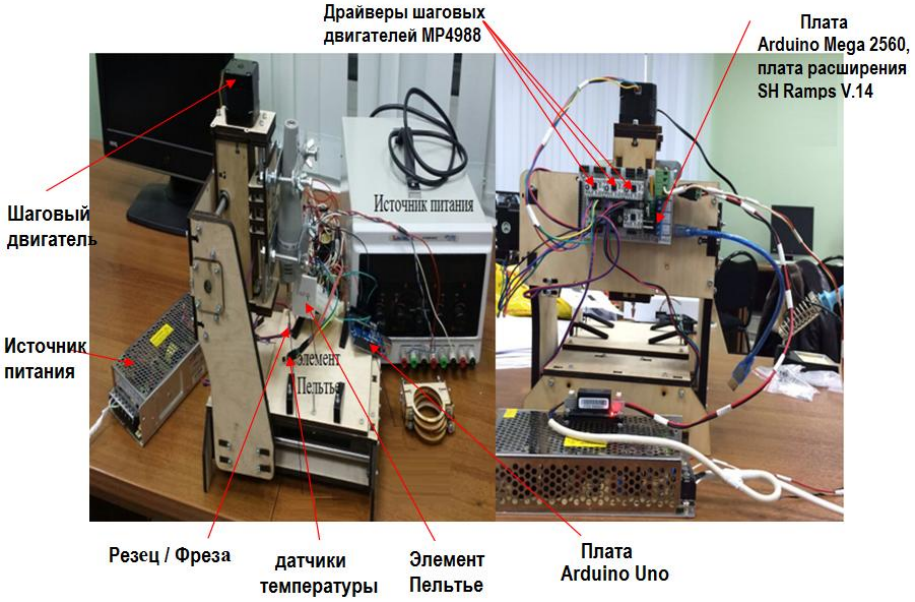
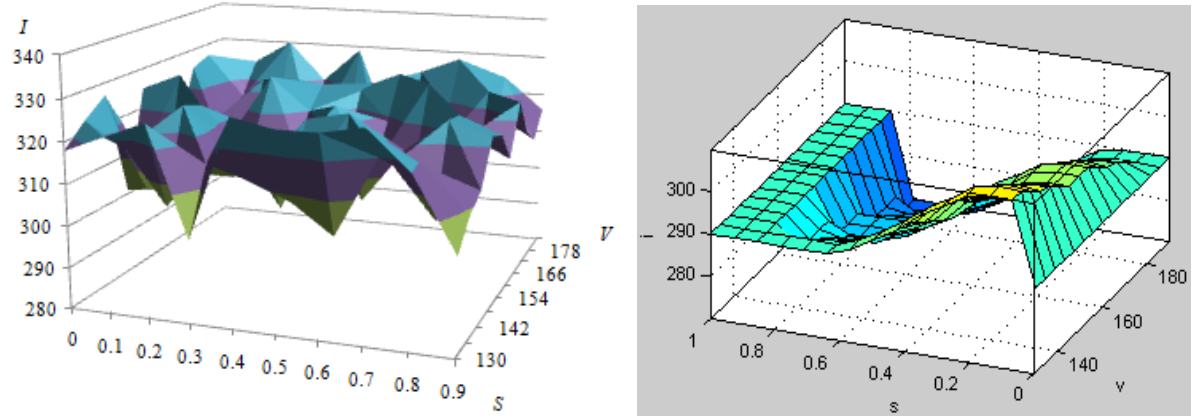


Рисунок 8 – Нейро-нечеткое устройство для управления охлаждением деталей (патент РФ № 2586189) – экспериментальный образец

Новизна структурно-функциональной организации определяется детализацией операционной части ВУ1 и блоками, которые аппаратно поддерживают этапы предложенного нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока. Прежде всего это логические блоки БУТВП и БОУТВП, в которых используются мягкие арифметические операторы.

Исследование разработанного нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемой на термоэлемент, проводилось при решении задачи минимизации RMSE (15). В качестве тестовых функций использовалась таблица наблюдений, состоящая из 441 точки, находящихся в диапазоне значений, соответствующих распределению выходной ФП. Критерием качества аппроксимации является ошибка вывода, определяемая с помощью RMSE. В процессе обучения нейро-нечеткой сети изменялись следующие параметры: весовой коэффициент *w*; ошибка обучения *error* = 0,01; количество итераций обучения i_t = 50. При этом в ходе эксперимента был произведен расчет в пакете Fuzzy logic Toolbox отклика результирующей переменной при использовании традиционной модели обучения (см. рис 9, а), значение RMSE составило 2.84.



а) б)

Рисунок 9 – Отображение отклика результирующей переменной: *а* – обучение с помощью предложенной модели обучения; б – обучение с помощью обучения в приложении Fuzzy Logic Toolbox

Затем с помощью разработанного специализированного программного обеспечения был осуществлен расчет отклика результирующей переменной при использовании предложенного в диссертации МННВСТ. Значение коэффициента RMSE составило 0,05.

В ходе проведения эксперимента получены результаты, позволяющие оценить адекватность МННВСТ, алгоритма управления температурными деформациями и предложенного устройства.

Для оценки точности МННВСТ произведен сравнительный анализ на основе показателя RMSE. Результаты сведены в таблицу 3. Расчет доверительного интервала для RMSE представлен на рисунке 10.

Таблица 3

Сравнительный анализ RMSE

Устройства	**Исследователи**	**RMSE(СКО)**
Устройство ANFIS для прогнозирования тепловых погрешностей на станках с ЧПУ	Ali M. Abdulshahed, Andrew P. Longstaff, Simon Fletche	1.7 до 5.6
Устройство ANFIS для Ni-Ti оценки обрабатываемости сплава на оборудовании с ЧПУ	T. Segreto, A. Caggiano, R. Teti	0.12 до 0.427
Устройство ANFIS для моделирования и управления тепловыми деформациями	Andrew P, Ali M. Abdulshahed , Longstaff, Simon Fletcher, Alan Myers	0.6 до 4
Устройство ANFIS для обучения и прогнозирования шероховатости поверхности при обработке деталей на оборудовании с ЧПУ	M. Elangovan, N.R.Sakthive, Binoy.B.Nair, V.Sugumaran	0.35
Экспериментальное определение силы резания и шероховатости поверхности при точении 50CrV4 стали (марки SAE 6150) и моделирование с использованием искусственных нейронных сетей	HasanBasriUlas	0.2
Адаптивное нейро-нечеткое устройство	Azar, AhmadTaher	0.29
Устройство для управления охлаждением детали на основе МННВСТ	**Нассер А.А**	**0.05**

n	Доверительный интервал		
	Нижняя граница	RMSE	Верхняя граница
1	0.049637	0.04973	0.049823104
2	0.049667	0.04976	0.049853104
3	0.049547	0.04964	0.049733104
4	0.049637	0.04973	0.049823104
5	0.049657	0.04975	0.049843104
6	0.049677	0.04977	0.049863104
7	0.049627	0.04972	0.049813104

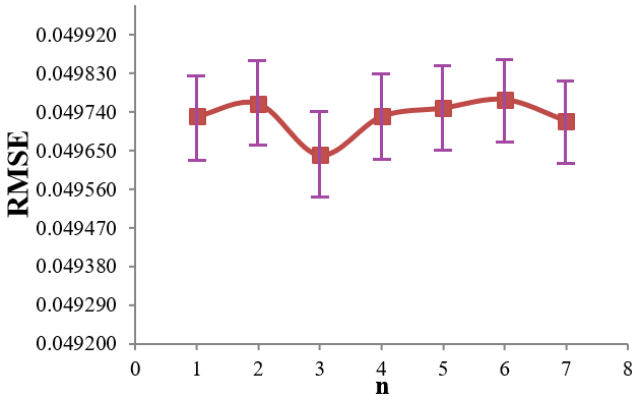


Рисунок 10 – Расчет доверительного интервала на основе RMSE

Для вычисления доверительного интервала использовалась следующая методика:

Этап 1. Вычисление по формуле (16) стандартного отклонения S_0

$$S_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i-1}^{n} (x - \bar{x})^2}{n-1}}, \qquad (16)$$

где x – расчетное значение RMSE с помощью МННВСТ, $\bar{x}$ – эталонное значение, n – объем выборки.

Этап 2. Расчет по формуле (17) стандартной ошибки в выборке

$$S_c = \frac{S_0}{\sqrt{n}}. \qquad (17)$$

Этап 3. Определение по формуле (18) доверительного интервала для средних значений в выборке

$$\left(\bar{x} - t_{кр}\frac{S_0}{\sqrt{n}}\right);\left(\bar{x} + t_{кр}\frac{S_0}{\sqrt{n}}\right), \quad (18)$$

где $t_{кр}$ – коэффициент распределения Стьюдента.

Расчет доверительного интервала показал, что с 95% уверенностью гарантируется то, что выходные значения при обучении нейро-нечеткой сети при неограниченно большом числе наблюдений не выйдут за пределы найденного доверительного интервала.

Оценка сложности алгоритма управления температурными деформациями, основанного на методе нейро-нечеткого вычисления силы электрического тока производилась на основе расчета пропускной способности

$$ПС = \frac{n'}{t}, \quad (19)$$

где n' – число входных данных, Байт; t – время выполнения алгоритма.

Данный параметр был рассчитан для алгоритма управления температурными деформациями основанного на мягкой и жесткой моделях нейро-нечеткого вывода. При использовании жесткой модели ПС=43,3 Байт/с, при использовании мягкой модели ПС=46,5 Байт/с.

Анализ результатов показал, что при значительном улучшении точности метода нейро-нечеткого вычисления силы электрического тока в 5,8 раза, на основе расчета RMSE не значительно снижается пропускная способность в 1,07 раза.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно-технической задачи разработки метода, алгоритмов и нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей получены следующие основные результаты:

1. Проанализированы существующие элементы и специализированные устройства, входящие в систему управления охлаждением деталей оборудования с ЧПУ, и пути повышения их точности. Обосновано применение гибридной нейро-нечеткой сети для решения поставленных в работе целей и задач.

2. Разработан нейро-нечеткий метод вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, обеспечивающий повышение скорости резания за счет уменьшения температурных деформаций, возникающих в зоне резания при обработке деталей на оборудовании с ЧПУ, путем подачи от микроконтроллера через генератор сигнала силы электрического тока на термоэлемент, и критерий её оценки.

3. Предложен алгоритм управления температурными деформациями, основанный на нейро-нечетком методе вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, отличающийся использованием в его структуре мягких арифметических операторов, позволяющих обеспечить аддитивность системы управления температурными деформациями и устройства в целом.

4. Разработан экспериментальный образец нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей (патент РФ № 2586189), позволяющий в режиме реального времени обеспечивать уменьшение средней квадратической ошибки при назначении управляющих параметров режима резания на оборудовании с ЧПУ.

5. Проведено экспериментальное исследование функционирования нейро-нечеткого устройства для управления охлаждением деталей, позволяющее на основе оценки показателя RMSE сделать вывод, что при его функционировании и использовании нейро-нечеткого метода вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, средняя квадратическая ошибка в 5,8 раз ниже по сравнению с аналогичными устройствами, что позволило увеличить его производительность в среднем на 15 %.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для разработки вычислительных и управляющих устройств мехатронных и роботизированных комплексов.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Использование методов, алгоритмов и нейро-нечетких устройств охлаждения деталей позволит расширить функциональные возможности систем управления сложными объектами.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Нассер, А.А.** Оценка числа итераций при обучении мягких нечетких систем [Текст] / М.В. Бобырь, В.С. Титов, А.А. Нассер // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – №3. – С.30-37.

2. **Нассер, А.А.** Автоматизация процесса управления скоростью резания на основе мягких вычислений [Текст] / М.В. Бобырь, В.С. Титов, А.А. Нассер // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2014. – №2. – С.40-47.

3. **Нассер, А.А.** Алгоритм управления охлаждением резца на основе нечеткой логики [Текст] / М.В. Бобырь, В.С. Титов, А.А. Нассер // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2015. – №2. – С.3-9.

4. **Нассер, А.А.** Нечёткая стабилизация процесса обработки деталей в задачах управления оборудованием с ЧПУ [Текст] / М.В.

Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // Автоматизация Современные технологии. – 2017. – №5. – С.212-218.

Публикации в журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science:

5. **Nasser, A. A.** Automation of the Cutting-Speed Control Process Based on Soft Fuzzy Logic Computing/ M. V. Bobyr', V. S. Titov, and A. A. Nasser //Machinery Manufacture and Reliability. – 2015. – Vol. 44. – No. 7. – C. 61 – 69.

Патенты

6. Пат. 2586189 Российская Федерация, МПК B23B 27/10. Способ и устройство управления охлаждением резца [Текст] / М.В. Бобырь, В.С. Титов, **А.А. Нассер**; заявитель и патентообладатель: Юго-Западн. гос. ун-т. – № 2014124994/02; заявл. 20.06.14; опубл. 27.12.2015 Бюл.№ 36. – 14 с.: ил.

Научные труды, опубликованные в других изданиях РИНЦ:

7. **Нассер,** А.А. Построение функции принадлежности систем управления [Текст] / А.А. Нассер // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов: материалы межд. научно-технич. конференции. – Курск, 2013. – С. 348-349.

8. **Нассер, А.А.** Оценка производительности нечётко-логических систем [Текст] / А.А. Нассер // Молодые ученые – основа будущего машиностроения и строительства: материалы Междунар. науч.-тех. конф. – Курск, 2014. – № 1. – С. 265- 266.

9. **Нассер, А.А.** Анализ повышения быстродействия нечеткой MISO- системы [Текст] / А.А. Нассер // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сб. Тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2014. – № 2. – С. 24- 26.

10. **Нассер, А.А.** Алгоритм влияния случайных погрешностей на измерительные величины нечётких логических систем [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Качество в производственных и социально-экономических системах: сб. Тр. 2-ой Междунар. науч.-тех. конф. – Курск, 2014. – № 2. – С. 81- 4.

11. **Нассер, А.А.** Охлаждения резца на основе нечетко-логического управления [Текст] / В.С. Титов, М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Качество в производственных и социально- экономических системах: сб. Тр. 2-ой Междунар. науч.-тех. конф. – Курск, 2014. – № 2. – С. 351-356.

12. **Нассер, А.А.** Анализ мягких нечетко – логических систем управления [Текст] / В.С. Титов, М.В. Бобырь, А.А. Нассер// Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы девятой Междунар. науч.-тех. конф. – Вологда: ВоГУ, 2014. – С.210 -212.

13. **Нассер, А.А.** Интеллектуальный алгоритм управления охлаждением резца [Текст] / А.А. Нассер// Современные инновации в науке и технике: сб. Тр. 4-ой Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2014. – № 3. – С 159 - 161.

14. **Нассер, А.А.** Мягкий алгоритм нечетко-логического вывода [Текст] / А.А. Нассер//Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. Тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Курск:ЮЗГУ, 2014. – № 3. – С 139 - 141.

15. **Нассер, А.А.** Анализ использования мягких операторов в нечетких системах управления [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, В.С. Титов // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, плис, системы обработки сигналов: материалы Всеросс. науч.-прак. конф. – Барнаул, 2015. – № 5. – С.216 - 222.

16. **Нассер, А.А.** Нечеткая математическая модель управления интенсивностью охлаждения резца [Текст] / А.А. Нассер // Информационные технологии в науке и производстве: материалы Всеросс. молодежной науч.-тех. конф. – Омск, 2015. – С.137 - 140.

17. **Нассер, А.А.** Оценка управления скоростью резания детали на основе нечеткого логического вывода для MISO-системы [Текст] / А.А. Нассер // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы девятой Междунар. науч.-тех. конф. – Вологда: ВоГУ, 2015.– С.119- 122 .

18. **Нассер, А.А.** Интеллектуализация процесса обработки изделий [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Интеллектуальные и информационные системы: материалы Всеросс. науч.-тех. конф. – Тула, 2015. – № 2. – С.73 - 76.

19. **Нассер, А.А.** Анализ операторов пересечения для нечетких систем управления [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. тр. XII Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2015. – С. 187-191.

20. **Нассер, А.А.** Интеллектуальная система управления компенсацией температурных деформаций [Текст] / А.А. Нассер// Новые информационные технологии и системы: сб. Тр. XII Междунар. науч.-тех. конф. – Пенза, 2015. – С. 233-235.

21. **Нассер, А.А.** Анализ эффективности функционирования мягкой модели нечетко-логического вывода [Текст] / А.А. Нассер, М.В. Бобырь, М.А.Абдулджаббар // Современные материалы техника и технологии: материалы межд. научно-технич. конференции. – Курск:ЮЗГУ, 2015. – № 1 . – С 30 - 31.

22. **Нассер, А.А.** Нечеткая автоматическая система охлаждения исполнительных устройств оборудования с ЧПУ [Текст] / А.А. Нассер // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов: сб. Тр. XII Междунар. науч.-тех. конф. – Курск, 2015. – С. 278-280.

23. **Нассер, А.А.** Параметризация функций принадлежности в нечетко-логическом выводе [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, плис, системы обработки сигналов: материалы межд. научно-технич. конференции. – Барнаул, 2016. – С. 287-291.

24. **Нассер, А.А.** Анализ средств автоматизации систем охлаждения [Текст] / А.А. Нассер // Молодежь и новые информационные

технологии: сб. Тр. всероссийской науч.-прак. конф. молодых ученых «РАЙОN IT» – Череповец, 2016. - С. 61-64.

25. **Нассер, А.А.** Моделирование адаптивной системы нейро-нечеткого охлаждения резца [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Интеллектуальные и информационные системы: сб. Тр. всероссийской науч.-тех. конф.– Тула, 2016. - С. 120-122.

26. **Нассер, А.А.** Параметизация функций принадлежности в нечетко- логическом выводе [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, плис, системы обработки сигналов: материалы Всеросс. науч.-прак. конф. – Барнаул, 2016. – № 6 . – С. 287-291.

27. **Нассер, А.А.** интеллектуализация процесса обучения нечетких систем [Текст] / А.А. Нассер // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: сб. Тр. XI Междунар. науч.-тех. конф. – Вологда: ВоГУ, 2016. – С. 113- 116.

28. **Нассер, А.А.** Нечеткий анализ устойчивости системы управления охлаждением изделий [Текст] / А.А. Нассер // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: сб. Тр. XII Междунар. науч.-тех. конф. – Вологда: ВоГУ, 2017. – С. 140- 144.

29. **Нассер, А.А.** Синтез устойчивости нечетких логических регуляторов [Текст] / М.В. Бобырь, А.А. Нассер// Мехатроника, автоматика и робототехника: сб. Тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Новокузнецк, 2017. – № 1 . – С. 57 - 59.

30. Бобырь М.В. Обучение нейро-нечетких систем [Текст]: монография / М.В. Бобырь. – М.: ИНФРА-М, 2017 – С. 240, раздел: 2.5 – «Анализ мягких арифметических операций в нечетком выводе» – С. 106-118.

Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ:

31. **Нассер, А.А.**, Бобырь М.В. Программа для оценка дисперсии и среднеквадратического отклонения при структурной адаптации нечеткого - логического вывода / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616744, заявл. 29.04.2015, опубл. 20.07.2015.

Подписано в печать 24.10.2017 г. Формат 60х84 1/16.
Печатных листов 1,1. Тираж 100 экз. Заказ № ___
Юго-Западный государственный университет,
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94
Отпечатано в ЮЗГУ