На правах рукописи

Абдулджаббар Мухаммед Абдулла Абдулбари

МОДЕЛЬ, МЕТОД, АЛГОРИТМ И УСТРОЙСТВО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ НЕЧЕТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ ИЗДЕЛИЙ

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2018

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, кафедра вычислительной техники, профессор (г. Пенза)

Бажанов Александр Геральдович
кандидат технических наук, доцент, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, кафедра технической кибернетики, доцент (г.Белгород)

Ведущая организация: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (г.Владимир)

Защита состоится «7» декабря 2018 г. в 16^{00} часов на заседании диссертационного совета Д 212.105.02, созданного на базе Юго-Западного государственного университета, 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 ЮЗГУ https://swsu.ru/newfmn/diss/d212.105.02/diss%20Abduldgabbar%20na%20sait.pdf

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В последние десятилетия возрос интерес к специализированным устройствам и промышленным контроллерам, применяемым в системах управления техническими объектами, основанных на нечёткой логике, которая позволяет учитывать неопределенность в процессе принятия управляющих решений с учетом переходов от четких данных к нечетким и обратно в процессе вычислений. Примирительно к станкам с числовым программным управлением (ЧПУ) общим недостатком нечетких моделей является то, что на их выходе формируются сигналы, имеющие различную физическую природу. При этом не учитывается, что исполнительные механизмы объекта управления реагируют только на сигнал напряжения. В результате возникает задача преобразования физических параметров, получаемых на выходе нечётких моделей, в величину напряжения, необходимую для управления техническим объектом. Следует отметить, что управление техническими объектами в современных системах осуществляется с помощью программируемых логических контроллеров и/или промышленных компьютеров. К таким специализированным устройствам предъявляются высокие требования по быстродействию. Однако, вышеуказанные устройства имеют последовательный метод обработки информации. Для достижения максимальной скорости обработки информации рекомендуется использовать параллельно-конвейерные программируемые логические интегральные схемы. Таким образом, повышение быстродействия в условиях преобразования выходных переменных, полученных в нечетких моделях, в сигналы управляющего напряжения с использованием ПЛИС является актуальной задачей.

Разработкой подобных устройств занимались такие ученые, как Новиков Д.А., Схиртладзе А. Г., Батищев Д.И., Кожевников Д. В., Гречишников В. А., Кирсанов С. В., Золотухин Н.М. и другие. Также в этой области зарубежные учёные достигли существенных успехов – Л. Заде, Саймон Г., Lee J.-K., Kohler E., Fuju T. и др. Однако для улучшения качественных и эксплуатационных показателей разрабатываемых устройств необходимо рассмотреть вопросы, связанные с их интеллектуализацией.

В последнее время для интеллектуализации цифровых устройств вычислительной техники применяются элементы искусственного интеллекта, прежде всего – нейронные сети и нечеткие модели.

Степень разработанности проблемы. В развитие теории и практики применения в устройствах управления сложными адаптивными и нейро-нечеткими системами большой вклад внесли российские и зарубежные ученые: Поспелов Д.А., Пегат А., Андрейчиковы А.В., Ципкин Я.З, Растригин Л.А., Бернштейн Л.С., Круглов В.В., Мелихов А.Н., Ротштейн А.П., Попов Ф.А., Еремеев А.П., Чернороуцкий И.Г., Комарцова Л.Г., Мамдани М., Кудинов Ю.И.,

Малышев К.Г., Zadeh L., Sugiura H., M. Sugeno, Takagi T., Tanaka H., Turksen I.B., Yager R.R., Yasukawa T., Wang L.X. и др. Тем не менее, в работах представленных ученых мало проработаны вопросы, связанные с применением интеллектуальных нечетких систем при проектировании устройств на базе ПЛИС.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках грантов Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых № 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 быстродействия процесса преобразования «напряжение–ток» в нечеткой системе управления охлаждением изделий.

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 преобразования «напряжение–ток» на оборудовании с ЧПУ, с целью обоснования выбранного направления исследования.
2. Разработка нечеткой математической модели вычисления силы тока, передаваемого на термоэлемент, на основе упрощённого нечёткого логического вывода и математической модели преобразования «напряжение–ток» для обеспечения требуемой силы тока на термоэлементе.
3. Разработка метода и алгоритма преобразования «напряжение–ток» для нечеткой системы управления охлаждением изделий, позволяющих повысить за счет параллельно-конвейерной обработки данных скорость принятия управляющих решений.
4. Разработка структурно-функциональной схемы системы управления охлаждением изделий, реализованной на устройствах нечеткого вычисления силы электрического тока и быстродействующего устройства преобразования напряжения, их экспериментальные исследования.

Объект исследования: вычислительные процессы нечеткой обработки данных в устройстве преобразования напряжения.

Предмет исследования: нечеткие математические модели, алгоритмы и устройства параллельно-конвейерного преобразования «напряжение–ток» на основе упрощённого нечёткого логического вывода.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались теория нечёткой логики и множеств, методы математического моделирования, вычислительной статистики, регрессионный анализ, основы теории построения алгоритмов и проектирования вычислительных устройств и ЭВМ.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту:

1. Нечёткая математическая модель вычисления силы тока, передаваемого на термоэлемент, основанная на упрощённом нечётко-логическом выводе, позволяющая обеспечить вычисление силы тока, требуемой для охлаждения изделий при функционировании вычислительного устройства преобразования напряжения в нечеткой системе управления охлаждением изделий.

2. Математическая модель преобразования «напряжение–ток», позволяющая с помощью устройства преобразования напряжения обеспечить требуемый ток на термоэлементе.

3. Метод и алгоритм преобразования «напряжение–ток» для нечеткой системы управления охлаждением изделий, объединяющие математические модели в единое целое и позволяющие синтезировать устройство преобразования напряжения.

4. Быстродействующее устройство преобразования напряжения для нечеткой системы управления охлаждением изделий, обеспечивающее требуемый ток на термоэлементе.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1. Разработанный алгоритм управления температурным режимом позволил создать программу для ЭВМ № 2017663078 «Моделирование процесса управления температурным режимом в зоне резания», позволяющую повысить точность системы управления охлаждением изделий на основе упрощенного нечёткого логического вывода.

2. На основе созданной нечеткой математической модели вычисления силы тока, передаваемого на термоэлемент, разработаны способ и устройство для управления температурой в зоне резания (Заявка на пат. РФ № 2017129946), позволяющие обеспечить увеличение производительности системы охлаждения на 15%.

Реализация результатов работы.

Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены в ООО «Компания «КурскИнформПродукт» в условиях опытно-промышленных испытаний системы преобразования напряжения для нечеткой системы охлаждения изделий, а также используются в учебном процессе кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета в рамках дисциплин «Интеллектуальные системы» и «Автоматизированные нечётко-логические системы управления» направления подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника, что подтверждается соответствующими актами.

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 в части разработки быстродействующего устройства преобразования напряжения 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) в части разработки системы управления охлаждением изделий при их обработке на оборудовании с числовым программным управлением.

Апробация результатов исследования.

Диссертационная работа отражает результаты научных исследований, проводимых с 2014 по 2018 годы.

Основные теоретические положения и научные результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 15 международных и всероссийских научно-технических конференциях: Современные материалы техника и технологии (г.Курск, 2015); Интеллектуальные и информационные системы (г. Тула, 2015, 2016); Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов (г. Барнаул, 2016); Информационно-измерительные диагностирующие и управляющие системы (г. Курск, 2016); Новые информационные технологии и системы (г. Пенза, 2016); Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования (г. Вологда, 2016, 2017); Мехатроника, автоматика и робототехника (г. Новокузнецк, 2017); Промышленные АСУ и контроллеры (г. Москва, 2017); Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов (г. Курск, 2017); Инноватика (г. Томск, 2017); Нелинейная динамика машин - school-NDM (г. Москва, 2017); Десятая всероссийская мульти конференция по проблемам управления (г. Ростов-на-Дону, 2017); Современные инновации в науке и технике (г. Курск, 2018), а также на научно-технических семинарах кафедры «Вычислительная техника» Юго-Западного государственного университета (ЮЗГУ, 2014÷2018 гг.).

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту научные положения разработаны соискателем лично. Работы [7,8,11,12] выполнены без соавторства. В научных работах по теме диссертации, опубликованных в соавторстве, личный вклад соискателя состоит в следующем: в [3,10-13,14,15,16,17,18,19] – разработано устройство для управления температурой в зоне резания, [1,2,3,4,6-9,21] **–** разработано устройство для управления охлаждением изделий на основе упрощённого нечеткого вывода, [20] – предложена математическая модель преобразования «напряжение–ток».

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 3 статьи в центральных рецензируемых научных журналах,

1 статья в журнале, входящем в международные базы цитирования Scopus и WoS, и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 100 наименований и приложений. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста и содержит 40 рисунков и 28 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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

В первой главе приведён анализ существующей элементной базы современных устройств и нечетких моделей, используемых в процессе принятия управляющих решений, позволяющих синтезировать устройство преобразования «напряжение–ток» (рисунок 1).

Анализ элементной базы показал, что для увеличения производительности работы устройства преобразования «напряжение-ток» рекомендуется использовать параллельно-конвейерные программируемые логические интегральные схемы. Для увеличения скорости принятия управляющих решений применяется упрощенный нечетко-логический вывод. Его особенностью является повышение скорости вычислительного процесса за счет сокращения операций при реализации дефаззификации четкого значения.

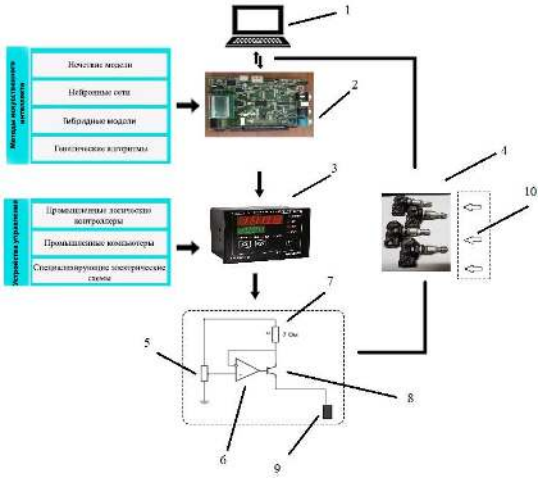

Рисунок 1 – Общая схема организации вычислений при охлаждении изделий: 1 – ПК; 2 – ПЛИС; 3 – регуляторы; 4 – система активного контроля; 5 – потенциометр; 6 – операционный усилитель; 7 – резистор; 8 – биполярный транзистор; 9 – термоэлемент; 10 – датчики

Во второй главе разработана нечеткая математическая модель вычисления силы электрического тока (НММВСТ), передаваемого на

термоэлемент, основанная на упрощённом нечетко - логическом выводе, использующаяся для управления охлаждением изделий.

Нечеткая математическая модель вычисления силы тока, основанная на упрощённом нечётком логическом выводе, состоит из четырёх шагов:

Шаг 1. Расчет степеней функции принадлежности входных переменных по формуле (1). Функции принадлежности входных переменных представлены на рисунке 2.

$$f(x;a,b,c)=\begin{cases}0, & x\le a;\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a\le x\le b;\\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b\le x\le c;\\ 0, & c\le x.\end{cases} \tag{1}$$

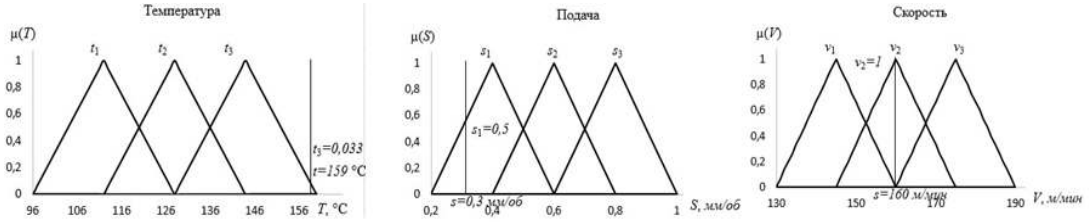

Рисунок 2 – Функции принадлежности входных переменных: где *T*, *S*, *V* – температура, подача и скорость резания, соответственно

Шаг 2. Расчет 27 степеней истинности предпосылок нечётких правил.

$N_1 = min(t_1, s_1, v_1)$	$N_{10} = min(t_2, s_1, v_1)$	$N_{19} = min(t_3, s_1, v_1)$
$N_2 = min(t_1, s_1, v_2)$	$N_{11} = min(t_2, s_1, v_2)$	$N_{20} = min(t_3, s_1, v_2)$
$N_3 = min(t_1, s_1, v_3)$	$N_{12} = min(t_2, s_1, v_3)$	$N_{21} = min(t_3, s_1, v_3)$
$N_4 = min(t_1, s_2, v_1)$	$N_{13} = min(t_2, s_2, v_1)$	$N_{22} = min(t_3, s_2, v_1)$
$N_5 = min(t_1, s_2, v_2)$	$N_{14} = min(t_2, s_2, v_2)$	$N_{23} = min(t_3, s_2, v_2)$
$N_6 = min(t_1, s_2, v_3)$	$N_{15} = min(t_2, s_2, v_3)$	$N_{24} = min(t_3, s_2, v_3)$
$N_7 = min(t_1, s_3, v_1)$	$N_{16} = min(t_2, s_3, v_1)$	$N_{25} = min(t_3, s_3, v_1)$
$N_8 = min(t_1, s_3, v_2)$	$N_{17} = min(t_2, s_3, v_2)$	$N_{26} = min(t_3, s_3, v_2)$
$N_9 = min(t_1, s_3, v_3)$	$N_{18} = min(t_2, s_3, v_3)$	$N_{27} = min(t_3, s_3, v_3)$

(2)

Шаг 3. Расчет одиннадцати уровней заключений нечётких правил.

$I_{11} = N_1$	$I_6 = \max(N_{12}; N_{14}; N_{16})$
$I_{10} = \max(N_2; N_4)$	$I_5 = \max(N_{15}; N_{17}; N_{19})$
$I_9 = \max(N_3; N_5; N_7)$	$I_4 = \max(N_{18}; N_{20}; N_{22})$
$I_8 = \max(N_6; N_8; N_{10})$	$I_3 = \max(N_{21}; N_{23}; N_{25})$
$I_7 = \max(N_9; N_{11}; N_{13})$	$I_2 = \max(N_{24}; N_{26})$
$I_1 = N_{27}$	

(3)

Шаг 4. Расчет четкого значения величины силы тока, передаваемого на термоэлемент, по формуле (4):

$$I_f = \frac{\sum_{n\to 1}^{11} I_i M_i}{\sum_{n\to 1}^{11} I_i} = \frac{I_1 M_1 + I_2 M_2 + \cdots + I_n M_n}{I_1 + I_2 + \cdots + I_n}, \quad (4)$$

где M_i, i=1...n – метки синглтонной функции принадлежности.

Формулы (1)÷(4) формируют нечеткую математическую модель вычисления силы тока (НММВСТ). Ее новизна состоит в сокращении числа операций при дефаззификации четкого значения силы тока.

Математическая модель преобразования «напряжение-ток», соответствующего требуемой величине силы тока, состоит из трех шагов.

Шаг 1. Расчет коэффициента масштабирования PS1 по формуле (5):

$$PS1 = \left(\frac{100 * (I_f - I_{min})}{I_{max} - I_{min}}\right) * (U_{max} - U_{min}). \quad (5)$$

где I_f – величина требуемой силы тока, передаваемого на термоэлемент, рассчитывается по формуле (4); I_{min}, I_{max}– минимальное и максимальное значения величины силы тока, передаваемого на термоэлемент; U_{min}, U_{max} – минимальное и максимальное значения напряжения, передаваемого с выхода ПЛИС.

Шаг 2. Расчет выходного значения напряжения U_{Res}, передаваемого с выхода ПЛИС, осуществляется по формуле (6):

$$U_{Res} = U_{min} + \left(\frac{PS1}{100}\right). \quad (6)$$

Шаг 3. Проверка условия равенства требуемого значения силы тока I_f с рассчитанным значением напряжения осуществляется по формуле (7):

$$I_к = I_f = \frac{U_{Res}}{2 * R}. \quad (7)$$

Формулы (5)÷(7) формируют математическую модель преобразования «напряжение–ток» (ММПНТ), соответствующую требуемой величине силы тока, полученной при дефаззификации по формуле 4. Данная модель контролирует пропорциональное соответствие величины напряжения, полученной по формуле (6), величине силы тока, рассчитанной по формуле (4). С целью увеличения производительности работы устройства, представленного на рисунке 2, и, учитывая особенность работы ПЛИС, модернизируем вычислительный процесс результирующего напряжения U_{Res}.

Преобразуем формулу (5) в формулу:

$$PS1 = (I_f - I_{min}) \cdot (U_{max} - U_{min}). \quad (8)$$

После этого вычисление U_{Res} осуществляется по формуле (9):

$$U_{Res} = U_{min} + \frac{PS1}{I_{max} - I_{min}}. \quad (9)$$

Формулы (8)÷(9) формируют математическую модель быстродействующего преобразования «напряжение–ток», соответствующую требуемой величине силы тока.

С использованием созданных математических моделей разработан метод преобразования «напряжение–ток» для нечеткой системы управления охлаждением изделий, состоящий из девяти шагов.

1. По формуле (1) рассчитываются степени истинности функции принадлежности скорости, подачи и температуры.
2. По формуле (2) рассчитываются степени принадлежности предпосылок нечетких правил.
3. По формуле (3) рассчитываются уровни заключений нечетких правил.
4. По формуле (4) рассчитывается четкое значение величины силы тока, передаваемого на термоэлемент.
5. По формуле (8) рассчитывается коэффициент масштабирования.
6. По формуле (9) рассчитывается выходное значение напряжения, передаваемого с выхода ПЛИС на устройство преобразования.
7. Расчет напряжения, передающегося на неинвертирующий вход операционного усилителя, равного половинному значению U_{Res}.
8. Проверка по формуле (7) условия равенства требуемого значения силы тока I_f с рассчитанным значением напряжения.
9. В случае выполнения условия равенства требуемого значения силы тока I_f с рассчитанным значением напряжения, сигнал тока подается на термоэлемент. В противном случае, выполняется переход на перерасчет величины силы тока.

Новизна метода определяется его аппаратной ориентацией на применяемые типовые датчики в системе управления и обратную связь, используемую для коррекции входных величин, что повышает уровень интеллектуализации вычислений. С алгоритмической точки зрения в случае несовпадения требуемого и расчетного значений (п.9) в методе осуществляется возврат к базе знаний и осуществляется перерасчет силы тока с выбором нового правила, определяемого формулой (2).

Алгоритм преобразования «напряжение–ток» для нечеткой системы управления охлаждением изделий представлен на рисунке 3. Он синтезирован на основе моделей НММВСТ и ММПНТ.

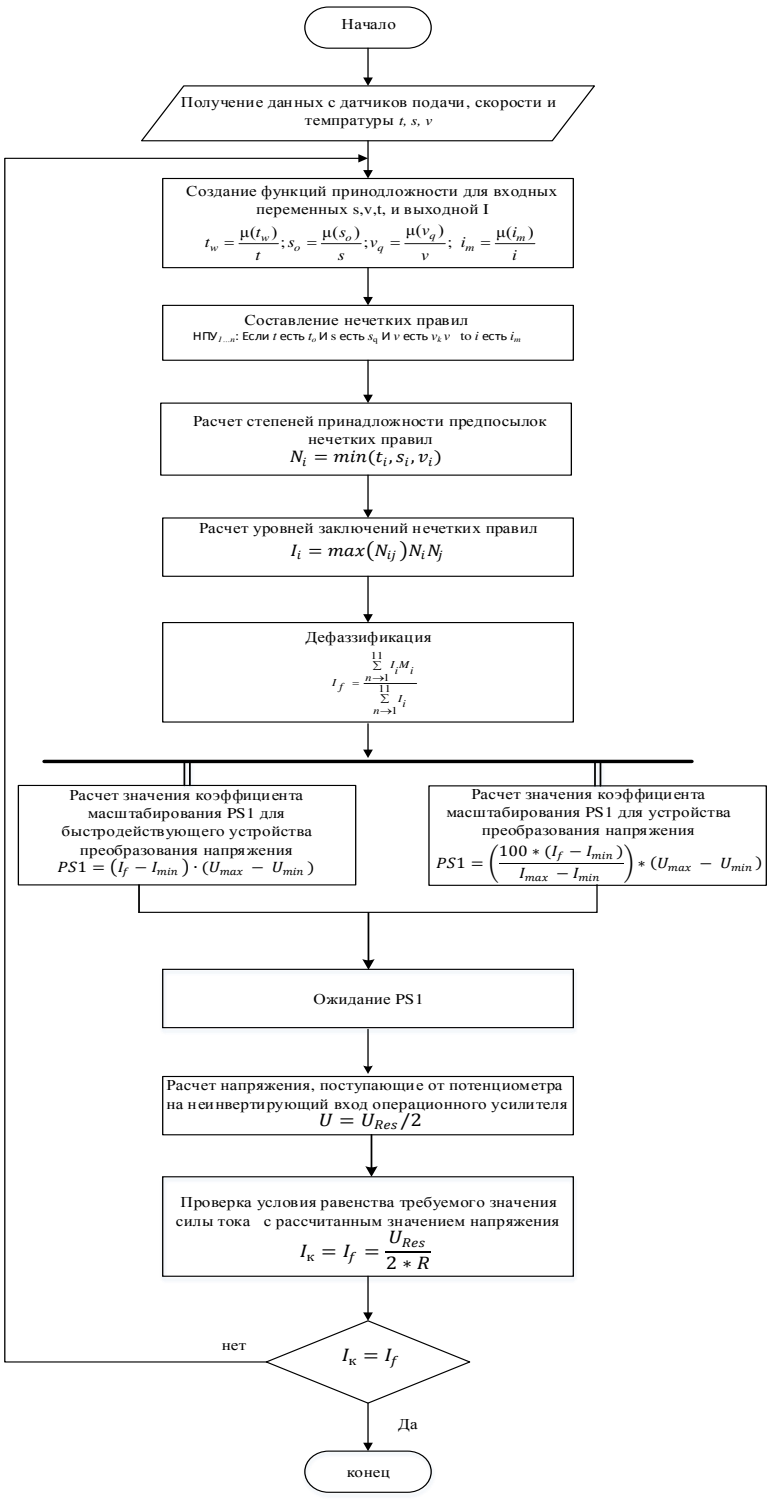

Рисунок 3 – Алгоритм преобразования «напряжение–ток» для нечеткой системы управления охлаждением изделий

Новизна алгоритма заключается в формализации процесса преобразования «напряжение–ток» за счет использования в его структуре упрощенного нечеткого логического вывода и организации параллельных вычислений.

Третья глава посвящена вопросам разработки устройства, реализующего математическую модель вычисления силы электрического тока, передаваемого на термоэлемент, используемого в устройстве преобразования напряжения для нечеткой системы управления охлаждением изделий (рисунок 4).

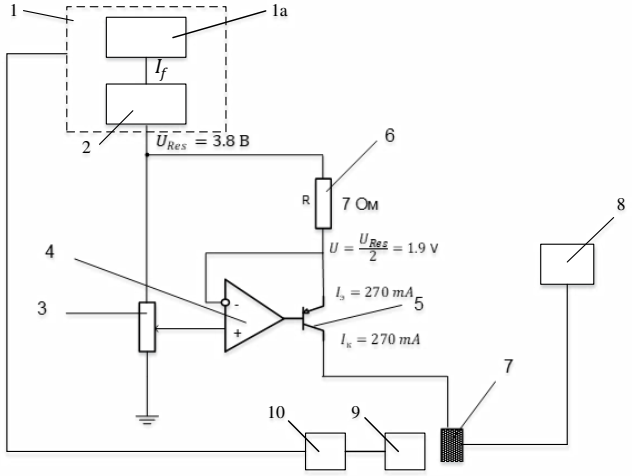

Рисунок 4 – Структурно-функциональная схема системы управления охлаждением изделий: 1 – ПЛИС, 1а – нечеткое устройство для вычисления силы электрические тока (НММВСТ), 2 – устройство преобразования напряжения (ММПНТ), 3 – потенциометр, 4 – операционный усилитель, 5 – биполярный транзистор, 6 – резистор, 7 – термоэлемент, 8 – источник питания, 9 – зона охлаждения, 10 – система активного контроля

Устройство работает следующим образом. Расчет силы тока, передаваемого на термоэлемент 7, осуществляется в ПЛИС 1 по математической модели НММВСТ (формула 4). Величина силы тока в сигнал напряжения U_{Res} преобразуется в блоке 2 и передается на потенциометр 3. Потенциометр 3 устанавливается на 50%, деля напряжение U_{Res} пополам, то есть на неинвертирующем входе операционного усилителя 4 будет напряжение, равное $U=U_{Res}/2$. Операционный усилитель 4 выполнен по схеме повторителя напряжения, следовательно, в точке соединения резистора 6 и инвертирующего входа операционного усилителя 4 напряжение также будет равняться U_{Res} /2. Ток эмиттера равняется $I_э=U/R=U_{Res}/2R$. В биполярном транзисторе 5 ток эмиттера $I_э$ приблизительно равен току коллектора $I_к$, следовательно, на термоэлемент 7 будет подаваться ток коллектора, равный $I_к = U/R=U_{Res}/2R$, и он соответствует значению, которое получено при расчете I_f по формуле 4.

Устройство, реализующие нечеткую математическую модель вычисления силы тока, представлено на рисунке 5.

Данное нечеткое устройство для вычисления силы электрического тока позволяет увеличить быстродействие принятия управляющих решения за счет автоматизации упрощенного нечеткого логического вывода.

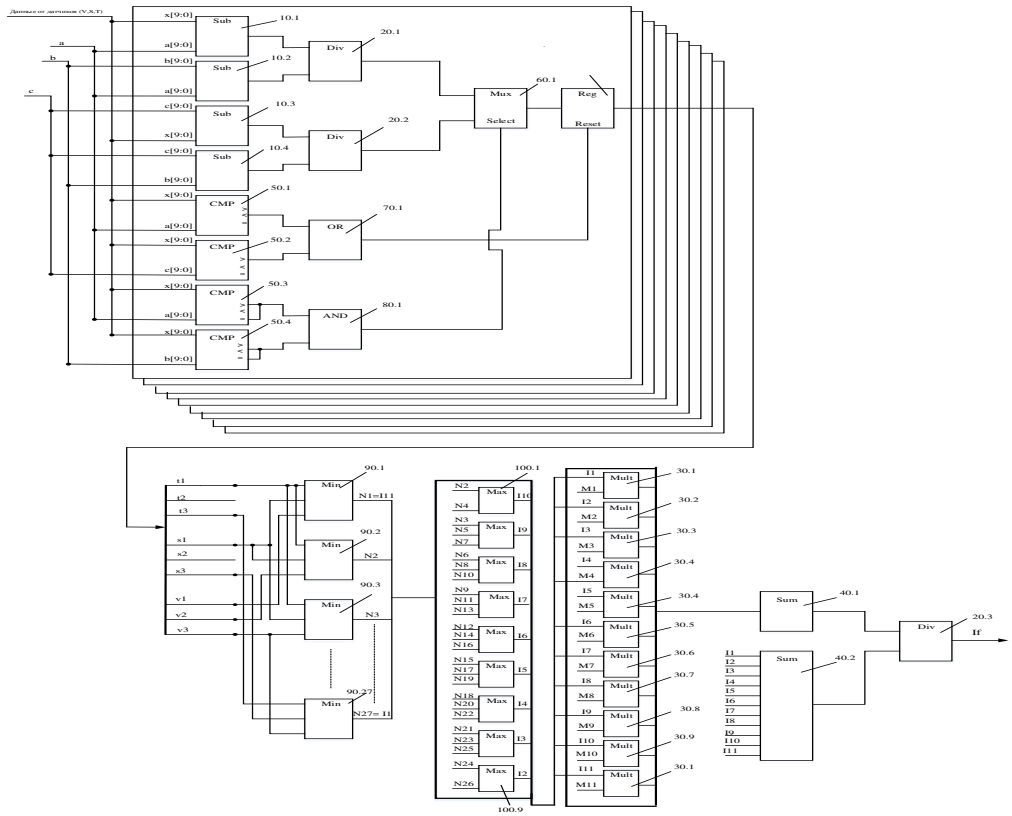

Рисунок 5 – Нечеткое устройство вычисления силы электрического тока

Устройство преобразования напряжения для нечеткой системы управления охлаждением изделий работает следующим образом (рисунок 6). На вход устройства преобразователя напряжения 2 поступают от ПЛИС 1 следующие сигналы: минимальное и максимальное значения силы тока I_{min}, рассчитанное по формуле (1) значение силы тока I_f, а также минимальное U_{min} и максимальное U_{max} значения напряжения с ПЛИС.

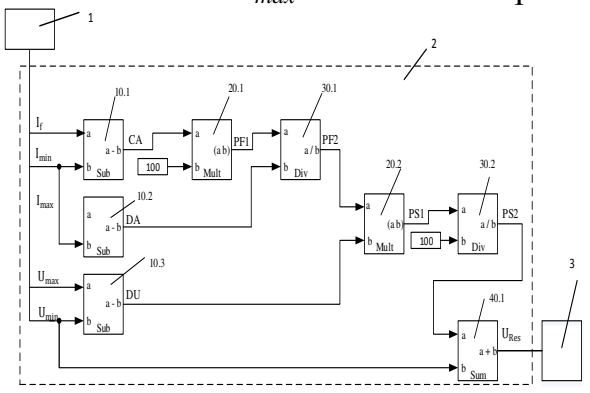

Рисунок 6 – Устройство преобразователя напряжения: 1 – ПЛИС; 2 – блок преобразователя напряжения; 3 – потенциометр; 10.1, 10.2, 10.3 – вычитатели; 20.1, 20.2 – умножители; 30.1, 30.2 – делители; 40.1 – сумматор

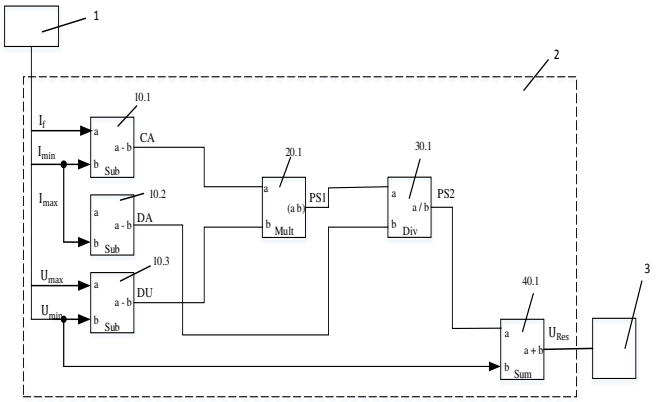

Рисунок 7 – Быстродействующее устройство преобразования напряжения: 1 – ПЛИС; 2 – быстродействующий блок преобразователя напряжения; 3 – потенциометр; 10.1, 10.2, 10.3 – вычитатели; 20.1 – умножитель; 30.1 – делитель; 40.1 – сумматор

В блоках 10.1, 10.2, 10.3, 20.1, 30.1 и 20.2 устройства (рисунок 6) по формуле (5) осуществляется расчет коэффициента масштабирования *PS1*. Далее в блоках 30.2 и 40.1 выполняется по формуле (6) расчет выходного напряжения U_{Res}. С целью увеличения производительности работы устройства, представленного на рисунке 6, и, учитывая особенность работы ПЛИС, модернизируется расчетная схема вычисления результирующего напряжения (рисунок 7). В блоках 10.1, 10.3 и 20.1 по формуле (8) осуществляется расчет коэффициента масштабирования PS1. Далее блоки 10.2, 20.1, 30.1 и 40.1 выполняют по формуле (9) расчет величины выходного напряжения U_{Res}. По сравнению с устройством, предложенном на рисунке 6, в быстродействующем устройстве (рисунок 7) исключены по одной операции умножения и деления. Следует отметить, что операция деления является одной из самых труднореализуемых операций в ПЛИС, поэтому ее исключение повышает быстродействие устройства.

Новизна устройств определяется тем, что структурно-параметрический синтез позволил перевести необходимые операции созданных математических моделей непосредственно в операционную часть устройств, тем самым сделал их функционально тождественным теории нечеткой логики при сохранении необходимого уровня однородности и поддержке параллелизма.

В четвертой главе разработанные устройства управления охлаждением изделий (рисунок 4), вычисления силы тока (рисунок 5), преобразования напряжения (рисунки 6 и 7) позволили спроектировать на базе ПЛИС Spartan 3E семейства Xilinx экспериментальное устройство преобразования напряжения (рисунок 8).

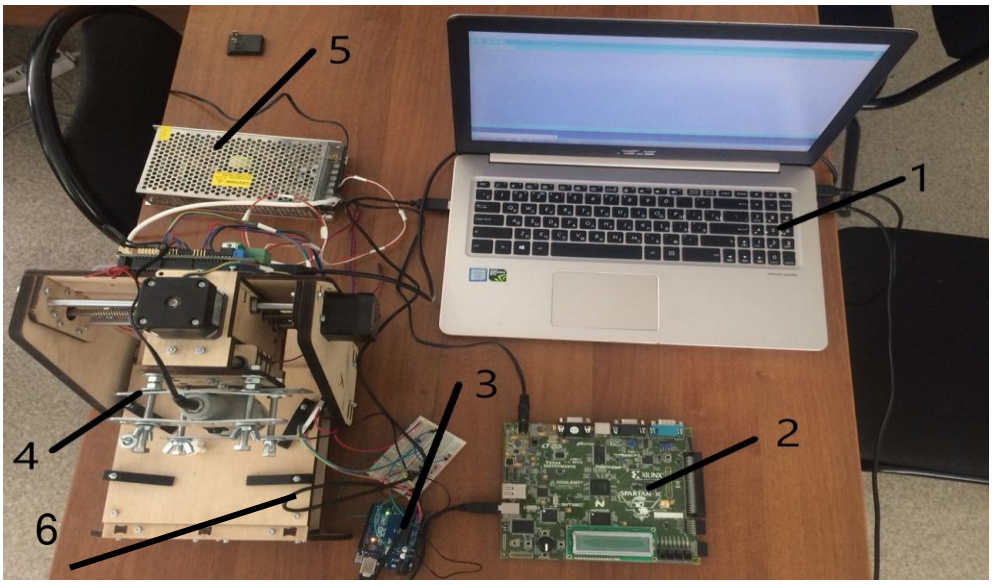

Рисунок 8 – Экспериментальное устройство преобразования напряжения в нечеткой системе управления охлаждением изделий: где 1 – ПК, 2 – ПЛИС, 3 – микроконтроллер, 4 – оборудование с ЧПУ, 5 – блок питания, 6 – термоэлемент

Временные тесты при частоте 50 МГц, выполненные в программной среде Modelsim, показали, что для вычисления величины силы тока I_f по формулам (1)÷(4), подаваемой на устройство преобразования напряжения, составляет около 380 нс (рисунок 9).

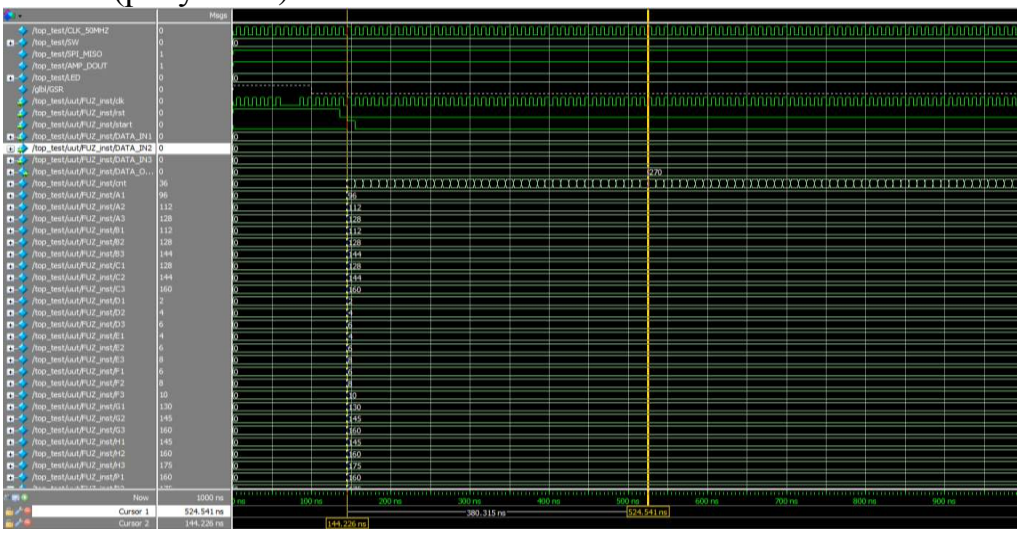

Рисунок 9 – Диаграмма времени расчета величины I_f в устройстве управления охлаждением изделий

При использовании устройства преобразования напряжения (рисунок 6) временные тесты показали, что расчет напряжения U_{Res} осуществляется за 370 нс (рисунок 10).

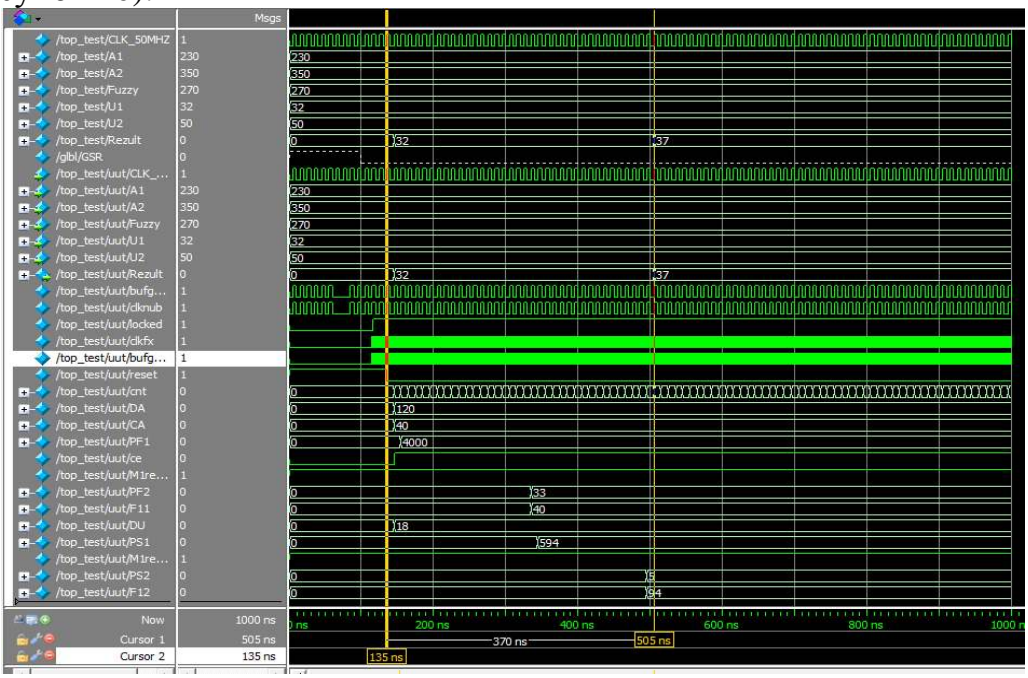

Рисунок 10 – Диаграмма времени расчета величины U_{Res} в устройстве преобразования напряжения

При использовании быстродействующего устройства преобразования напряжения (рисунок 7) временные тесты показали, что расчет напряжения U_{Res} осуществляется за 190 нс (рисунок 11).

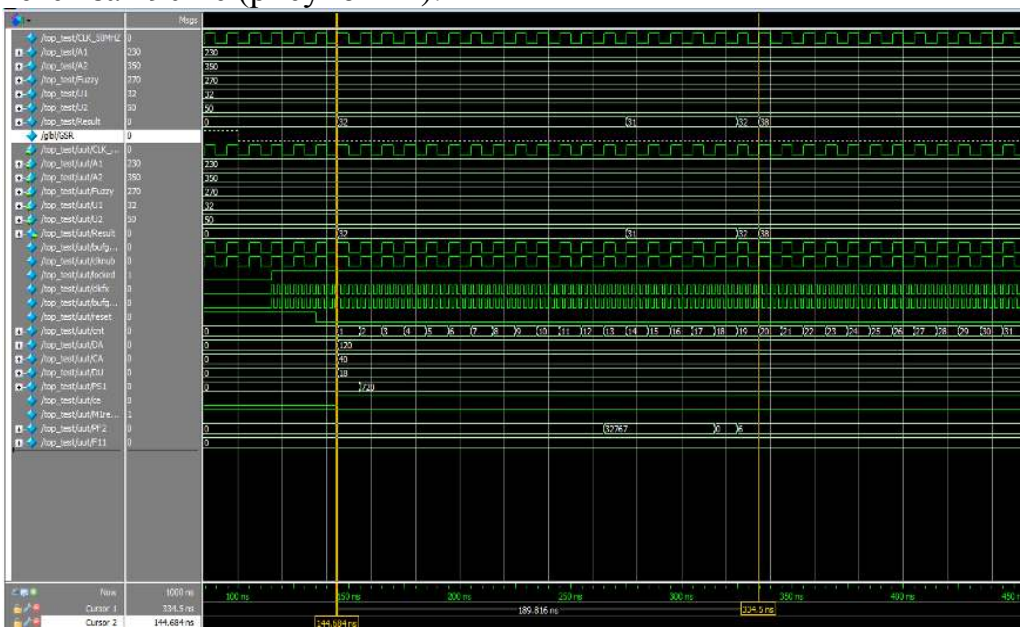

Рисунок 11 – Диаграмма времени расчета величины U_{Res} в быстродействующем устройстве преобразования напряжения

Сравнение с известными моделями предложенного устройства представлено в таблице 3.

Таблица 3. Вычислительные характеристики устройств

Модель	Вычислитель, нс	Преобразователь, нс	Суммарное время, нс
Karakuzu C. & etc	2000000	320	2000320
Joseph Anthony Prathap	–	–	20000000
Karthigeyan P. & etc	–	–	10 000 000
Преобразователь (рисунок 6)	380	370	**750**
Быстродействующий преобразователь (рисунок 7)	380	190	**570**

Таким образом, в случае возникновения внешних воздействий, действующих при охлаждении изделий при обработке деталей на оборудовании с числовым программным управлением в режиме реального времени, за 570 нс будет принято решение о назначении новой величины силы тока.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе в рамках решения поставленной научно-технической задачи повышения быстродействия в условиях преобразования выходных переменных, полученных в нечетких моделях, в сигналы управляющего напряжения с использованием ПЛИС в нечетких системах управления охлаждением изделий получены следующие основные результаты:

1. Разработана нечёткая математическая модель вычисления силы тока, передаваемого на термоэлемент, на основе упрощённого нечёткого логического вывода, позволяющая сократить число операций при дефаззификации более чем в 10 раз по сравнению с традиционными моделями расчета четкого значения в системах нечеткого вывода.
2. Разработана математическая модель преобразования «напряжение–ток» для обеспечения требуемого тока на термоэлементе, позволяющая сократить скорость вычислительного процесса расчета результирующего напряжения, передаваемого в устройство преобразования напряжения, в 2 раза.
3. Предложены метод и алгоритм преобразования «напряжение–ток» для нечеткой системы управления охлаждением изделий, передаваемого на операционный усилитель, основанных на нечёткой математической модели вычисления силы электрического тока (НММВСТ) и математической модели преобразования «напряжение–ток» (ММПНТ), позволяющих в случае расхождения расчетного и требуемого значений физических параметров обеспечить с учетом базы правил их перерасчет.
4. Разработаны устройства нечеткого вычисления силы тока и преобразования напряжения, позволяющие обеспечить тождественность системы нечеткого логического вывода операционной части устройств при сохранении необходимого уровня однородности и поддержке параллелизма, что позволило реализовать эти устройства на перспективной элементной базе ПЛИС.
5. Система управления охлаждением изделий на основе устройств нечеткого вычисления силы тока и преобразования напряжения, реализованные на ПЛИС, позволяющие обеспечить скорость принятия управляющих решений порядка 570 нс, что увеличивает ее быстродействие в 4 и более раза по сравнению с известными устройствами.

Рекомендации. Результаты диссертационного исследования могут быть использованы для разработки систем управления мехатронными и роботизированными подвижными комплексами.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Использование математических моделей, алгоритма преобразования «напряжение–ток» позволит сократить время принятия решений для подобных устройств.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ

1. **Абдулджаббар, М.А.** Исследование свойств мягкого алгоритма нечетко-логического вывода / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2016. – №1. – С.31–49.
2. **Абдулджаббар, М.А.** Нечёткая стабилизация процесса обработки деталей в задачах управления оборудованием с ЧПУ / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар// Автоматизация Современные технологии. – 2017. – №5. – С.212– 218.
3. **Абдулджаббар, М.А.** Устройство управления термоэлементом на основе нечеткой логики/ М.В. Бобырь, М.А. Абдулджаббар// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2017. – №11. – С.3 – 8.

Публикации в журналах, индексируемых в базах данных Scopus и WoS:

4. **Abduljabbar, M.A.** The cooled cutter control algorithm is based on fuzzy logic/ M. V. Bobyr', A. A. Nasser and M.A. Abduljabbar //Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2018. – Vol. 44. – № 7.

Научные труды, опубликованные в других изданиях РИНЦ

5. Бобырь М.В. Обучение нейро-нечетких систем: монография / М.В. Бобырь. – М.: ИНФРА-М, 2017 – С. 240, Абдулджаббар М.А., раздел: 2.3.2 – «Модель Ларсена» – С. 70 – 72.
6. **Абдулджаббар, М.А.** Анализ эффективности функционирования мягкой модели нечетко-логического вывода / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // Современные материалы техника и технологии: сборник материалов межд. научно-технич. конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2015. – № 1. – С. 30 – 31.
7. **Абдулджаббар, М.А.** Моделирование алгоритма Сугэно на основе нечеткой логики / М.А. Абдулджаббар // Интеллектуальные и информационные системы: сборник международной научно - технической конференции. – Тула, 2015. – С.110 – 112.
8. **Абдулджаббар, М.А.** Автоматизация процедур принятия решений на основе модели Мамдани / М.А. Абдулджаббар // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов. – 2016. – №6. – С. 283-286.
9. **Абдулджаббар, М.А**. Мягкий алгоритм нечеткого вывода на основе метода дефаззификации разности площадей/ В.С. Титов, М.А. Абдулджаббар // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического

производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: сборник международной научно-технической конференции. – Вологда, 2016. – С.161-164.

10. **Абдулджаббар, М.А.** Применение инерциальных навигационных сенсоров в системе управления мобильным роботом/ М. Ю. Лунева, А.С. Якушев, М.А. Абдулджаббар // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы: материалы международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2016. – С.85-89.

11. **Абдулджаббар, М.А.** Автоматизированная система управления температурным режимом / М.А. Абдулджаббар // Интеллектуальные и информационные: материалы международной научно-технической конференции. – Тула, 2016. – С.212-214.

12. **Абдулджаббар, М.А.** Алгоритм управления температурным режимом на основе элемента Пельтье / М.А. Абдулджаббар // Новые информационные технологии и системы: материалы международной научно-технической конференции. – Пенза, 2016. – С. 24-25.

13. **Абдулджаббар, М.А.** Автоматизированная система управления температурой в зоне резания / М.А. Абдулджаббар, А.Н. Бекетов // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: материалы XII международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГУ, 2017. – С. 6-8.

14. **Абдулджаббар, М.А.** Способ управления температурой в зоне резания / М.В. Бобырь, М.А. Абдулджаббар // Мехатроника, автоматика и робототехника: материалы международной научно-технической конференции.– Новокузнецк: НИЦ МС, 2017. – С. 96-98.

15. **Абдулджаббар, М.А.** Нечеткая математическая модель управления температурой в зоне резания/ М.В. Бобырь, М.А. Абдулджаббар // Инноватика-2017: сборник XIII международной школы-конференции студентов, аспирантов, молодых ученых. – Томск,2017. – С. 24-27.

16. **Абдулджаббар, М.А.** Анализ устойчивости нелинейной нечеткой системы управления оборудованием с ЧПУ / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // Нелинейная динамика машин: материалы IV международной Школы-конференции молодых ученых. School-NDM 2017. – Москва, 2017. – С. 173-178.

17. **Абдулджаббар, М.А.** Автоматизация процесса управления температурным режимом на оборудовании с ЧПУ / М.В. Бобырь, М.А. Абдулджаббар // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символьной информации: материалы XIII Международной научно-технической конференции. – Курск: ЮЗГУ, 2017. – С.70-71.

18. **Абдулджаббар, М.А.** Нечеткая эргатическая система управления охлаждением изделий / М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // МКПУ-2017: материалы 10-ой Всероссийской мульти конференции по проблемам управления. – Ростов-на-Дону, 2017. – С. 115-117.

19. **Абдулджаббар, М.А.** Устройство охлаждения для фрезерного станка с ЧПУ/ М.В. Бобырь, А.А. Нассер, М.А. Абдулджаббар // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: сборник V международной научной конференции. – Москва, 2017. – С. 68-70.

20. **Абдулджаббар, М.А.** Устройство преобразования напряжения для нечеткой системы охлаждения изделий / М.В. Бобырь, М.А. Абдулджаббар // Современные инновации в науке и технике: сборник научных трудов 8 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Курск: ЮЗГУ, 2018. – С. 43-46.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

21. **Абдулджаббар, М.А.**, Нассер, А.А. Программа моделирования процесса управления температурным режимом в зоне резания / Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663078, заявл. 27.08.2017, опубл. 23.11.2017.

Подписано в печать __.__.2018 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