

На правах рукописи



Бузикаева Алина Валерьевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ
НА БАЗЕ МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2025

Работа выполнена на кафедре «Электропривод и автоматизация промышленных установок» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: Черный Сергей Петрович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Официальные оппоненты: Радионов Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и управление» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

Скорик Виталий Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника, электроника и электромеханика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», г. Хабаровск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск

Защита диссертации состоится « 2 » июля 2025 г. в 9:00 часов на заседании диссертационного совета 99.2.140.02 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27 и на сайте https://sovets.knastu.ru/diss_defense

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.2.140.02, канд. техн. наук



Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Базовыми компонентами любого электротехнического комплекса являются электрический двигатель, система управления и нагрузка. При этом повышение эффективности электротехнических комплексов напрямую зависит от формирования процедур управления, реализуемых системой регулирования. В настоящее время базовой структурой, на основе которой осуществляется реализация современных систем управления электроприводами (СУЭП) как постоянного, так и переменного тока является структура, использующая принцип подчиненного регулирования координат. Широкая ориентация пользователей и разработчиков СУЭП на данный принцип обусловлена рядом преимуществ при линеаризации математического описания систем электроприводов, таких как универсальность и простота настройки и реализации регуляторов. Однако в тех случаях, когда пренебречь влиянием ряда факторов на систему электропривода невозможно, например, нелинейность звеньев, неполнота описания некоторых специфических свойств обусловленных технологическим процессом, возникающая при формализации описания поведения системы и т.п., приходится уходить от базовой структуры, что несколько усложняет систему регулирования, либо использовать интеллектуальные алгоритмы управления. Большинство систем управления технологическими процессами в своей основе содержат СУЭП, и именно особенности функционирования и встраивания электропривода в заданную предметную область и определяют специфические особенности при реализации систем управления. Наиболее широко используемым подходом при построении интеллектуальных систем управления электроприводами (ИСУЭП) как постоянного, так и переменного тока, являются системы, основанные на теории нечетких множеств. Однако применение таких систем в базовом классическом построении сопровождается целым набором сложностей, связанных с размерностью и объемом базы знаний, выбором критериев управления для конкретного режима, ограниченностью вычислительных ресурсов стандартных средств автоматизации и, как следствие, низким быстродействием всей СУЭП.

Интеллектуализация систем электропривода является актуальной проблемой в настоящее время. Общепринятые подходы построения СЭУП, базирующихся на нечеткой логике, предоставляют желаемые результаты, когда необходима реализация классических законов управления, например, пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального. Для слабоструктурированных технологических объектов, в основе которых лежит электропривод, необходима реализация сложных законов регулирования, которые характеризуются набором различных функциональных зависимостей. Формирование процедур управления в СЭУП может быть успешно реализовано на основе теории искусственных нейронных сетей, однако, наряду с обширным спектром их возможностей, существует ряд сопутствующих проблем. Одной из возможных альтернатив, позволяющих улучшить показатели качества технологических процессов, является применение стандартных алгоритмов нечеткого регулирования, преимущество которых обосно-

вано и доказано для решения целого ряда задач по управлению. Вместе с тем формализация таких электротехнических комплексов приведет к существенному усложнению настройки и возрастанию количества основных параметров нечетких логических регуляторов (НЛР). Чаще всего такая ситуация приводит к увеличению объема базы знаний и перехода ее в гиперпространственное состояние, а также к значительному росту числа функций принадлежности в диапазоне управления и увеличению перечня лингвистических переменных, характеризующих состояние объекта. Возможным вариантом ослабления влияния вышеперечисленных негативных факторов является применение многокаскадных нечетких систем управления электроприводом (МНСУЭП). Наиболее приемлемыми объектами с точки зрения реализации предложенного подхода являются системы управления электроприводами постоянного и переменного тока, в математическом описании которых учтены специфические свойства. Целесообразность внедрения технологии многокаскадных нечетких логических регуляторов (МНЛР) при их реализации в виде интеллектуального управляющего модуля для систем электроприводов позволит реализовывать подобную методику управления для целого класса такими электротехническими комплексами в условиях существенного влияния негативных факторов (неполнота и противоречивость исходных данных, нелинейность и наличие взаимосвязей между координатами).

Степень разработанности. Диссертационное исследование выполнено на основе работ как российских, так и зарубежных ученых, которые посвящены вопросам в области управления электроприводами, и в частности, с применением теории нечетких множеств: Искандеров Г.М., Пospelов Д.А., Власов К.П., Круглов В.И., Терехов В.М., Ульянов С.В., Ключев В.И., Чемоданов Б.К., Новиков В.А., Анучин А.С., Москаленко В.В., Осипов О.И., Соколовский Г.Г., Ефимов А.А., Ильинский Н.Ф., Шрейнер Р.Т., Гельман М.В., Zadeh L.A., Mamdani E.A., Sugeno M., Takagi T., Terano T., Asai K. Jager R.J., Scharf H., Elkan C., Dombi J., Abrar H., Sarhaddi M., Yaghoobi M., Wang X., Wang Q, Mehdi Abbasi S.M., Jalali A., Huoa J., Bose B.K., Blaabjerg F., Boldea I., Krishnan R., Mohan N., Lipo T.A., Holtz J., Rajashekara K., Kazmierkowski M.P., Sul S.-K. Но, несмотря на обширные исследования, многие вопросы, которые связаны с особенностями функционирования системы электропривода с неполнотой информационной составляющей, увеличением алгоритмической сложности объекта регулирования, а также алгоритмами повышения интеллектуальных возможностей и упрощения реализации стандартными средствами, остаются открытыми.

Цель диссертации. Улучшение динамических показателей систем электроприводов за счет использования нечетких многокаскадных алгоритмов управления.

Задачи диссертации.

1. Разработка математического описания МНЛР системы электропривода с учетом различных возмущающих факторов внутреннего и внешнего характера, обусловленных нестационарностью.

2. Синтез и исследование различных моделей МНСУЭП и формируемых ими сложных законов управления с учетом существенных нелинейностей в

различных режимах работы электропривода.

3. Учет особенностей функционирования технологического объекта на базе электропривода за счет разработки и реализации методики структурного и параметрического синтеза МНСЭУП.

Научная новизна:

- предложен новый подход к построению интеллектуальных регуляторов систем электроприводов постоянного и переменного тока, обеспечивающий улучшение основных показателей качества управления и базирующийся на выборе каскадности и иерархичности МНЛР с учетом особенностей технологических процессов электротехнического комплекса

- разработаны модели и алгоритмы настройки МНЛР систем электроприводов, позволяющие расширить функциональные возможности нечетких систем, снизить количество входных лингвистических переменных, а также объем и размерность базы знаний;

- разработаны алгоритмы многокаскадного управления электроприводами постоянного и переменного тока, функционирующих в различных режимах;

- предложены структуры комбинированных НЛР, сочетающие в себе различные механизмы выводов и обеспечивающие улучшение требуемых показателей качества систем управления электроприводами постоянного и переменного тока.

Объектом исследования является регулируемый электропривод, базирующийся на использовании алгоритмов многокаскадного нечеткого управления.

Предметом исследования является система управления электроприводами постоянного и переменного тока на базе МНЛР.

Методы исследования: элементы теории интегрального и дифференциального исчисления, методы математического и имитационного моделирования, основные положения классической теории автоматического регулирования и теории нечетких множеств.

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель МНЛР системы электропривода, позволяющая учесть влияние сочетания алгоритмов нечетких выводов на качество основных показателей электромеханической системы.

2. Имитационные модели МНСУЭП постоянного и переменного тока и формируемые ими алгоритмы регулирования, учитывающие существенные нелинейности и нестационарности в различных режимах работы.

3. Алгоритмы управления электроприводами постоянного и переменного тока, позволяющие реализовать методики моделирования МНЛР в зависимости от особенностей их функционирования и учета различной наполняемости внутренней структуры нечеткой системы.

Практическая значимость работы:

- разработка математического описания МНСУЭП, позволяющего учесть влияние внутренних и внешних факторов, оказывающих воздействие на динамические показатели систем электроприводов;

- синтез имитационных моделей электроприводов постоянного и перемен-

ного тока с реализацией МНЛР, функционирующих на базе различных сочетаний механизмов выводов, и формируемых ими законов управления;

- разработка ИСУЭП, функционирующей в различных режимах работы, которая обеспечивает переход между зонами регулирования без снижения показателей качества.

Соответствие паспорту специальности. Тематика исследования, проводимого в рамках диссертационной работы, соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.2: 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования промышленного назначения; 3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.

Достоверность результатов и апробация работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2017, 2021, 2023, 2024 гг.);

– всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 г.);

– XIII международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, 2018 г.);

– II всероссийская научно-практическая конференция «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 2018, 2023 гг.);

– International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies «FarEastCon» (г. Владивосток, 2018, 2019, 2020 гг.);

– International Ural Conference on Electrical Power Engineering «Ural-Con» (г. Челябинск, 2019 г.);

– XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2019, 2020, 2021 гг.);

– II всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.);

– всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 60-летию кафедры "Системы электроснабжения" и 100-летию плана ГОЭЛРО «Электроэнергетические комплексы и системы: история,

опыт, перспектива» (г. Хабаровск, 2020 г.);

– XXIII краевой конкурс молодых ученых «Молодые ученые - Хабаровскому краю» (г. Хабаровск, 2021 г.);

– II международная научно-практическая конференция молодых учёных «Трансформация информационно-коммуникативной среды общества в условиях вызовов современности» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2023 г.).

Материалы диссертационной работы были выполнены в рамках НИР №ВН010/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

Предложенная методика многокаскадного нечеткого управления внедрена на Комсомольской дистанции электроснабжения Дальневосточной дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД», что подкреплено актом внедрения. Кроме того результаты работы в виде полученных алгоритмов многокаскадного управления электроприводами постоянного и переменного тока и модели комбинированных нечетких регуляторов применяются при проведении научно-исследовательских работ, а также в учебном процессе кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета».

Личный вклад автора. В совместных публикациях [2, 3, 6, 8, 13, 16 – 19] личный вклад автора заключается в разработке имитационных моделей систем электроприводов; в публикациях [4, 5, 7, 14, 15, 20 – 22] – в разработке алгоритмов управления систем электроприводов с применением МНЛР; в работах [9-12] личный вклад заключается в разработке компонентов программного кода МНЛР; публикация [1] выполнена автором лично без соавторства.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 22 научных работах, в том числе 2 статьи из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 6 статей, представленных в международных наукометрических базах цитирований, 4 свидетельства о регистрации ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Основная часть работы содержит 130 страниц, 9 таблиц и 81 рисунок. Список литературы включает в себя 119 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, показана научная новизна, практическая ценность, а также определены требования к СУЭП, которые характеризуются нестационарностью и неполнотой априорной информации.

В первой главе проведен анализ различных методов интеллектуального управления системами электроприводов, включая генетические алгоритмы, нейронные сети и нечеткие системы. Выявлены преимущества системы, использующей аппарат нечеткой логики, а также определены основные направления развития таких систем при решении задач по управлению электропривода-

ми постоянного тока. Проанализированы основные пути развития нечетких систем управления электроприводами, которые ориентированы на индивидуальные качества реализуемых технологических процессов.

Вторая глава посвящена анализу стандартного подхода по решению задач управления с использованием теории мягких вычислений (теории нечетких множеств) на примере электропривода постоянного тока. Анализ осуществлялся в ходе моделирования типовой СЭУП постоянного тока путем замены классического регулятора положения на НЛР и варьирования основных параметров. Результаты моделирования, отраженные в динамических характеристиках системы, продемонстрировали более высокие показатели качества по быстродействию и существенное снижение перерегулирования относительно классических систем электропривода, использующих ПИД-закон. Однако использование стандартных моделей нечетких систем представляется ограниченным вследствие отсутствия возможности перенастройки законов управления в условиях существенного изменения режимов работы СЭУП. Кроме того повышение точности математического описания системы электропривода приводит к росту количества лингвистических переменных в нечетком логическом регуляторе, и, как следствие, сопровождается резким увеличением объема базы знаний. Для ослабления указанных недостатков предлагается использовать двухкаскадную иерархическую структуру, внешний каскад которой является интеллектуальным модулем выбора соответствующего канала регулирования, а вложенный каскад состоит из набора НЛР, позволяющих переключать режимы работы.

Механизм вывода НЛР независимо от выбранного алгоритма протекает по стандартной схеме за конечное число этапов. Тогда для этапа фаззификации можно записать:

$$\min \alpha_i = \Lambda_{i=1}^n (A_i(x_0); B_i(y_0)),$$

где α_i – степени истинности предпосылки (уровень отсечения) i -го правила;

A_i, B_i – функции принадлежности antecedента i -го правила для каждой входной лингвистической переменной.

На основании вычисленных степеней истинности α_i для всех правил из продукционной базы знаний осуществляется их применение к консеквентам соответствующих правил и определяется выходное агрегированное нечеткое множество:

$$C_\Sigma(z) = \Lambda_{i=1}^n (\alpha_i; C_i(z_i)),$$

где z_i – переменная вывода i -го правила;

C_i – функция принадлежности консеквента i -го правила.

Тогда функцию принадлежности итогового нечеткого множества соответствующей переменной вывода можно записать в виде:

$$\mu_\Sigma(z) = \max \Lambda_{i=1}^n (\alpha_i; C_i(z_i)).$$

Приведение к четкости целесообразно проводить центроидным методом:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \wedge C_i(z_i)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i}.$$

При формировании нечеткого вывода с применением алгоритма Сугено изменится лишь консеквент продукционного правила:

$$z_i = a_i x + b_i y.$$

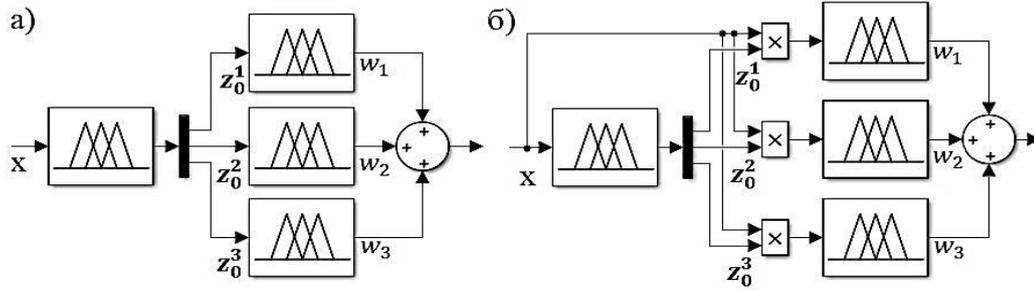


Рисунок 1 – Структурная схема МНЛР
 а – с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани;
 б – с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

Для МНЛР (рисунок 1(а)) выходное состояние переменных вывода внешнего каскада можно записать в виде следующего набора выходных значений:

$$Z_0 = \begin{bmatrix} z_0^1 \\ z_0^2 \\ \vdots \\ z_0^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n \alpha_i^1 \wedge C_i^1(z) \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i^2 \wedge C_i^2(z) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n \alpha_i^m \wedge C_i^m(z) \end{bmatrix}.$$

Представленное состояние лингвистических переменных на выходе НЛР внешнего каскада представляет собой набор входных сигналов для вложенных модулей.

Индивидуальные выходы правил имеют вид:

$$\beta_i = D_i(v_0) \wedge \sum_{i=1}^n \alpha_i^1 \wedge C_i^1(z_i),$$

$$w_0 = \beta_i \wedge E_i(w_i) = D_i(v_0) \wedge \sum_{i=1}^n \alpha_i^1 \wedge C_i^1(z_i) \wedge E_i(w_i),$$

где D_i и E_i - функции принадлежности нечеткого модуля вложенного каскада для переменных входа и выхода соответственно,

β_i – уровень отсечения для каждого состояния входной лингвистической переменной нечеткого логического регулятора вложенного модуля,

v_i, w_i – входная переменная и переменная вывода вложенного модуля соответственно.

Итоговое значение, которое будет получено с выхода МНЛР, имеет вид:

$$W_0 = \sum_{j=1}^m D_j(v_0) \wedge \sum_{i=1}^n (\alpha_i^j \wedge C_i^j(z) \wedge E_i(w_i)).$$

Для случая алгоритма нечеткого вывода Сугено нулевого порядка (рисунок 1 (б)) компонент формулы

$$C_i^j(z) = C_i = const$$

будет дополнен сигналом, содержащим информацию о состоянии входа МНЛР:

$$C_i \cdot x(t),$$

где $x(t)$ - одна из информационных составляющих входного сигнала первого каскада, например, сигнал ошибки системы.

Реализация ИСУЭП осуществляется путем введения в нее интеллектуального модуля выбора, состоящего из одного НЛР с механизмом вывода Сугено во внешнем каскаде и тремя элементами умножения, формирующими совокупность задающих воздействий для модулей внутреннего каскада. В результате синтеза была получена имитационная модель МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани (рисунок 2).

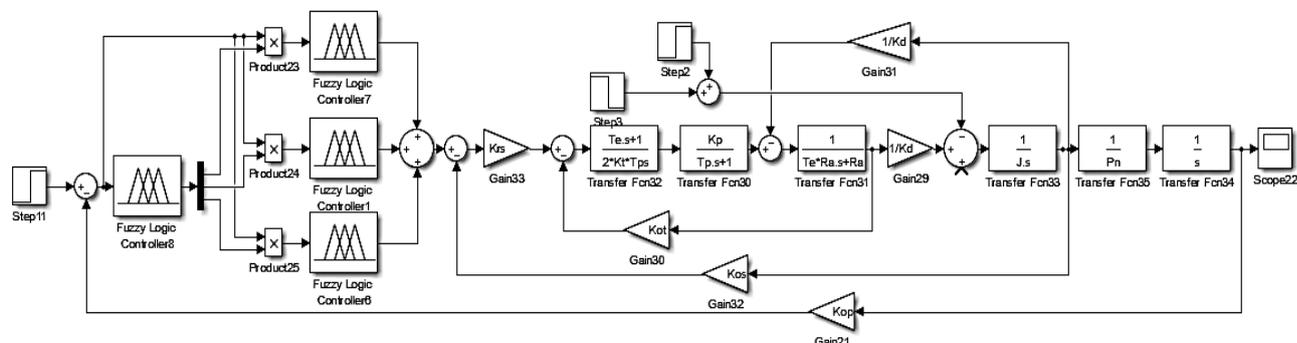
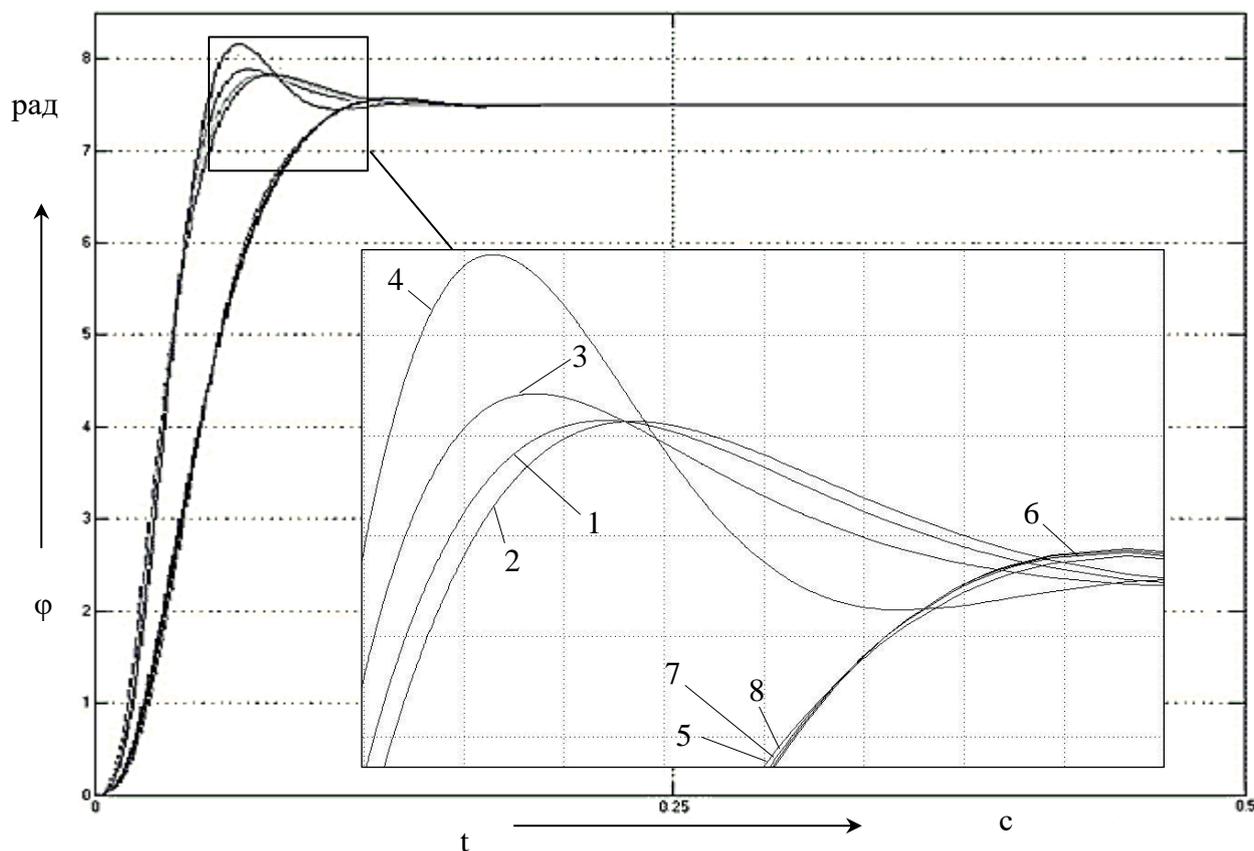


Рисунок 2 – Имитационная модель МНСУЭП позиционирования на базе электропривода постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани



- 1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%;
 4 – классическая СУЭП -30%; 5 – МНСУЭП; 6 – МНСУЭП +15%;
 7 – МНСУЭП -15%; 8 – МНСУЭП -30%

Рисунок 3 – Семейство переходных характеристик, отражающих влияние изменения параметра K_p в диапазоне от -30% до 15%

Дальнейший ход исследования предложенного подхода сводился к замене алгоритма нечеткого логического вывода во внешнем каскаде и синтезу имитационной модели МНСУЭП позиционирования на базе электропривода посто-

янного тока (рисунок 4). Результаты моделирования МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани приведены на рисунке 5.

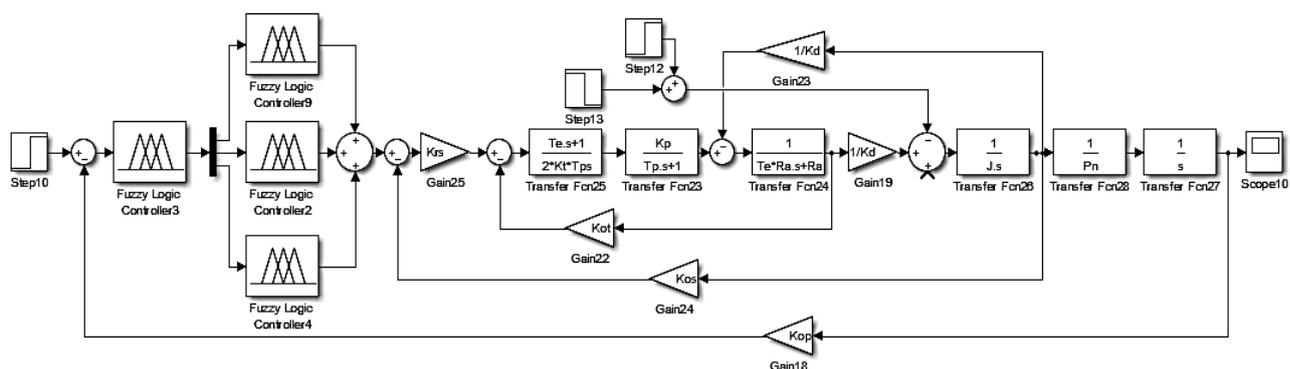
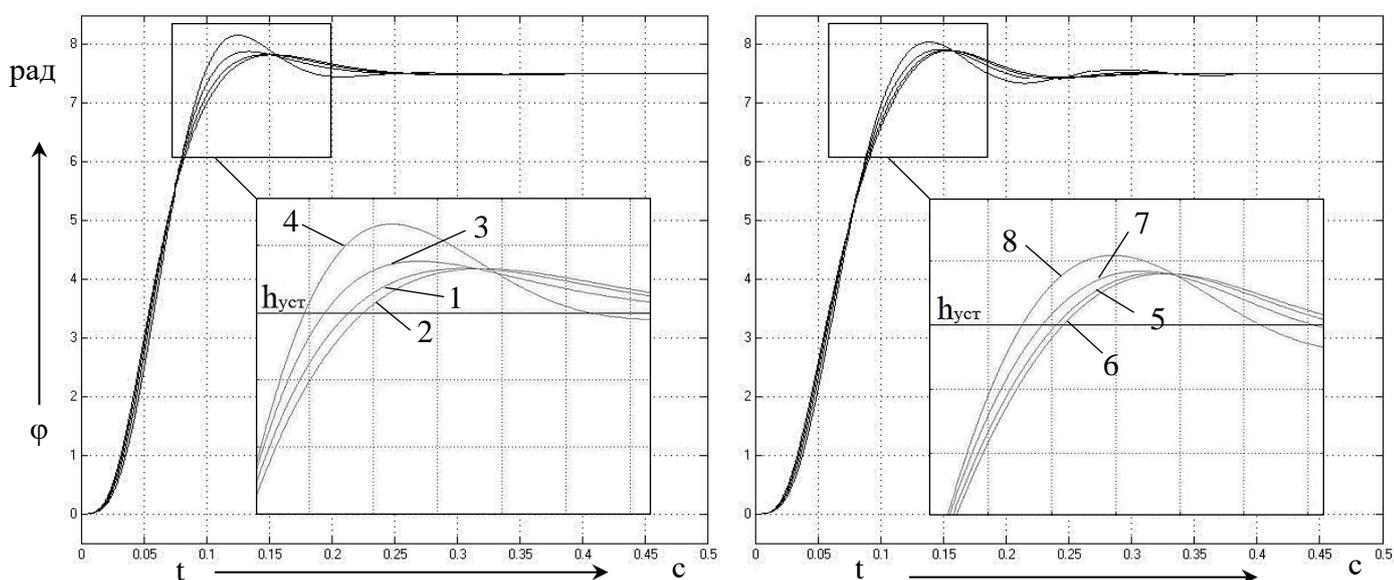


Рисунок 4 – Структурная схема МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани



1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СЭУП +15%; 3 – классическая СЭУП -15%;
4 – классическая СЭУП -30%; 5 – МНСУЭП; 6 – МНСУЭП +15%;
7 – МНСУЭП -15%; 8 – МНСУЭП -30%

Рисунок 5 – График переходного процесса СУЭП и МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани

Результат реакции СУЭП на стандартное скачкообразное воздействие управляющего и возмущающего сигнала показывает, что система стабильна и переходные процессы сигналов классической и двухкаскадной нечеткой систем электропривода в статическом режиме имеют одинаковый заданный уровень. При этом необходимо отметить, что МНСУЭП постоянного тока нечувствительна к вариациям внутренних параметров регулятора тока.

Третья глава посвящена исследованию ИСУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости. На основе классического математического описания системы двухзонного регулирования, объект управления которого характеризуется наличием существенных нелинейностей, был синтезирован МНЛР в контуре управления скоростью. Структурная схема такой ИСУЭП приведена на рисунке 6.

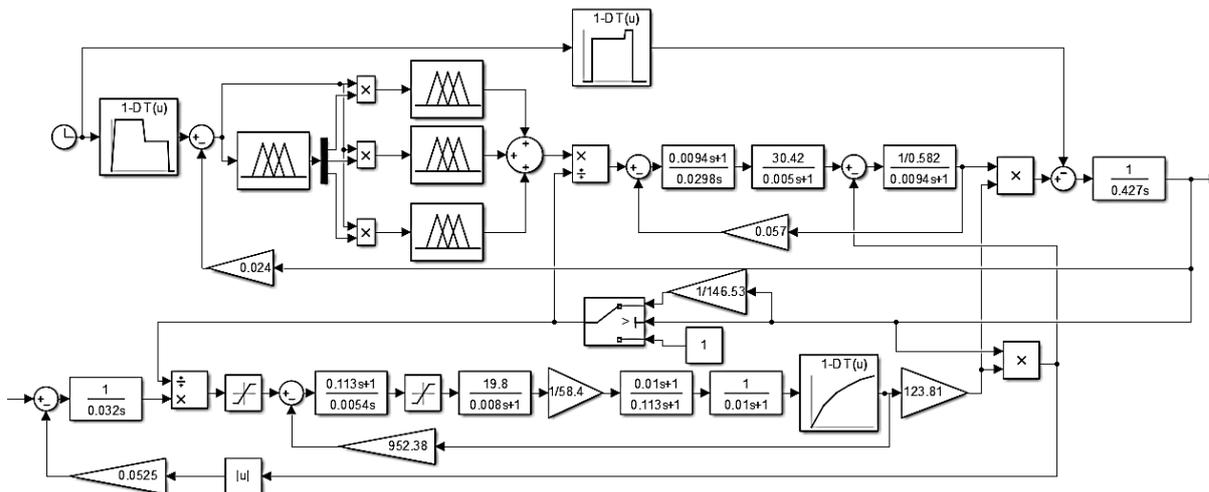
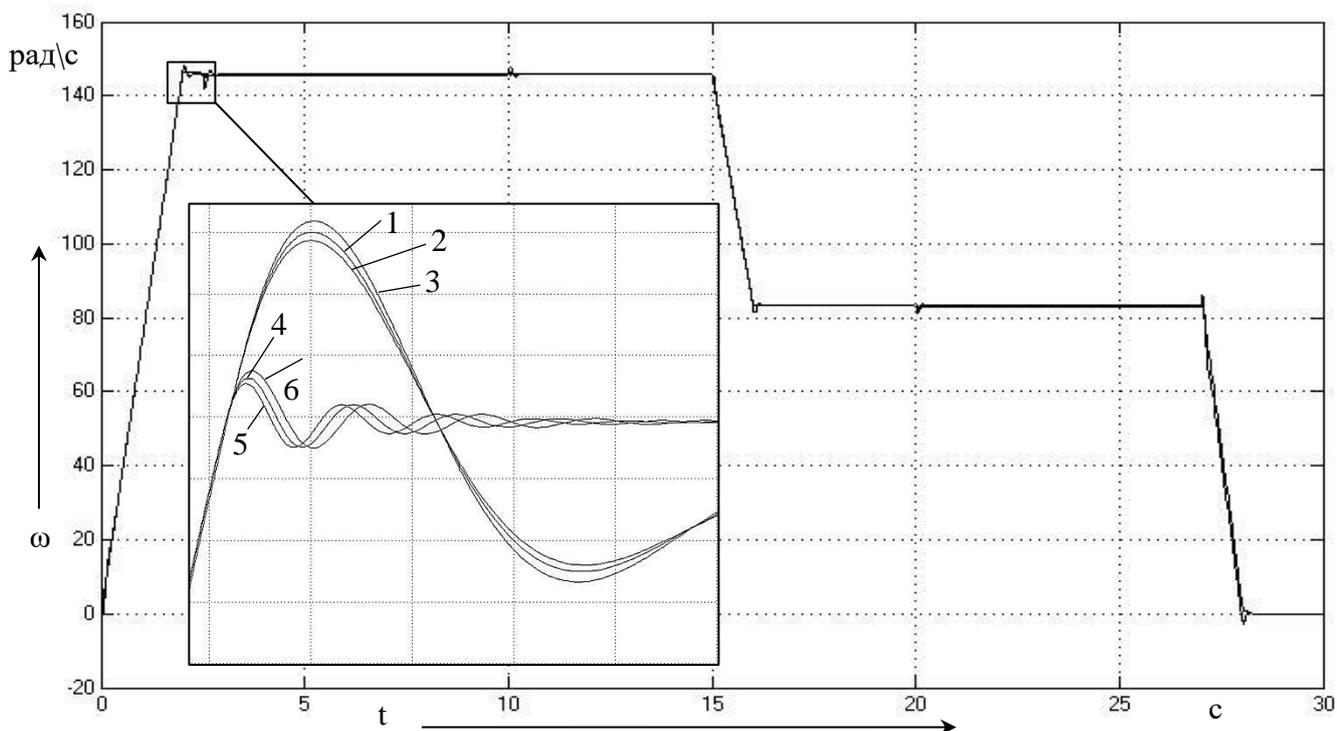


Рисунок 6 - Структурная схема МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

Классический подход при реализации системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости базируется на линеаризации характеристик звеньев системы электропривода. Для компенсации влияния нелинейностей, обусловленных блоками произведения, в контурах регулирования скорости и ЭДС двигателя на выходах регуляторов этих параметров включены блоки деления. Нелинейности типа «звено насыщения» в рассматриваемой модели используются для ограничения выходной координаты соответствующего звена. Нелинейность в контуре регулирования магнитного потока строится на основании универсальной кривой намагничивания.

Основными целями задачи управления являются как ослабление влияния нестационарных параметров процесса на выходную величину, так и снижение неточности регулирования, обусловленной существенным количеством допущений и ограничений. Внедрение в систему МНЛР позволит за счет некоторого усложнения структурной реализации согласовать параметры нечетких регуляторов, синтезированных для работы в режимах «до номинальной скорости» и «выше номинальной скорости». Кроме того в задачу синтеза входит не только определение параметров и количество функций принадлежности, но и формирование рационального алгоритма переключения между режимами функционирования СУЭП: внешний каскад МНЛР реализуется как классификатор, оценивающий входную информацию и осуществляющий выбор соответствующего элемента вложенного каскада, который формирует итоговое управляющее воздействие МНЛР.

Синтез ИСУЭП с двухзонным регулированием скорости основан на применении МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани. Исследование работоспособности системы электропривода проводилось путем анализа реакции системы на отработку управляющего сигнала сложной формы при резко переменной нагрузке на валу двигателя. Путем изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в диапазоне от -15% до 15% от номинального значения был проведен анализ эффективности работы МНСУЭП с двухзонным регулированием.

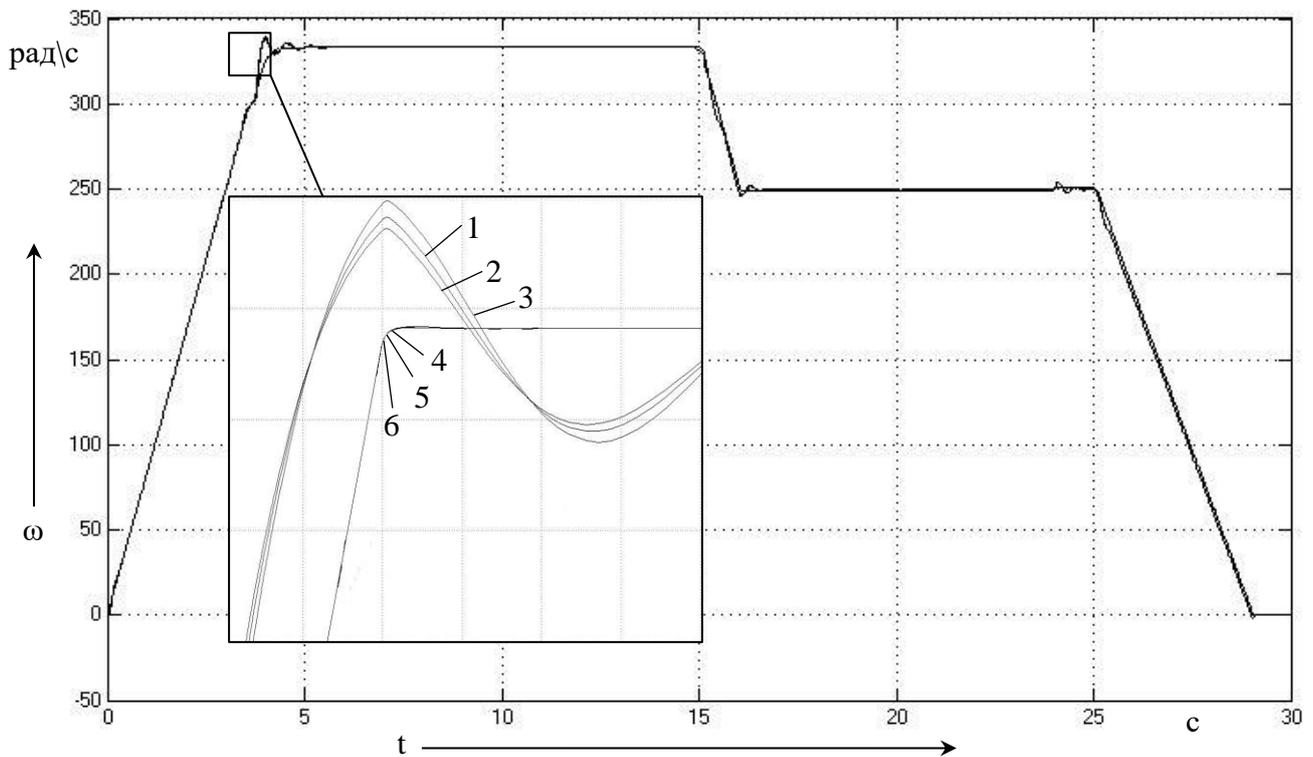


1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%;
4 – МНСУЭП; 5 – МНСУЭП +15%; 6 – МНСУЭП -15%

Рисунок 7 – Реакция классической и нечеткой СУЭП с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим «до номинальной скорости» при обработке входного воздействия

Результаты реакции моделей классической и нечеткой систем электропривода с двухзонным регулированием скорости на обработку задающего воздействия режима «до номинальной скорости» приведены на рисунке 7. Исходя из представленных результатов моделирования, можно сделать вывод, что полученная ИСУЭП с двухзонным регулированием скорости обладает некоторыми преимуществами по быстродействию и перерегулированию относительно классического варианта.

Реализация нечеткого закона управления в рассматриваемой системе электропривода при переходе ее в режим «выше номинальной скорости» обусловлена изменениями области определения блоков фаззификации и дефаззификации. Согласно результатам моделирования нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при обработке задающего воздействия (рисунок 8) можно сделать вывод, что внедрение в СЭУП интеллектуального регулятора, основанного на нечеткой логике, взамен классического аналога позволило добиться некоторого улучшения стабильности протекания процесса - отсутствуют колебания, наблюдаемые на графике обработки угловой скорости с применением классического регулятора. Изменение режимов работы будет приводить при классической настройке к появлению отклонения от заданной величины на 1,94%. При этом внедрение в СЭУП МНЛР позволит существенно снизить влияние изменения параметров технологического процесса на качество переходных характеристик за счет повышения ее адаптивных свойств.



1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%;
4 – МНСУЭП; 5 – МНСУЭП +15%; 6 – МНСУЭП -15%

Рисунок 8 – Реакция классической системы и нечеткой системы управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим «выше номинальной скорости» при обработке входного воздействия

Четвертая глава посвящена разработке МНСУЭП переменного тока на основе ранее сформулированного подхода. Выбор объекта управления обусловлен тем, что для частотно-регулируемого электропривода переменного тока характерно наличие значительного количества нелинейностей, более высокий порядок математического описания модели, а также значительное количество перекрестных связей. Реализация нечеткой СУЭП базировалась на использовании математической модели системы управления частотно-регулируемым электроприводом переменного тока, широко освещенного в технической литературе.

В основу ИСУЭП заложен МНЛР, построенный на базе предложенной методики. Основным отличием при настройке НЛР системы электропривода переменного тока от регулятора системы электропривода постоянного является изменение диапазона распределения функций принадлежности в блоке фаззификации, что будет влиять на точность системы, при этом реализация алгоритмов управления не усложняется.

Синтезированная схема управления электроприводом переменного тока, полученная путем замены классического регулятора в контуре скорости на МНЛР, приведена на рисунке 9. Классическая структура векторного управления содержит большое количество подблоков произведения, а также нелинейностей, связанных с ограничением текущих параметров, кроме того, сама структура также является сугубо нелинейной. Исследование динамических характеристик осуществляется относительно отклонения от выбранной рабочей

точки. Внедрение в такую систему МНЛР позволяет расширить зону влияния нелинейностей на динамику переходных процессов СЭУП.

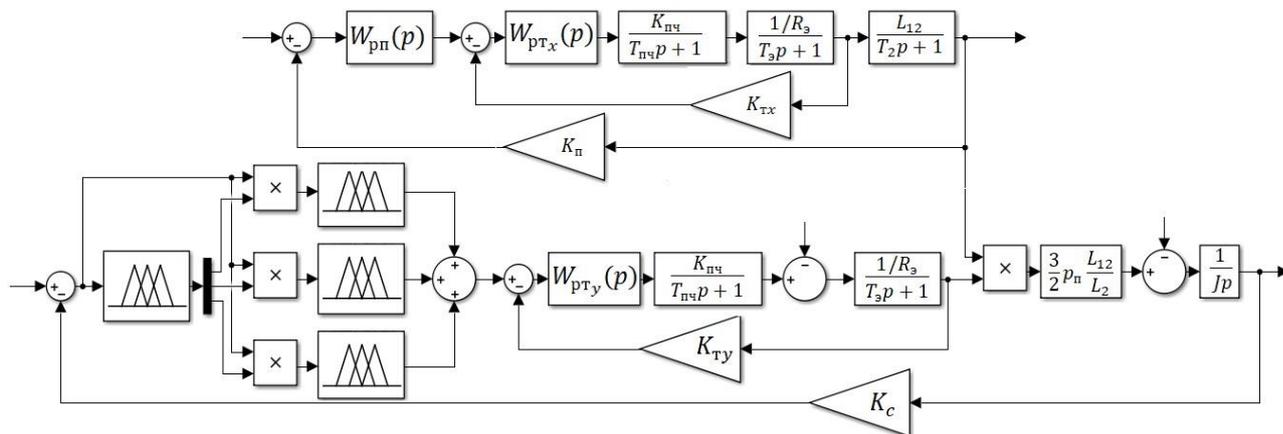
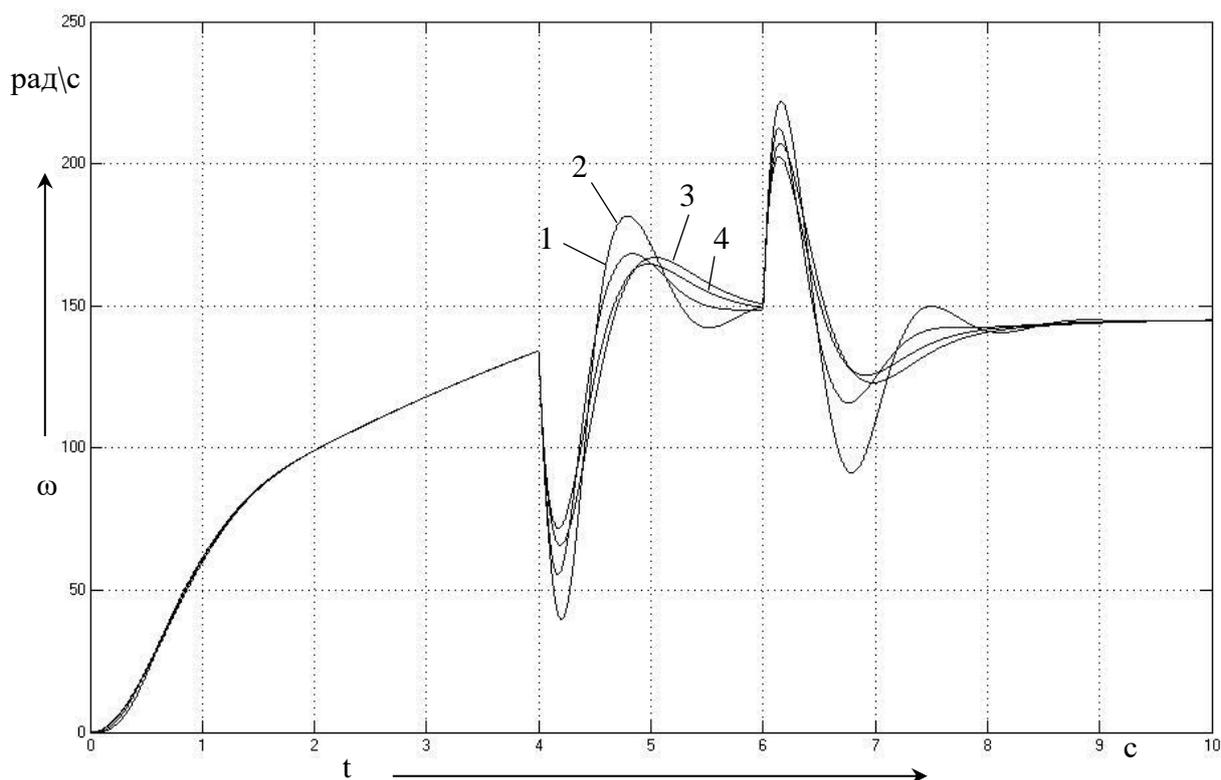


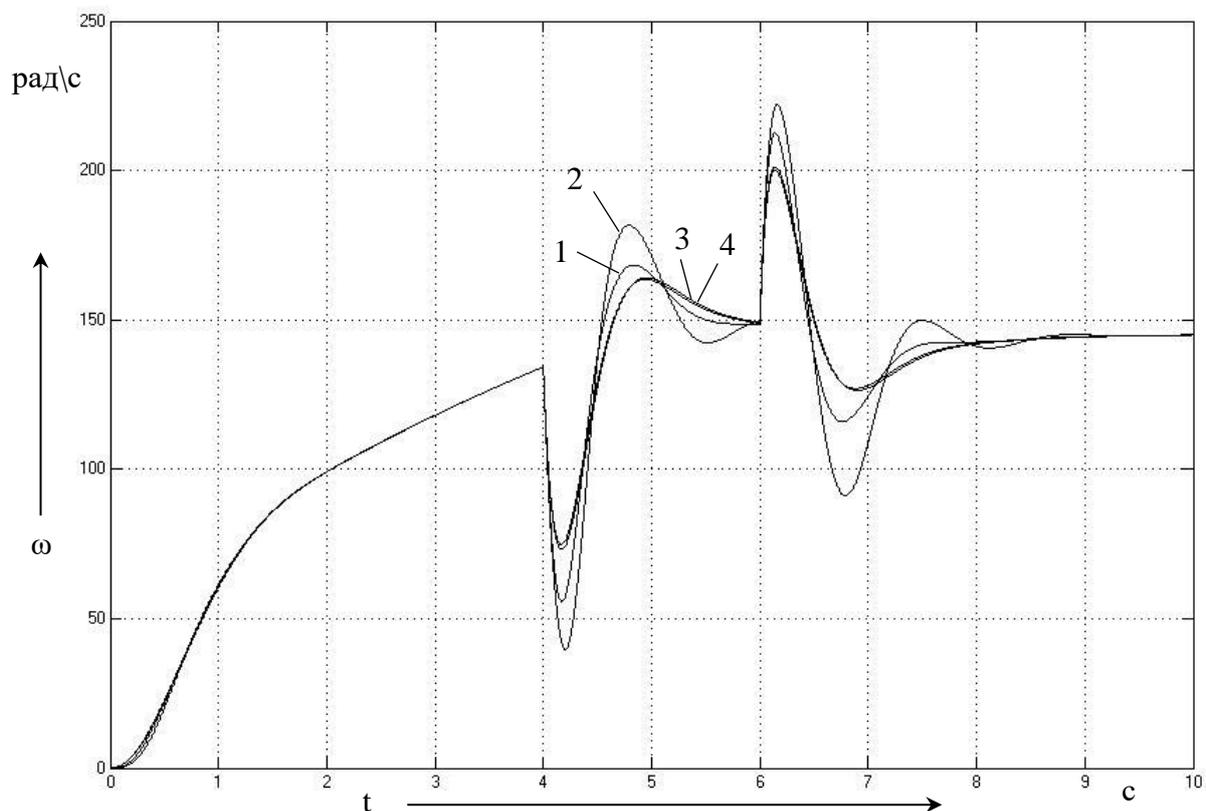
Рисунок 9 - Структурная схема МНСУЭП переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

На рисунках 10 и 11 приведены результаты исследования МНСУЭП переменного тока для различных режимов работы: разгона, скачкообразного отклонения возмущающего воздействия в положительную и отрицательную сторону и вариации одного из внутренних параметров.



1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СЭУП с измененным значением потокосцепления;
3 – МНСУЭП; 4 – МНСУЭП с измененным значением потокосцепления

Рисунок 10 - График переходного процесса классической и многокаскадной нечеткой СУЭП переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани



1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СЭУП с измененным значением потокоосцепления; 3 – МНСУЭП; 4 – МНСУЭП с измененным значением потокоосцепления
 Рисунок 11 - График переходного процесса классической и многокаскадной нечеткой СУЭП переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани

Синтез параметров регуляторов тока, потокоосцепления осуществляется, опираясь на нормальный режим работы электропривода, и рассчитанные значения отвечают, как правило, номинальному режиму работы. В переходных режимах различная инерционность контуров тока, потокоосцепления, скорости будет приводить к отклонению параметров электропривода от номинальных значений. Оценка отклонения выходных параметров модели электропривода от номинального режима проводилась путем изменения расчетного значения величины потокоосцепления, при этом ИСУЭП с МНЛР проявила способности компенсации изменения такого базового параметра электропривода.

Таким образом, синтез многокаскадных нечетких алгоритмов по предложенной методике и исследование систем управления электроприводами переменного тока продемонстрировали, что данный подход менее чувствителен к неполноте математического описания, кроме того позволяет улучшить основные показатели качества, расширяет функциональные возможности управления электроприводами и придает некоторые свойства интеллектуальности таким СЭУП. Анализ переходных характеристик, полученных в результате моделирования СЭУП с использованием МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани позволяет сделать вывод, что синтезированная система электропривода по сравнению с классической характеризуется рядом преимуществ: нечувствительна к изменению внутренних параметров, имеет сравнительно бо-

лее высокое быстродействие и меньшее количество колебаний при обработке возмущений.

Несмотря на функциональную сложность электропривода переменного тока, применение МНЛР позволяет получить адаптированные переходные характеристики. При этом более высокое качество адаптации СУЭП проявляет регулятор с механизмом вывода Мамдани во внешнем каскаде. Это объясняется отсутствием ограничивающего фактора полиномиальных зависимостей в выходных лингвистических переменных алгоритма нечеткого вывода Сугено. Такая технология внедрения МНЛР в системы управления электроприводами переменного тока позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы. Главным достоинством СУЭП с мягкими вычислениями является ее гибкость и способность к адаптации к ряду внешних и внутренних воздействий.

В пятой главе представлены результаты реализации МНСУЭП переменного тока на стандартном наборе технологического оборудования (рисунок 12). Эксперимент направлен на оценку возможности применения разработанной двухкаскадной нечеткой системы сервоприводом на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами (PMSM) в условиях высокоскоростного режима работы и требований к прецизионному позиционированию.

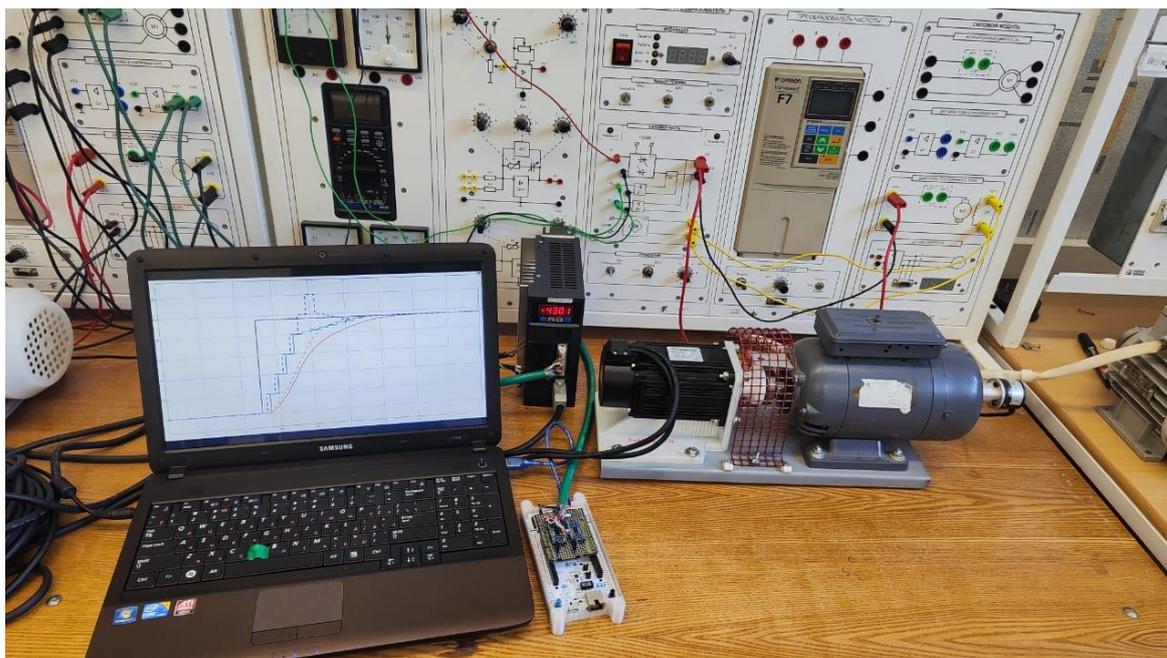
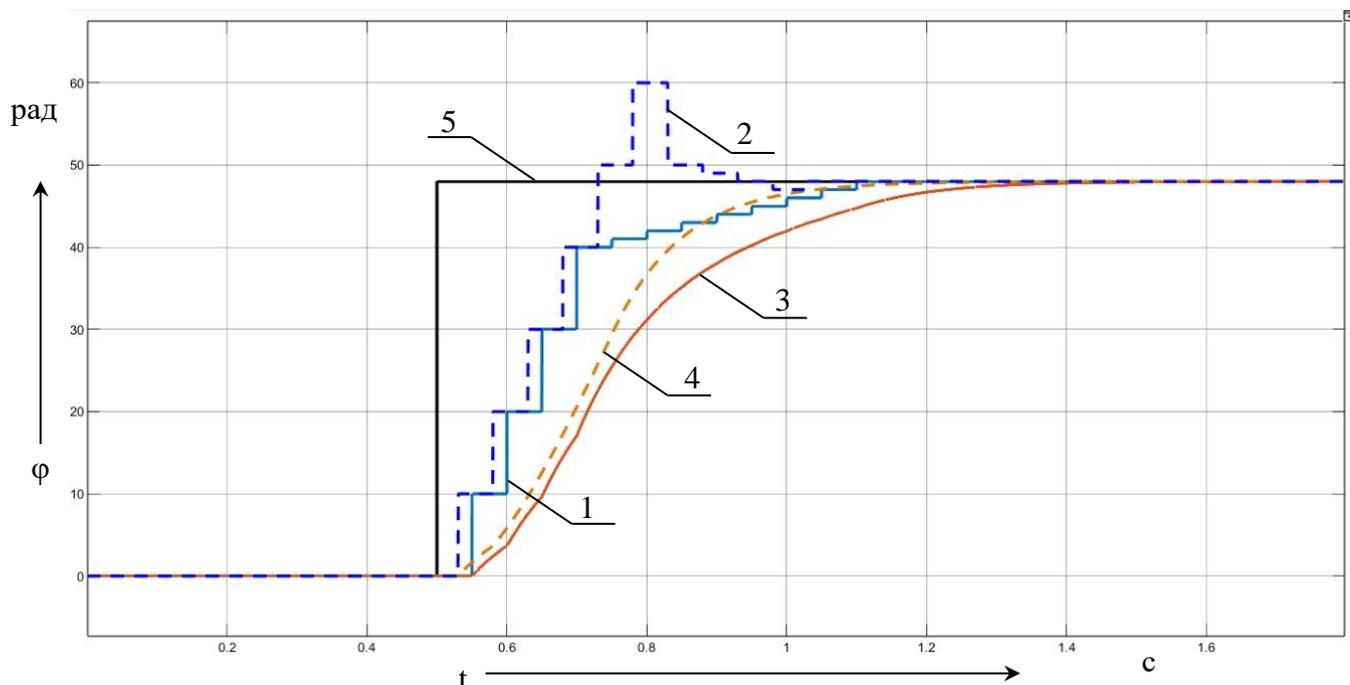


Рисунок 12 - Внешний вид экспериментальной установки

Комплекс представляет собой следующий набор аппаратных средств: сервопривод PMSM мощностью 0,75 кВт с номинальной скоростью 3000 об/мин, сервопреобразователь с номинальным током 3А, инкрементальный энкодер разрешением 2500 импульсов на оборот с возможностью программного переключения множителя (x1, x10), отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F7 с ограничением частоты входных-выходных сигналов 20 Гц, а также нагрузочную машину с регулируемым моментом. Экспериментальные

зависимости импульсных сигналов задания и изменения положения угла поворота электропривода представлены на рисунке 13.



1 – сигнал управления по положению сервопривода в классической СЭУП, 2 – сигнал управления по положению сервопривода в МНСУЭП, 3 – переходная характеристика по положению в классической СЭУП, 4 – переходная характеристика по положению в МНСУЭП, 5 – сигнал задания
Рисунок 13 – Переходный процесс по положению в СУЭП

МНЛР представляет собой иерархическую структуру, формирующую два закона регулирования: настройка одного из модулей вложенного каскада на позиционный режим, а другого, соответственно на скоростной. Нечеткий модуль внешнего каскада осуществляет принятие решений об изменении необходимого режима в зависимости от внешних условий.

Анализ результатов, представленных на рисунке 13, показал, что применение МНСУЭП позволило повысить динамику и снизить влияние пульсаций входных сигналов на форму переходных характеристик в различных режимах позиционирования. Результаты эксперимента показали возможность практической реализации МНСУЭП на типовой элементной базе, а также их достаточно высокое качество процедур управления, формируемых ими. Интеллектуальная система существенно снизила влияние пульсаций сигнала задания как на этапе разгона электропривода при больших перемещениях, так и в момент перехода к более точному позиционированию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке новых алгоритмов нечеткого управления системами электроприводов постоянного и переменного тока. Решена актуальная научно-техническая задача, направленная на повышение интеллектуальных свойств нечетких регуляторов в электроприводах путем реализации вложенных иерархических структур, построенных по каскадному

принципу. Результаты, полученные в рамках работы, основаны на едином подходе синтеза параметров внешнего и внутреннего каскадов МНЛР. Желаемые показатели регулирования в электроприводах постоянного и переменного тока достигнуты за счет гибкого расширения структуры интеллектуальной системы, а также за счет снижения алгоритмической сложности настроек регуляторов, входящих в ее структуру.

В результате исследования получены следующие научные и практические результаты:

1. Получена математическая модель многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом, которая позволяет учитывать выбор сочетания различных механизмов вывода на основании особенностей функционирования технологического процесса.

2. Предложены аналитические выражения, позволяющие выявить особенности построения нечетких систем на основании выбранного алгоритма вывода внешнего каскада.

3. Разработана имитационная модель многокаскадной нечеткой системы управления электроприводами постоянного и переменного тока, позволяющая учесть факторы внутреннего и внешнего характера технологического процесса и использующая структурные особенности соединения каскадов, функционирующих на основе различных алгоритмов нечеткого логического вывода.

4. Разработана методика синтеза многокаскадного нечеткого логического регулятора системой электропривода с различной наполняемостью его внутренней структуры, обеспечивающая достижения желаемых показателей качества регулирования с учетом особенностей и режимов функционирования систем электроприводов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 Бузикаева, А. В. Моделирование интеллектуальной системы управления электроприводом в условиях действия различных критериев / А. В. Бузикаева // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2024. – № 4(41). – С. 11-19. – EDN FTJUIO.

2 Бузикаева, А. В. Согласованное управление электроприводами типа мотор-колесо с применением теории нечетких множеств / М.А. Лямин, А.В. Бузикаева, С.П. Черный, С.А. Пячин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – №2. – С. 15-29. (ВАК, К2)

Публикации в международных наукометрических базах цитирований:

3 Buzikaeva, A.V. Modeling Multi-Cascade Fuzzy Controller with Integrated Implementation of Various Control Laws / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva,

V.I. Susdorf // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. С. 45-48. (Scopus)

4 Buzikaeva, A. Advanced Fuzzy Logic Control System Electrically Driven With Dual-Zone Speed Regulation / Alina Buzikaeva, Sergey Cherniy, Ruslan Bazhenov, Elena Lavrushina, Tatiana Gorbunova, Irina Ledovskikh // AIP Conference Proceedings 2700, 040033 (2023), doi.org/10.1063/5.0125133. (Scopus)

5 Buzikaeva, A.V. Algorithm of fuzzy controller membership function allocation at fuzzification stage / A.V. Buzikayeva, S.P. Cherniy, S.A. Vasilchenko, V.I. Susdorf // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Т. 200. С. 117-125. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_13. (WOS)

6 Buzikaeva, A.V. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / A.V. Buzikayeva, S.P. Cherniy, V.N. Khrulkov, V.I. Susdorf // EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19. DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496. (Scopus)

7 Buzikaeva, A.V. Intelligent control system for the complex of ultrasonic gas-oxygen burners / A.V. Buzikaeva, S.P. Cherniy, V.A. Solovyev, D.V. Urasov // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Т. 200. С. 106-116. DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_12. (WOS)

8 Buzikaeva, A.V. A Model of Multi-Cascade Fuzzy Logic Controller Implemented Using Different Variations of Inference Algorithms / A.V. Buzikayeva, S.P. Cherniy, A.S. Gudim // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). (Scopus)

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

9 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022664286. Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде для формирования процедур управления мобильной пиролизной установкой / Черный С.П., Бузикаева А.В., Емельянов К.А., Тимофеев А.К. // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГУ», дата поступления заявки: 06.07.2022; дата регистрации: 27.07.2022.

10 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022663048 / Программа реализации многокаскадного нечеткого регулятора с механизмом вывода Сугено во внешнем каскаде. Черный С.П., Бузикаева А.В., Емельянов К.А., Сухоруков С.И. // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГУ», дата поступления заявки: 27.06.2022; дата регистрации: 11.07.2022.

11 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680044. Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для электропривода постоянного тока. Черный С.П., Бузикаева А.В., Охотников А.В., Облогин Д.Ю. // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КНАГУ», дата поступления заявки: 17.10.2022; дата регистрации: 26.10.2022.

12 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617229. Программа реализации нечеткого регулятора для системы управления маломощным электроприводом. Бузикаева А.В., Черный С.П., Хрульков В.Н. // Правообладатель: ФГБОУ ВО «КнАГУ», дата поступления заявки: 28.03.2023; дата регистрации: 06.04.2023.

Публикации в других изданиях:

13 Бузикаева, А.В. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С.И. Сухоруков, С.П. Черный, В.А. Соловьев, А.В. Бузикаева // Электротехнические системы и комплексы. 2022, №2 (55). - С. 32-39. (ВАК, К2)

14 Бузикаева, А.В. Разработка интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебедки / А.В. Бузикаева, С.П. Черный, А.К. Тимофеев // Морские интеллектуальные технологии, Научный журнал, № 4 (54), т. 1, 2021. (ESCI, К2)

15 Бузикаева, А.В. Анализ многокаскадных нечётких регуляторов Сугено и Мамдани во внешнем каскаде для систем управления электроприводами переменного тока / А.В. Бузикаева, С.П. Черный // Ученые записки КнАГТУ 2020, № 7(47). – С. 76-84.

16 Бузикаева, А.В. Моделирование нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока на основе векторно-матричного описания / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, Ю.А. Давыдов, А.И. Годяев // Ученые записки КнАГТУ 2023, № 3(67). – С. 35-41.

17 Бузикаева, А.В. Особенности моделирования нечетких систем управления с комбинированным внутренним каскадом / А.В. Бузикаева, С.П. Черный, Э.Д. Енин, А.К. Тимофеев, М.И. Шестаков // Ученые записки КнАГТУ 2020, № I-1(41) «Науки о природе и технике». – С. 73-82.

18 Бузикаева, А.В. Анализ влияния параметров объекта регулирования на коэффициенты полинома в алгоритме вывода Сугено первого порядка / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, М.В. Шевченко, А.К. Тимофеев // Учёные записки КнАГТУ 2019, № II-1(38) «Науки о природе и технике». – С. 21-27.

19 Бузикаева, А.В. Один из подходов к реализации модели нечёткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, С.А. Васильченко, А.С. Гудим, Е.О. Полей // Учёные записки КнАГТУ 2018, Т. 1. № 4 (36). С. 25-32.

20 Бузикаева, А.В. Реализация процедур управления в системе с двухзонным регулированием на основе интеллектуального подхода / А.В. Бузикаева, А.С. Зенченко, В.В. Павлов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы VI Международной научно-практической

конференции молодых ученых. В 2-х частях. Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, 2023. Часть 1. С. 9-11.

21 Бузикаева, А.В. Моделирование интеллектуальной системы управления электроприводом переменного тока с различными алгоритмами вывода во внешнем каскаде / А.В. Бузикаева, С.П. Черный // Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива. Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, посвященной 60-летию кафедры "Системы электроснабжения" и 100-летию плана ГОЭЛРО. Под редакцией И.В. Игнатенко, С.А. Власенко. Хабаровск, 2020. С. 128-132.

22 Бузикаева, А.В. К вопросу применения многокаскадных нечетких систем управления для сложных объектов энергетики / А.В. Бузикаева // XLVII Гагаринские чтения 2021. Сборник тезисов работ XLVII Международной молодежной научной конференции. Москва, 2021. С. 746-747.