

На правах рукописи



Бузикаева Алина Валерьевна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ
МНОГОКАСКАДНЫХ НЕЧЕТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ НА ПРИМЕРЕ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими
процессами и производствами

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2024

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, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

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

Шилин Александр Анатольевич, доктор технических наук, профессор, профессор отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

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

Защита диссертации состоится «29» ноября 2024 г. в 12.00 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://sovnet.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. Интеллектуализация систем автоматического управления технологическими объектами является актуальной проблемой в настоящее время. Общепринятые подходы построения систем управления, базирующихся на нечеткой логике, предоставляют желаемые результаты, когда необходима реализация классических законов управления, например, пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального. Для слабоструктурированных технологических объектов необходима реализация сложных законов регулирования, которые характеризуются набором различных функциональных зависимостей. Формирование процедур управления такими сложными технологическими объектами 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 обосновано и доказано для решения целого ряда задач по управлению. Вместе с тем формализация таких объектов управления 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 (МНСУ). 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 единого интеллектуального управляющего модуля для сложных систем автоматизации позволит реализовывать подобную методику управления для целого класса таких объектов в условиях существенного влияния негативных факторов (неполнота и противоречивость исходных данных, нелинейность и наличие взаимосвязей между координатами).

Диссертационное исследование выполнено на основе работ как российских, так и зарубежных ученых, которые посвящены вопросам в области управления технологическими процессами с применением теории нечетких

множеств: Поспелов Д.А., Власов К.П., Круглов В.И., Терехов В.А., Zadeh L.A., Mamdani E.A., Sugeno M., Takagi T. Но, несмотря на обширные исследования, многие вопросы, которые связаны с особенностями функционирования объекта управления, неполнотой информационной составляющей, увеличением алгоритмической сложности объекта регулирования, а также алгоритмами повышения интеллектуальных возможностей и упрощения реализации стандартными средствами, остаются открытыми.

Цель диссертации. Разработка подхода, позволяющего синтезировать МНСУ сложными технологическими объектами и обеспечивающего достижение желаемых показателей качества при учете существенных ограничений и неполноты информации. В рамках работы реализация подхода рассматривается на примере системы управления электроприводами постоянного и переменного тока.

Задачи диссертации.

1. Разработка математического описания МНСУ с учетом различных возмущающих факторов внутреннего и внешнего характера, обусловленных нестационарностью объекта управления.

2. Синтез и исследование различных моделей МНСУ и формируемых ими сложных законов управления с учетом существенных нелинейностей в различных режимах работы объекта регулирования.

3. Реализация методики, позволяющей моделировать МНСУ в зависимости от особенностей функционирования объекта регулирования, а также с учетом различной наполняемости внутренней структуры МНЛР.

Научная новизна:

- предложен новый подход построения МНЛР, обеспечивающий улучшение основных показателей качества управления технологическим процессом;

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

- разработаны алгоритмы многокаскадного управления технологическими объектами с учетом особенностей их функционирования;

- предложены структуры комбинированных ЛР, сочетающие в себе различные механизмы выводов и обеспечивающие улучшение требуемых показателей качества переходного процесса.

Объектом исследования является МНЛР с сочетанием различных механизмов вывода, реализующий процедуры управления технологическими объектами на примере электроприводов постоянного и переменного тока с

учетом их специфических свойств.

Предметом исследования являются процедуры и законы управления, реализуемые интеллектуальной системой автоматического регулирования.

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 МНСУ, позволяющая учесть влияния сочетания алгоритмов нечетких выводов на качество основных показателей регулирования.

2. Имитационные модели МНСУ и формируемые ими сложные законы управления, учитывающие существенные нелинейности в различных режимах работы объекта регулирования.

3. Алгоритмы управления, позволяющие реализовать методики моделирования МНСУ в зависимости от особенностей функционирования объекта регулирования и учета различной наполняемости внутренней структуры МНЛР.

Практическая значимость работы:

- разработка математического описания сложной МНСУ, учитывающей внутренние и внешние факторы;

- реализация различных моделей электроприводов постоянного и переменного тока при многокаскадных принципах регулирования и формируемых ими сложных законов управления;

- разработка интеллектуальной системы двухзонного регулирования, обеспечивающего автоматический переход между зонами без потери показателей качества управления.

Соответствие паспорту специальности. Тематика исследования, проводимого в рамках диссертационной работы, соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.3.3: 4. теоретические основы и методы моделирования, формализованного описания, оптимального проектирования и управления технологическими процессами и производствами; 5. научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами; 6. научные основы и методы построения интеллектуальных систем управления технологическими процессами и производствами.

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 «UralCon» (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-практической конференции 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 внедрены на Комсомольской дистанции электроснабжения Дальневосточной

дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД», что подкреплено актом внедрения. Кроме того результаты работы в виде полученных алгоритмов многокаскадного управления технологическими объектами 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».

Публикации. Основные результаты диссертационной работы представлены в 20 научных работах, в том числе 7 статей из перечня, рекомендованного ВАК РФ, 6 статей, представленных в международных наукометрических базах цитирований, 4 свидетельств о регистрации ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Основная часть работы содержит 124 страницы, 9 таблиц и 60 рисунков. 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 технологическим объектам управления, которые характеризуются нестационарностью и неполнотой априорной информации.

В первой главе проведен анализ различных методов интеллектуального управления технологическими процессами, 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 сложными технологическими объектами. Проанализированы основные пути развития нечетких систем управления, ориентированных на индивидуальные качества объектов регулирования.

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 системы управления электроприводом постоянного тока путем замены классического регулятора положения на нечеткий логический регулятор 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 управления, использующих ПИД-закон. Однако использование стандартных моделей нечетких систем представляется ограниченным вследствие отсутствия возможности перенастройки законов управления в условиях существенного изменения режимов работы системы регулирования. Кроме того повышение точности математического описания объекта регулирования 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 переключающим устройством, а вложенный каскад состоит из набора нечетких модулей, позволяющих переключать режимы работы.

Механизм вывода нечеткого логического регулятора независимо от выбранного алгоритма протекает по стандартной схеме за конечное число этапов. Тогда для этапа фазификации 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 антецедента 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, который может быть записан в виде полинома:

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

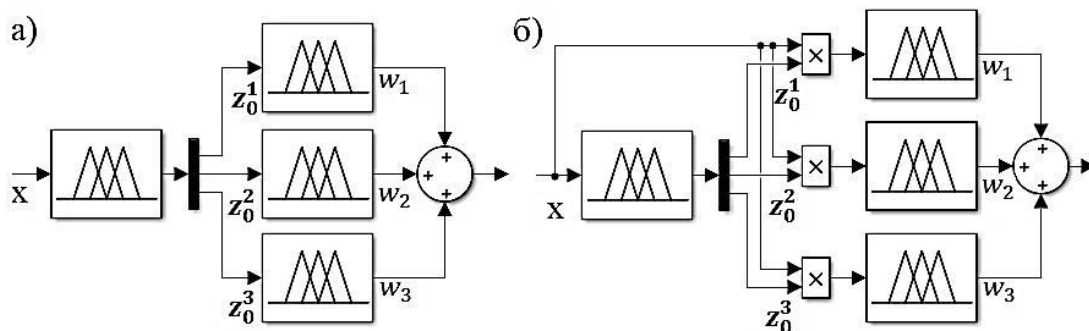


Рисунок 1 – Структурная схема МНЛР

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 нечеткого логического регулятора 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 интеллектуальной системы управления осуществляется путем введения в нее интеллектуального переключающего устройства, состоящего из одного нечеткого логического регулятора 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 МНСУ электроприводом постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани (рисунок 2).

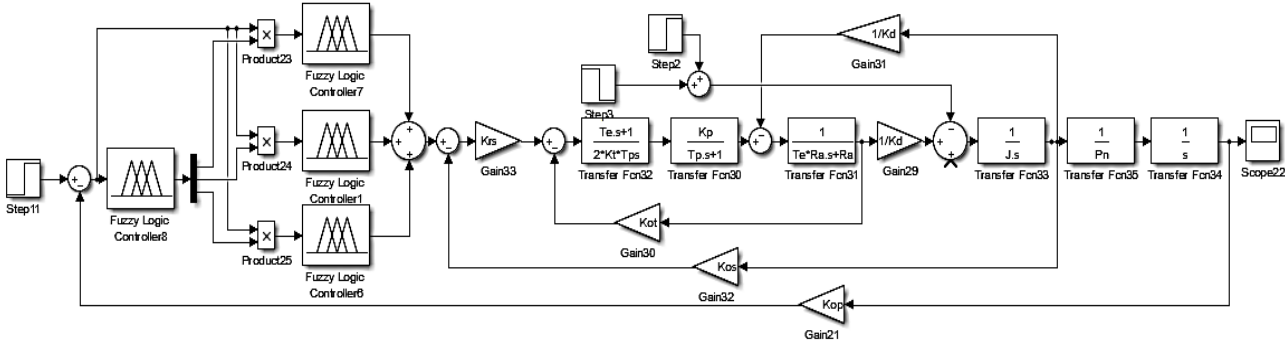
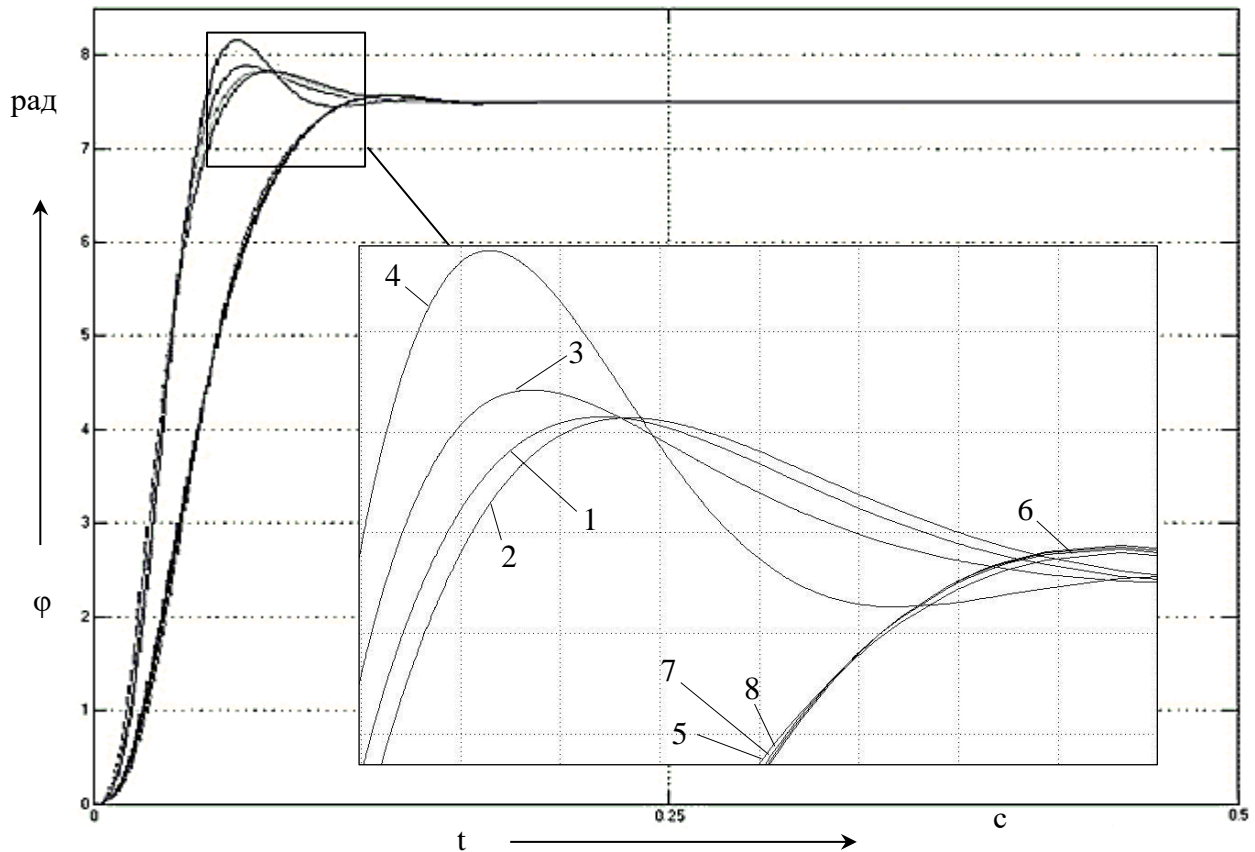


Рисунок 2 – Имитационная модель МНСУ позиционирования на базе электропривода постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

Анализ эффективности работы МНСУ осуществлялся по оценке реакции системы на нестационарность параметров тиристорного преобразователя при изменении его коэффициентов в диапазоне от -30% до 15% от номинального значения. В результате моделирования были получены переходные характеристики, анализ которых позволяет сделать вывод, что МНСУ проявляет робастные свойства по отношению к внутренним возмущениям, связанным с нестационарностью параметров объекта регулирования (рисунок 3).

Необходимо отметить, что выбор предложенного сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода обусловлен, прежде всего, простотой настройки блоков дефазификации и упрощением базы правил, а, следовательно, и существенным сокращением вычислительных затрат, кроме того предлагаемый подход обеспечивает более гибкую настройку системы.



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

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

Дальнейший ход исследования предложенного подхода сводился к замене алгоритма нечеткого логического вывода во внешнем каскаде и синтезу имитационной модели МНСУ позиционирования на базе электропривода постоянного тока (рисунок 4). Результаты моделирования МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани приведены на рисунке 5.

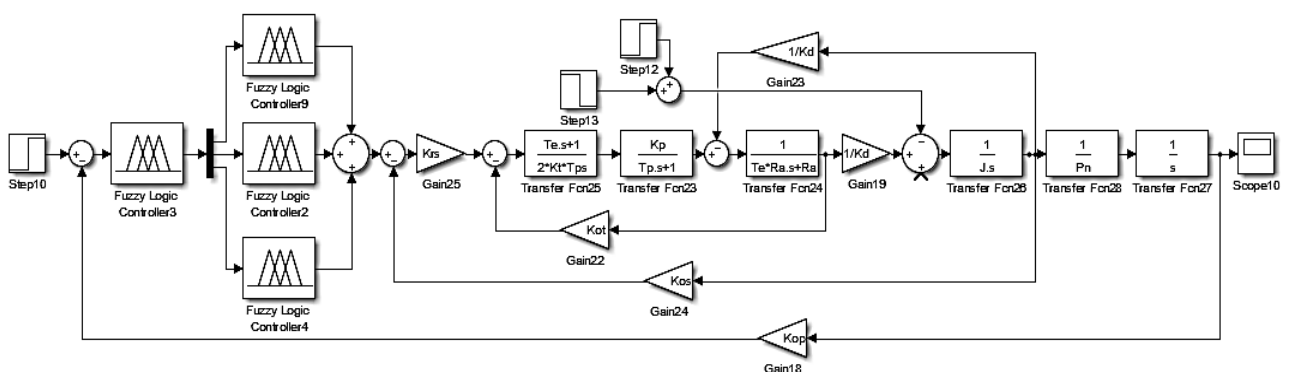
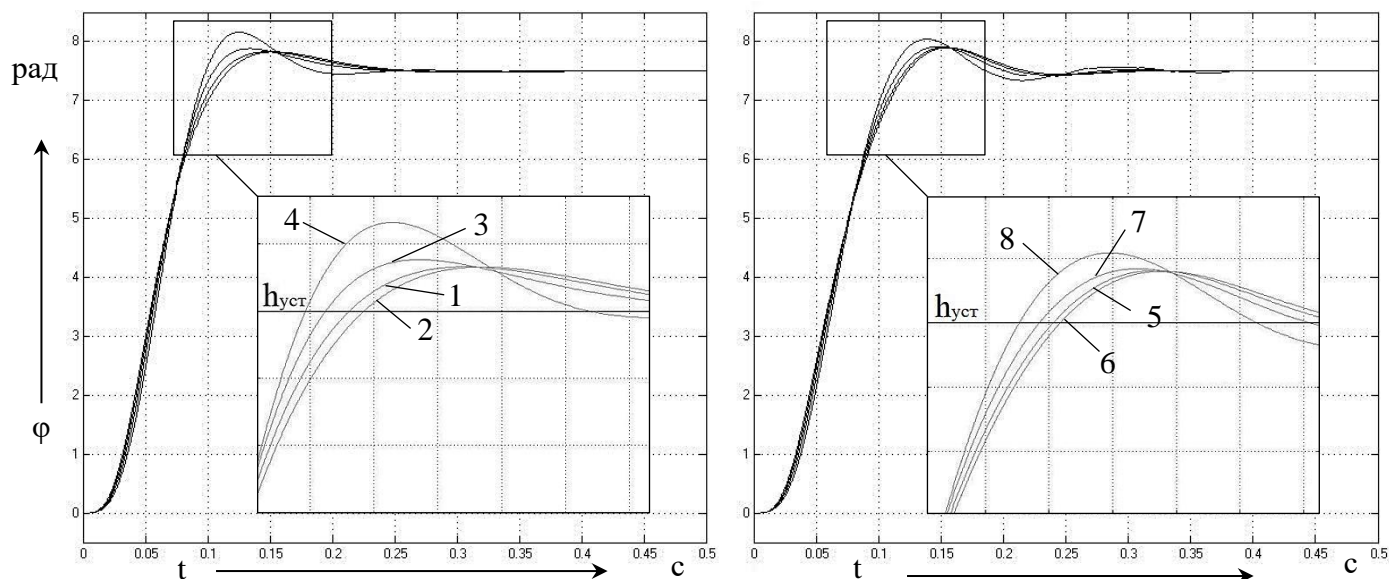


Рисунок 4 – Структурная схема МНСУ электроприводом постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани



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

Рисунок 5 – График переходного процесса МНСУ электроприводом постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани

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

Третья глава посвящена разработке МНСУ электроприводом 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 системы управления базировалась на использовании математической модели системы управления частотно-регулируемым электроприводом переменного тока, широко освещенного в технической литературе.

В основу интеллектуальной системы управления заложен МНЛР, построенный на базе предложенной методики. Основным отличием при настройке нечеткого регулятора 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 не усложняется реализация алгоритмов управления.

Синтезированная схема управления электроприводом переменного тока, полученная путем замены классического регулятора в контуре скорости на МНЛР, приведена на рисунке 6. Классическая структура векторного управления содержит большое количество нелинейностей и 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 системы управления.

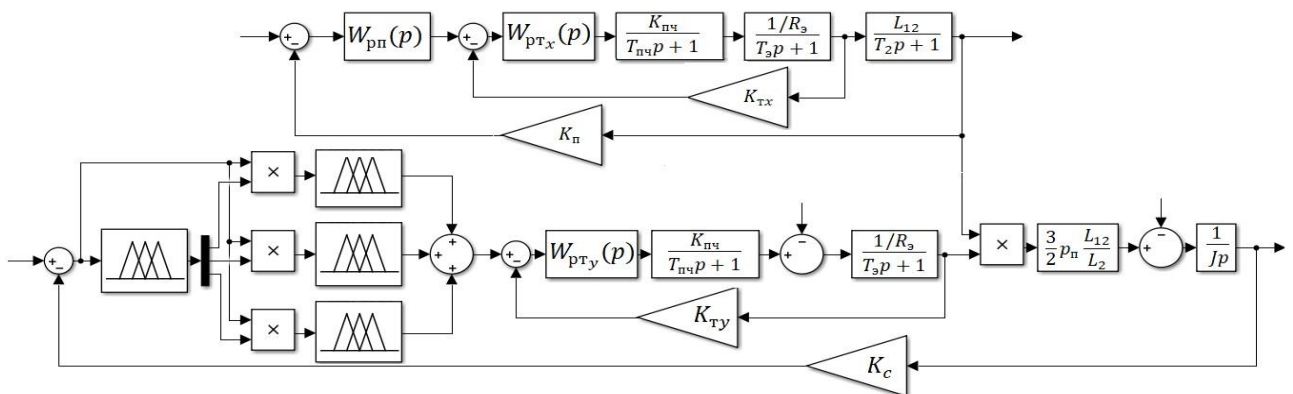


Рисунок 6 - Структурная схема МНСУ электроприводом переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

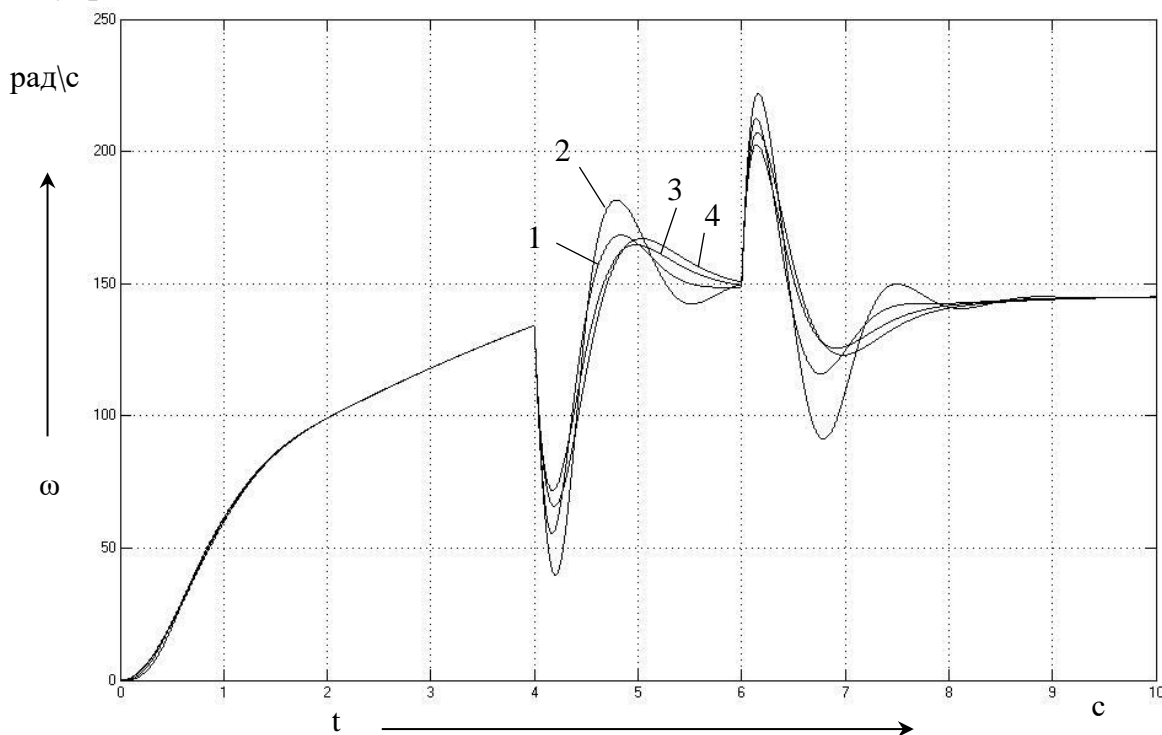
На рисунках 7 и 8 приведены результаты исследования МНСУ для различных режимов работы: разгона, скачкообразного отклонения возмущающего воздействия в положительную и отрицательную сторону и вариации одного из внутренних параметров.

Синтез параметров регуляторов тока, потокосцепления осуществляется, опираясь на нормальный режим работы электропривода, и рассчитанные значения отвечают, как правило, номинальному режиму работы. В переходных режимах различная инерционность контуров тока, потокосцепления, 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 потокосцепления, при этом интеллектуальная система 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 объекта регулирования, позволяет

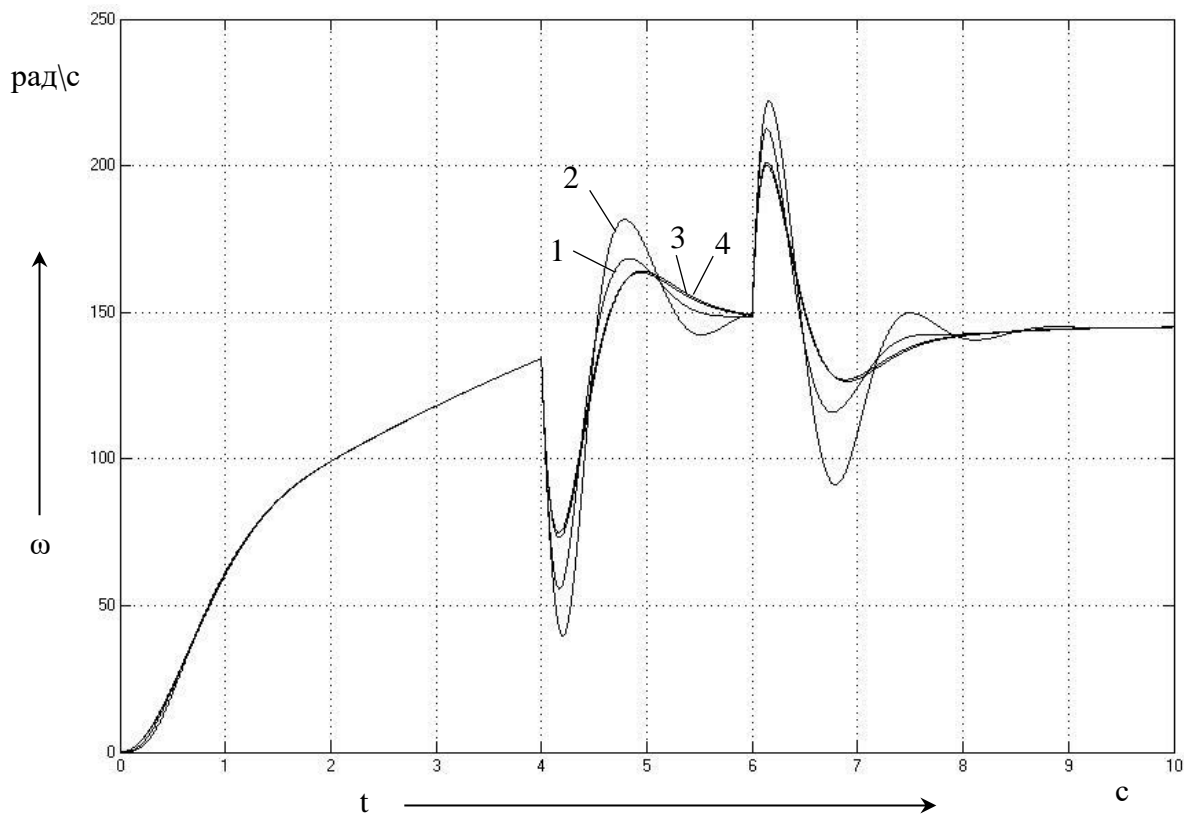
улучшить основные показатели качества, расширяет функциональные возможности управления электроприводами и придает некоторые свойства интеллектуальности таким системам. Анализ переходных характеристик, полученных в результате моделирования сложной системы управления с использованием МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани позволяет сделать вывод, что синтезированная система по сравнению с классической характеризуется рядом преимуществ: нечувствительна к изменению внутренних параметров, имеет сравнительно более высокое быстродействие и меньшее количество колебаний при отработке возмущений.

Несмотря на функциональную сложность такого объекта регулирования, как электропривод переменного тока, применение МНЛР позволяет получить адаптированные переходные характеристики. При этом более высокое качество адаптации системы управления 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 системы управления с мягкими вычислениями является ее гибкость и способность к адаптации к ряду внешних и внутренних воздействий.



1 – классическая система; 2 – классическая система с измененным значением потокосцепления; 3 – МНСУ; 4 – МНСУ с измененным значением потокосцепления

Рисунок 7 - График переходного процесса МНСУ электроприводом переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани



1 – классическая система; 2 – классическая система с измененным значением потокосцепления; 3 – МНСУ; 4 – МНСУ с измененным значением потокосцепления
 Рисунок 8 - График переходного процесса МНСУ электроприводом переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани

Четвертая глава посвящена исследованию интеллектуальной системы управления электроприводом 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 системы приведена на рисунке 9.

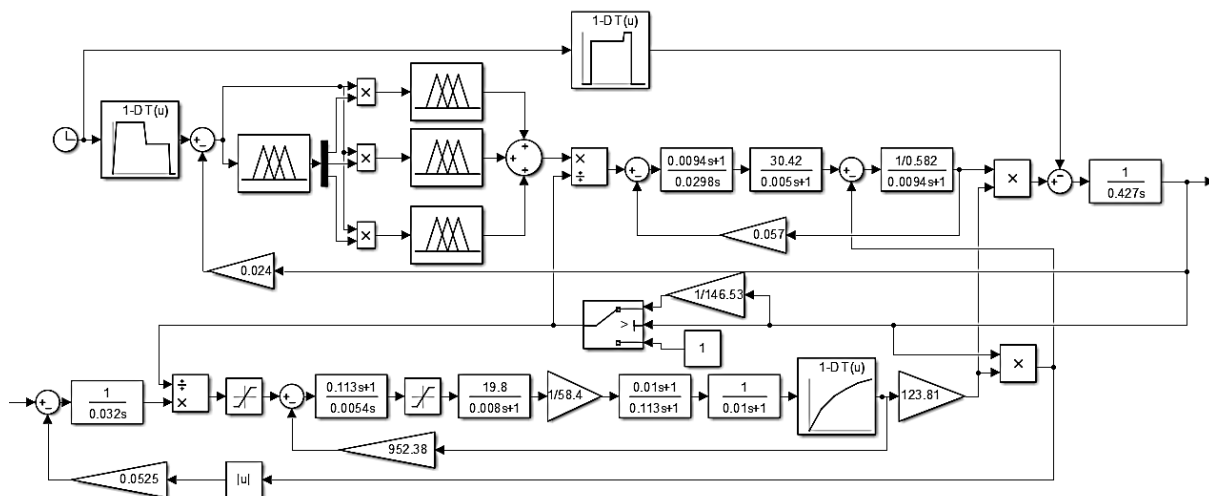


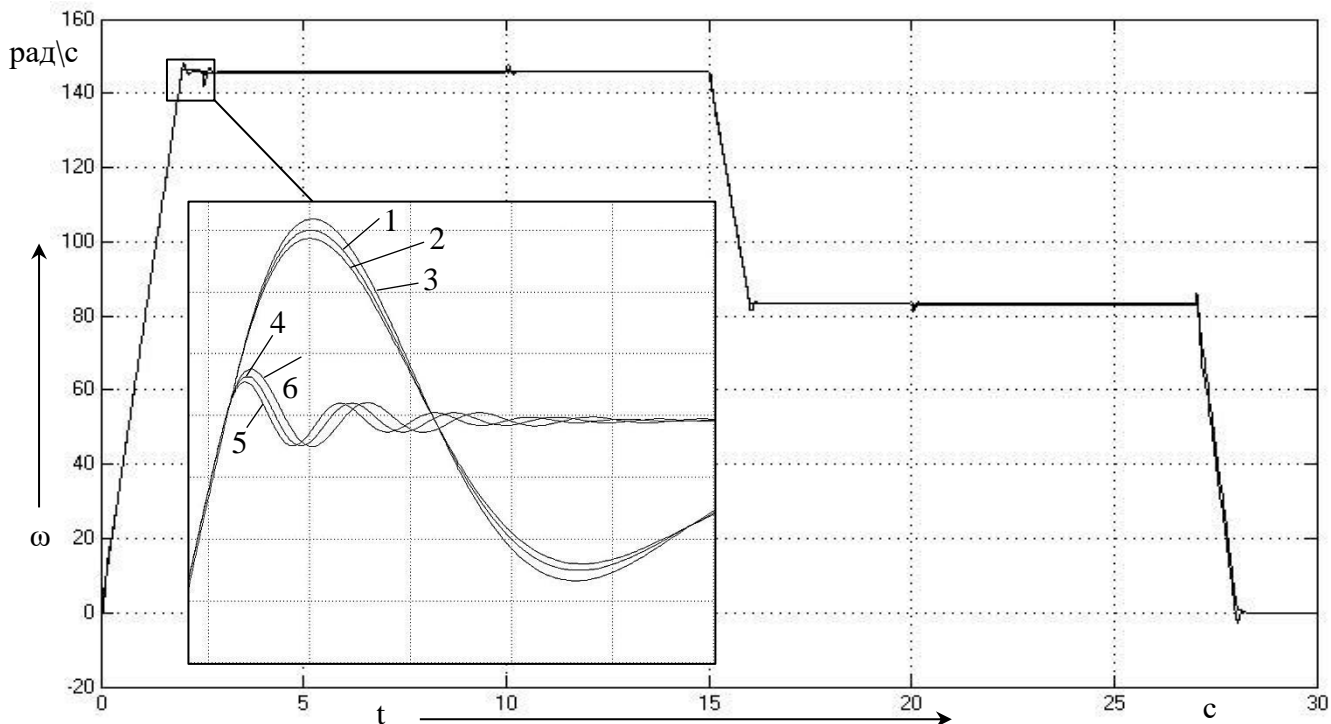
Рисунок 9 - Структурная схема МНСУ электроприводом постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

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 объекта: внешний каскад МНЛР реализуется как классификатор, оценивающий входную информацию и осуществляющий выбор соответствующего элемента вложенного каскада, который формирует итоговое управляющее воздействие МНЛР.

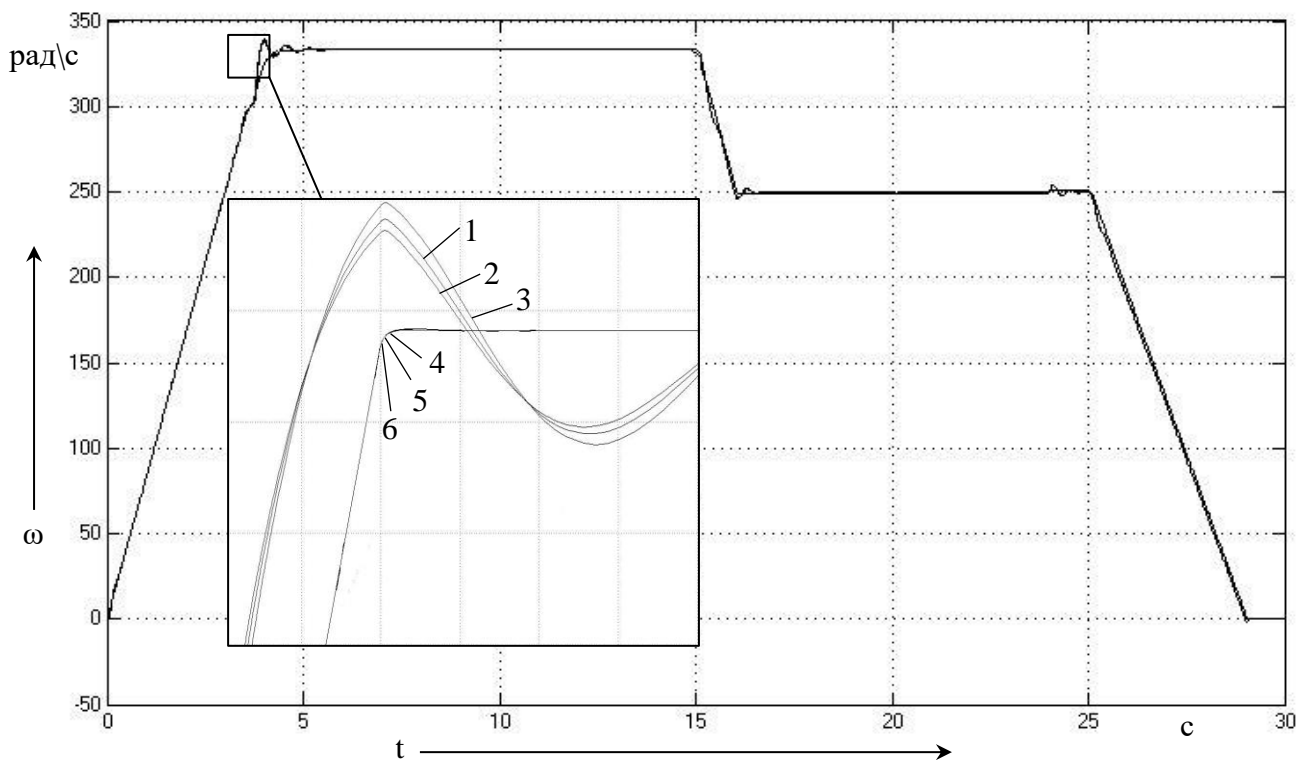
Синтез интеллектуальной системы управления двухзонным регулированием скорости основан на применении МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани. Исследование работоспособности системы управления проводилось путем анализа реакции системы на отработку управляющего сигнала сложной формы при резко 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 МНСУ.

Результаты реакции моделей классической и нечеткой систем управления электропривода с двухзонным регулированием скорости на отработку задающего воздействия режима «до номинальной скорости» приведены на рисунке 10. Исходя из представленных результатов моделирования, можно сделать вывод, что полученная интеллектуальная система двухзонного регулирования обладает некоторыми преимуществами по быстродействию и перерегулированию относительно классического варианта.



1 – классическая система; 2 – классическая система +15%; 3 – классическая система -15%;
 4 – МНСУ; 5 – МНСУ +15%; 6 – МНСУ -15%

Рисунок 10 – Реакция классической системы и нечеткой системы управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим «до номинальной скорости» при отработке входного воздействия



1 – классическая система; 2 – классическая система +15%; 3 – классическая система -15%;
 4 – МНСУ; 5 – МНСУ +15%; 6 – МНСУ -15%

Рисунок 11 – Реакция классической системы и нечеткой системы управления с двухкаскадным регулятором скорости, настроенных на режим «выше номинальной скорости» при отработке входного воздействия

Реализация нечеткого закона управления в рассматриваемой системе 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 11) можно сделать вывод, что внедрение в систему интеллектуального регулятора, основанного на нечеткой логике, взамен классического аналога позволило добиться некоторого улучшения стабильности протекания процесса - отсутствуют колебания, наблюдаемые на графике отработки 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 систему управления МНЛР позволит существенно снизить влияние изменения параметров объектов регулирования на качество переходных характеристик за счет повышения ее адаптивных свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке нового принципа построения нечетких систем управления сложными технологическими объектами. Решена актуальная научно-техническая задача, направленная на повышение интеллектуальных свойств нечетких регуляторов 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 технологическим процессом 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 развитой многокаскадной нечеткой системы управления с учетом различных механизмов вывода. Предложенные аналитические выражения позволяют выявить особенности построения развитых нечетких систем на основании выбранного алгоритма вывода внешнего каскада.

2. Реализована имитационная модель многокаскадной нечеткой системы управления сложным объектом автоматизации, позволяющая учесть факторы внутреннего и внешнего характера, а также структурные особенности соединения каскадов, функционирующих на основе различных алгоритмов

нечеткого логического вывода.

3. Разработана методика синтеза многокаскадного нечеткого логического регулятора с различной наполняемостью его внутренней структуры, обеспечивающая достижения желаемых показателей качества регулирования с учетом особенностей и режимов функционирования объекта управления. Разработанные алгоритмы управления, реализуемые многокаскадным нечетким логическим регулятором для нелинейных объектов управления, продемонстрировали высокие показатели качества динамических характеристик системы независимо от режима работы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1 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)

2 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)

3 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.

4 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.

5 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.

6 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.

7 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.

Публикации в международных наукометрических базах цитирований:

1 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)

2 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)

3 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)

4 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)

5 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)

6 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:

1 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.

2 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.

3 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.

4 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:

1 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.

2 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.

3 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 молодёжной научной конференции. Москва, 2021. С. 746-747.