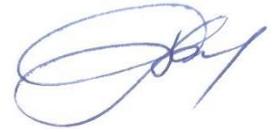


На правах рукописи



ЧЕРНЫЙ СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА РАЗВИТЫХ НЕЧЕТКИХ АЛГОРИТМОВ
В УПРАВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора 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 консультант: **Соловьев Вячеслав Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет».

Официальные оппоненты: **Белов Михаил Петрович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Робототехники и автоматизации производственных систем» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург.

Торгашов Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией систем управления технологическими процессами федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт автоматики и процессов управления» ДВО РАН, г. Владивосток.

Шидловский Станислав Викторович, доктор технических наук, профессор, декан Факультета инновационных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

Защита диссертации состоится «14» июня 2024 г. в 15.00 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 www.knastu.ru

Автореферат разослан « » 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.2.140.02, канд. техн. наук



Гудим Александр Сергеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Все многообразие современных систем управления технологическими процессами и комплексами условно можно разделить на классические, т.е. базирующиеся на традиционных алгоритмах расчета и реализации процедур управления в аналоговом или цифровом виде, либо содержащие элементы искусственного интеллекта, использующие нейронные сети, нечеткую логику и т.п. Применение того или иного подхода чаще всего диктуется степенью формализации самого объекта регулирования. В целом качество математического описания и полнота исходной информации об объекте управления тесно связаны с иерархичностью всей структуры системы регулирования и с повышением уровня в такой структуре существенно усложняется любой формальный подход с учетом взаимодействия ряда соседних подсистем в вертикали. Для локальных систем управления, которым свойственно достаточно точное и адекватное математическое описание и находящихся, иерархически, в нижнем звене общей системы автоматизации технологического процесса реализация процедур управления стандартными средствами является приоритетной. Вместе с тем, при реализации моделей сложных объектов регулирования, характеризующихся многокоординатностью, многосвязностью, многокритериальностью, слабоструктурированностью и существенной неполнотой информации, определение желаемых законов и процедур управления, основанных на типовых расчетах, представляется затруднительным. Одним из возможных направлений разрешения указанного противоречия является путь, связанный с применением искусственного интеллекта. Это направление развития сложных систем управления технологическими процессами подкреплено указом президента Российской Федерации от 10 октября 2019 г. № 490 «О развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации», при этом технологии развития искусственного интеллекта отнесены к приоритетным направлениям развития науки и техники.

Основная масса доступных к изучению работ в области управления технологическими процессами с применением аппарата нечеткой логики, как зарубежных, так и российских сводятся, либо к усовершенствованию основных блоков нечеткого регулятора, либо его проектированию под конкретный сложный объект. При этом необходимо отметить, что в первом случае повышение интеллектуальности системы осуществляется путем введения дополнительных лингвистических переменных, различными трансформациями функций принадлежности, модификациями существующих алгоритмов нечеткого логического вывода. Все обозначенные подходы чаще всего направлены на упрощение процедур вывода и увеличение быстродействия системы в целом. Во втором случае реализация нечеткой системы управления ориентирована на качество формализации сложного объекта регулирования и обеспечение необходимых требований к технологическому процессу. В таких случаях нечеткая система управления направлена на устранение различного рода возмущающих воздействий, компенсацию существенного количества нелинейностей, а также снижение влияния неполноты информации и сокращению числа допущений. В основной массе развитые нечеткие системы управления эволюционируют в сторону повышения

своих интеллектуальных возможностей в направлении внедрения в их структуру нейронных сетей различных типов. Такой нейронечеткий подход, наряду с высокой степенью формализации, обладает существенной сложностью алгоритмов настройки наследованной из математического описания нейронных структур. Повышение же интеллектуальных свойств таких систем зачастую связано с существенным усложнением алгоритмов настройки их отдельных блоков и решением множества дополнительных задач, которые сопряжены с целым рядом проблем, таких как быстроедействие всей системы в целом, возможности контроля ее адекватности на всех этапах функционирования, а также взаимодействием модулей, реализованных с применением различных подходов, основанных на мягких вычислениях.

С учетом этого представляются актуальными разработка и исследование нечетких систем управления с применением регуляторов, построенных на основе мягких вычислений, позволяющих объединить и повысить интеллектуальные возможности нечетких систем управления путем их структурного и функционального объединения в многокаскадные структуры и дающими возможность решать задачу регулирования сложными технологическими процессами в условиях многокритериальности, многозадачности и многокоординатности.

Решение задач по управлению с применением методов нечеткой логики направлено на узкую предметную область, связанную с преодолением неполноты информации, формализацию процессов протекающих на объекте управления с учетом целого ряда ограничений накладываемых на интеллектуальную систему в целом, а также попытках внедрения дополнительных вариативных параметров в классически сформированные основные блоки нечеткого регулятора.

Отсутствие комплексного подхода по созданию развитых нечетких систем управления позволяющих учесть такие особенности технологических процессов как многокритериальность, нестационарность, многокоординатность представляет собой определенную проблему. Поэтому создание теоретической базы для формализованного подхода к описанию многокаскадных нечетких систем, учитывающего как гомогенность, так и гетерогенность структуры, сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода, а также достаточного количества вложенных интеллектуальных модулей, является неотъемлемым условием при построении нечетких систем управления.

Решение поставленной проблемы позволит перейти к набору прикладных задач, связанных с анализом влияния сочетания различных алгоритмов выводов на качество процедур управления сложными объектами, устранение неопределенности и неполноты информации по ряду основных параметров такого объекта, реализация многокритериальности при управлении технологическим процессом на его различных стадиях и режимах функционирования, возможности реализации пространственных функций принадлежности с применением нечеткого многокаскадного регулятора при решении проблем по оптимизации и формализации процессов и процедур управления с учетом многокоординатности, а также вопросов по быстродействию развитых нечетких систем путем вариации наполнения модулей внутреннего каскада и различных структурных решений. Итогом исследования станут расширение теоретических положений по настройке и реализации

многокаскадных нечетких систем для различных сложных объектов автоматизации и практические рекомендации по моделированию и синтезу таких систем, что позволит реализовать сложные алгоритмы и процедуры управления с применением теории нечетких множеств.

Степень разработанности. Особый интерес в обозначенной предметной области вызывают работы целого ряда российских Пospelов Д.А., Круглов В.И., Дли М.И., Батыршин И.З., Осокин М.В., Деменков Н.П., Захаров В.Н., Ульянов С.В., Алиев Р.А., Искандеров Г.М., Малышев Н.Г., Берштейн Л.С., Боженюк А.В., Терехов В.А. Алтунин А.Е., Семухин М.В., Захаров В.Н., и зарубежных: Zadeh L.A., Scharf H., Mandic N., Mamdani E.A., Terano T., Asai K., Sugeno M., Takagi T., Jager R.J., Dubois D., Prade H., Larsen P.M., Elkan C., József Dombi, Abrar Hussain, Maryam Sarhaddi, Mahdi Yaghoobi, Xiaokan Wang, Qiong Wang, Seyed Mohammad Mehdi Abbasi, Aliakbar Jalali, Jiage Huoa, Felix T.S., Carman K.M. Leea, Jan Ola Strandhagenb, Ben Niu ученых. Представленный список авторов и их работы показывают лишь малую часть всех исследований и разработок, связанных с реализацией интеллектуальных систем базирующихся на теории нечетких множеств.

Объект исследований - алгоритмы управления технологическими процессами объектов различной сложности на основе принципа многокаскадного нечеткого регулирования, реализация которого базируется на учете структурных и функциональных особенностей системы управления.

Предмет исследований - процедуры синтеза многокаскадных нечетких систем управления с различными сочетаниями алгоритмов вывода, особенностями реализации модулей во вложенных каскадах, а также особенностями структурного синтеза таких развитых систем в целом.

Цель и задачи работы

Целью диссертационной работы является разработка и исследование комплексного подхода для реализации технологии нечеткого многокаскадного управления сложными технологическими объектами в условиях многокритериальности, многокоординатности, нестационарности, обеспечивающего повышения качества их функционирования.

Для комплексного исследования проблем обозначенных в цели работы необходимо решение следующих *задач*:

1. Анализ существующих подходов в области нечеткого управления сложными технологическими объектами, которые обладают свойствами многокритериальности, нестационарности и многокоординатности, а также определение требований к управляющим процедурам таких систем.

2. Математическое описание многокаскадного нечеткого регулятора, с учетом особенностей функциональной и алгоритмической реализации его структуры.

3. Исследование особенностей функционирования многокаскадной нечеткой системы управления (МНСУ) в зависимости от различных сочетаний алгоритмов выводов.

4. Синтез развитых нечетких систем с учетом особенностей формирования модулей в структуре внутреннего каскада, а именно реализация гомогенного и гетерогенного состава модулей.

5. Математическое и имитационное моделирование нечетких регуляторов с пространственной формой функций принадлежности, отражающих сложные функциональные зависимости ряда параметров объекта регулирования, а также его многокоординатность

6. Реализация процедур управления, с учетом множества критериев, определяющих взаимоисключающие стратегии формирования законов регулирования сложными объектами.

7. Апробация предлагаемой технологии многокаскадного нечеткого управления при изменении состава и вида внутренних модулей при оценке робастных и адаптивных свойств таких систем.

8. Применение полученных теоретических результатов для решения прикладных задач, на примере системы управления электроприводом постоянного тока и регулирования распределения температурных полей в пиролизной установке.

Научная новизна

Научная новизна предлагаемых решений заключается в следующем:

- предложены новые принципы построения многокаскадных нечетких систем, позволяющие значительно упростить процессы настройки, расширить его адаптивные свойства и существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, и отличающиеся иерархичностью и модульностью формирования;
- доказано, что предложенные алгоритмы многокаскадного нечеткого управления позволяют сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность интеллектуальных систем регулирования технологическими процессами, за счет снижения алгоритмической сложности формируемых баз правил интеллектуальных модулей;
- показаны возможности структурной и функциональной реализации нечетких систем управления, характеризующихся пространственной формой реализации функций принадлежности, позволяющей учитывать ряд параметров технологического процесса имеющих лишь косвенную связь;
- разработаны модели и рекомендации по настройке основных блоков развитых нечетких систем с учетом вложенности, гетерогенности и вариации сочетания различных алгоритмов нечетких логических выводов;
- представлены структурные и методологические решения по реализации комплексных подходов для сложных объектов управления, обеспечивающих реализацию процедур управления адаптирующихся к изменению полноты информационного обеспечения, нестационарности и недетерминированности;
- развиты подходы к компенсации различного рода нелинейностей систем регулирования технологическими процессами на основе принципов многокаскадного нечеткого управления.

Соответствие шифру специальности Исследования, представленные в диссертационной работе, соответствуют специальности 2.3.3 Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки), следующим его пунктам: 3. методология, научные основы, средства и технологии построения автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) и производствами (АСУП), а также технической подготовкой производства (АСТПП) и т.д.; 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.

Практическая значимость

Предложена методика настройки многокаскадных нечетких регуляторов для систем управления технологическими процессами, учитывающая, как особенности математического описания систем, так и наличие неоднозначных функциональных связей между координатами системы.

Разработана программно-аппаратная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора (МНЛР) на основе промышленного программируемого контроллера для управления процессом стабилизации скорости электропривода.

Представлены методические рекомендации по совершенствованию нечеткой системы управления процессом пиролиза в мобильной углевыжигательной установке.

Практическая ценность результатов полученных в диссертационном исследовании подтверждаются решением ряда прикладных задач, как под руководством автора, так и при его участии: алгоритмическое и программное обеспечение интеллектуальной системы управления комплексом ультразвуковых газокислородных горелок, а также формализация процессов фильтрации сигналов управления пропорциональным регулятором для электрода клапана в дуговой сталеплавильной печи с применением нечеткого регулирования, (ПАО «Амурсталь»), применение теоретических и практических данных для элементов и алгоритмов интеллектуальных систем управления многозвенными параллельными электроприводами (филиал Публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация» – Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина), анализ возможностей применения и формализация развитых нечетких алгоритмов управления при аппаратной реализации нечеткого логического контроллера и синтез энергоэффективного последовательного управления электроприводом (Амурское ЛПУМГ ООО «Газпром Трансгаз Томск»). Соответствующие акты внедрения прилагаются.

Кроме того полученные алгоритмы, результаты и технические решения, представленные в диссертационном исследовании, применяются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет». Практическая значимость предложенных решений подтверждена научными публикациями.

Методы исследований

Среди основных методов исследования необходимо выделить методы теории нечетких множеств и математического анализа, современной теории автоматического регулирования и методы математического и компьютерного моделирования. Имитационное моделирование проводилось с использованием языка инженерных вычислений.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Принципы построения многокаскадных нечетких систем, позволяющие значительно упростить процессы настройки, расширить его адаптивные свойства и существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора;

2. Алгоритмы многокаскадного нечеткого управления, позволяющие сократить алгоритмическую сложность и информационную избыточность интеллектуальных систем регулирования технологическими процессами;

3. Структурная и функциональная реализация нечетких систем управления с пространственной формой функций принадлежности для технологических процессов, характеризующихся сложной функциональной зависимостью множества параметров;

4. Модели и рекомендации по настройке основных блоков развитых нечетких систем с учетом вложенности, гетерогенности и вариации сочетания различных алгоритмов нечетких логических выводов;

5. Структурные и методологические решения по реализации комплексных подходов для сложных объектов управления, обеспечивающих реализацию процедур управления адаптирующихся к изменению полноты информационного обеспечения, нестационарности и недетерминированности;

6. Развитие подходов к компенсации различного рода нелинейностей систем регулирования технологическими процессами на основе принципов многокаскадного нечеткого управления.

Достоверность и апробация результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается адекватностью полученных моделей, методик и алгоритмов, внедрением предложенных алгоритмов на промышленных предприятиях ОАО «Амурсталь», Филиал Публичного акционерного общества «Объединенная авиастроительная корпорация» – Комсомольский-на-Амуре авиационный завод имени Ю.А. Гагарина, Амурское ЛПУМГ ООО «Газпром Трансгаз Томск» и учебном процессе по профильным направлениям подготовки, соответствием результатов, представленных в работе, с исследованиями российских и зарубежных ученых, а также обсуждением ряда положений работы, представленных на конференциях различного уровня: 8-th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists Modern technique and technologies MTT' 2002 April 8 - April 12, 2002, Tomsk, Russia; 2nd International Conference on Industrial Engineering. Applications and Manufacturing. ICIEAM 2016; IV Международная научно-практическая конференция «Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития» Уфа, 2017; 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», Комсомольск-на-Амуре, 2017 г.; II Всероссийская научно-практическая конференция «Электропривод на транспорте и в промышленности», Хабаровск, 20-21 сентября 2018; International Conference "Technique and technology of the future 'in 2018", Karlsruhe, Germany; XIII Международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования», Вологда, 2018;

Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению», г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 г.; 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon); 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 17-19 Nov. 2020, Chelyabinsk, Russia; 6-9 Oct. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива», Хабаровск, 19-20 ноября 2020 г.; 2021 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021; II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Техника и технология современных производств» Пенза, 2021; IV Международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению». Комсомольск-на-Амуре, 2021.

Научные исследования выполнялись в рамках НИР № ВН010/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критериев энергоэффективности».

Публикация результатов

По теме диссертационного исследования опубликовано 68 работ. В том числе 2 монографии, 25 статей в журналах, представленных в рекомендуемом перечне ВАК, а также 15 работ проиндексированных в международных наукометрических базах Scopus и WoS, среди которых публикации с категориями K1 и K2 – 6.

Вклад автора в совместные публикации

В работах [3, 7, 8, 12, 14, 14, 18, 30, 31] подход к решению, синтез алгоритмов управления; [1, 2, 4-6, 9, 10, 17, 19, 20, 24-29, 40] постановка задачи, обоснование методик решения; [11, 16, 22, 23, 33, 34, 36, 38] формализация объектов управления, разработка имитационных моделей, [13, 21, 32, 34, 37, 39] результаты имитационного моделирования.

В монографии [41] автору принадлежат главы 4, 5, 6; в монографии [42] – глава 5.

Структура и объем

Диссертационная работа содержит введение, семь глав, заключение, список литературы и приложения. Основная часть исследования составляет 318 страниц текста, 4 таблицы, и 236 рисунков. Список источников состоит 356 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность и проблематика работы, описаны цели и задачи, а также дана характеристика исследований в области применения аппарата нечеткой логики для решения различных задач по управлению технологическими процессами. Кроме того, показана теоретическая и практическая значимости диссертационного исследования, указаны объект и предмет исследований в выбранной предметной области.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ теоретических и практических направлений исследований области управления технологическими процессами с применением аппарата теории нечетких множеств, проводимые, как за рубежом, так и отечественными коллективами ученых. Показаны основные задачи, вызывающие интерес у исследователей в области систем управления с искусственным интеллектом, а также обозначены проблемы, решение которых на данный момент является затруднительным.

С точки зрения реализации процедур и законов управления для локальных систем автоматизации технологии и способы регулирования, основанные на теории мягких вычислений, представляют собой разумный компромисс между сложностью формального аппарата, заложенного в теорию искусственных нейронных сетей, и ограниченностью классических подходов, применяемых в теории автоматического управления. Понятийная составляющая, заложенная в основу нечетких систем, дает разработчикам систем управления ряд преимуществ при обработке количественной и качественной информации, содержащей некоторую долю недетерминированности и поступающей от сложного объекта регулирования, внешней среды или эксперта. Вместе с тем, из-за необходимости привлечения экспертных оценок, при настройке ряда основных параметров и блоков возникают определенные проблемы, связанные с их обработкой, и как следствие с качеством реализации законов регулирования и алгоритмической сложностью логических связей внутри самих механизмов нечетких выводов.

Сложность технологических процессов, для которых реализуется интеллектуальный подход в управлении, напрямую связана с необходимостью повышения интеллектуальности таких систем, увеличением количества лингвистических переменных, формализующих понятия входных и выходных информационных составляющих, ростом объема и размерности баз знаний, основанных на продукционных моделях представления. Простейшие нечеткие регуляторы, реализованные с одним или двумя входами и одним выходом, на текущий момент не способны в полной мере аппроксимировать функции, описывающие сложные законы управления, которые уже не являются непрерывными и монотонными и обладают разрывами. Классические регуляторы не обладают достаточной гибкостью и адаптивностью для применения их при управлении в условиях неполноты, а зачастую и противоречивости исходной и поступающей информации. Для расширения возможностей нечетких логических регуляторов, позволяющих упростить процесс их настройки и интеграции в сложные технологические процессы, а также повышения их способностей по адаптации, предлагается внедрение модульного подхода при реализации их развитой структуры. На рисунке 1 представлена классификация задач, решаемых с применением систем управления, в основу которых заложены принципы мягких вычислений.

Зачастую при решении задач управления сложными технологическими объектами с применением интеллектуальных систем применяется модульный подход, причем наполнение модулей носит существенно разнородный характер. Как правило, исследования в данной предметной области смещаются в сторону гибридных систем, что приводит к тому, что ряд управляющих модулей системы

строится на принципе нейросетевого подхода, другие – с применением аппарата нечеткой логики. При этом возникает и целый ряд проблем, связанных как с интеграцией модулей в систему, организацией внутренних связей между отдельными модулями, так и существенным усложнением формализованного подхода, в котором необходимо использовать различные математические методы.

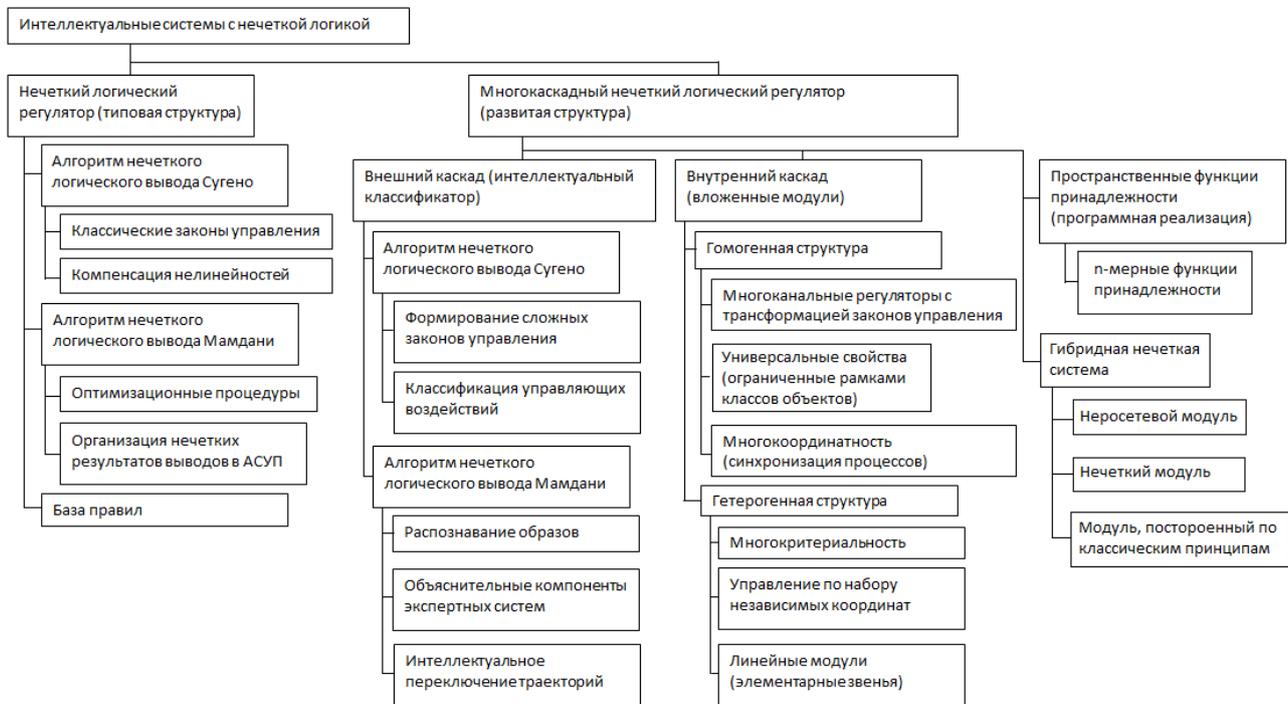


Рисунок 1 - Классификация нечетких систем управления по решаемым задачам

Кроме того, в первой главе проведен анализ повышения интеллектуальных возможностей нечетких систем общеизвестными методами, например, внедрение дополнительных лингвистических переменных в блоки фаззификации и дефаззификации, увеличение порядка базовых терм-множеств для соответствующих переменных, изменение объема баз нечетких продукционных правил. Такие трансформации структуры и содержания нечеткой системы приводят к существенной алгоритмической сложности интеллектуального модуля, в первую очередь связанному с гиперпространственной формой базы правил и, как следствие снижению быстродействия системы в целом. Итогом таких преобразований становятся снижение понятийной составляющей при настройке, проблемы с реализацией механизмов выводов нечетких систем и сложности с их проверкой на полноту и противоречивость. Поэтому для общеизвестных подходов и форм реализации нечетких систем управления не представляется возможным определить алгоритмы и решения, обладающие достаточной степенью универсальности.

Использование подходов, основанных на применении многокаскадных нечетких регуляторов, позволит ослабить влияние выше отмеченных факторов и определит возможности для комплексного решения целого ряда описанных выше задач, исключая возможный набор сопутствующих ограничений, накладываемых на систему управления и связанных как с изменением диапазонов регулирования и

пределов изменения входных сигналов, так и выработки компромиссных процедур управления в условиях многокритериальности, многокоординатности и существенной взаимосвязанности координат объекта.

Вторая глава посвящена разработке математического описания многокаскадного нечеткого регулятора при различных сочетаниях алгоритмов нечеткого вывода, а также показаны особенности реализации этого формализованного подхода с учетом применения упрощенного алгоритма нечеткого вывода во внешнем каскаде.

Обобщенная функциональная схема нечеткого логического регулятора, построенного по каскадному принципу, представлена на рисунке 2.

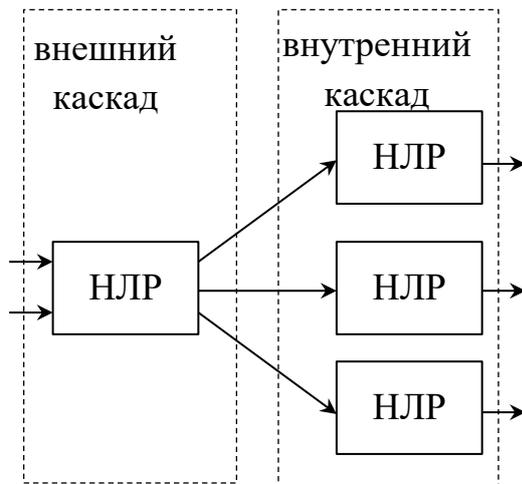


Рисунок - 2. Функциональная схема многокаскадного нечеткого регулятора

В общем виде база нечетких продукционных правил, для регулятора, реализующего внешний каскад, представляет собой типичный набор:

Если x_1 есть A_1^i и ... и x_n есть A_n^i то y_1 есть B_1^i и ... и y_m есть B_m^i , (1)

где x_1, x_2, \dots, x_n – входные лингвистические переменные, y_1, y_2, \dots, y_m – выходные лингвистические переменные, A_1, A_2, \dots, A_n – нечеткие подмножества определенные на входных лингвистических переменных, B_1, B_2, \dots, B_m – нечеткие подмножества определенные на выходных лингвистических переменных.

Если выходные лингвистические переменные независимы, получаем вариант с единственным выходом и база нечетких продукционных правил примет вид:

Если x_1 есть A_1^i и ... и x_n есть A_n^i то y есть B^i . (2)

Определим механизм нечеткого вывода и сформируем итоговую классическую переменную определяющую сигнал управления. Рассмотрим отдельно antecedentную и консеквентную части заданного набора правил.

Введем функцию $\omega_i(x)$, определяющую вес применимости antecedentной части правил из нечеткой продукционной базы:

$$\omega_i(x) = L(\delta_1(x_1)^i, \delta_2(x_2)^i, \dots, \delta_n(x_n)^i), \quad (3)$$

где δ_i уровни отсечения, определенные для каждой входной нечеткой переменной, в antecedенте каждого правила, для большинства стандартных алгоритмов нечеткого вывода такие уровни реализуются путем применения оператора минимума.

Для определенных заданных значений вектора входных переменных \bar{X}^* уравнение (3) может быть переписано в виде:

$$\omega_i(\bar{x}^*) = L(\delta_{1x_1^*}^i, \delta_{2x_2^*}^i, \dots, \delta_{nx_n^*}^i). \quad (4)$$

Пронормируем значения вектора входных переменных \bar{X}^* с целью определения правила, оказывающего наибольшее воздействие на процесс формирования консеквентной части:

$$\omega_i(\bar{x}^*) = \frac{\omega_i(\bar{x}^*)}{\sum_{i=1}^l \omega_i(\bar{x}^*)}, \quad (5)$$

Консеквентная часть правил, в конечном счете, агрегируется для получения итогового нечеткого множества для каждой лингвистической переменной вывода и получения значения итоговой переменной, в классическом понимании, которая и будет описывать сигнал управления.

Таким образом, агрегированный выход внешнего каскада МНЛР будет формироваться из множества значений, реализованных консеквентами правил $\delta_{10}(x)$, $\delta_{20}(x), \dots, \delta_{l0}(x)$, и множества уровней отсечения:

$$\delta_{\alpha}(x) = \sum_{i=1}^l \omega_i(\bar{x}^*) \delta_{i0}(x), \quad (6)$$

где $\delta_{i0}(x)$ – консеквент правила направленного на i -ый регулятор внутреннего каскада.

В случае реализации нечеткого регулятора с многокаскадной структурой выходные значения одной из лингвистических переменных внутреннего каскада, состояние которой на текущий момент будет наиболее близко соответствовать требуемому положению системы, сформирует сигнал управления. Множество лингвистических переменных, формализующих выходные значения внешнего каскада и характер реализуемых ими сигналов, будет определять алгоритм работы, в общем случае, всего набора элементарных интеллектуальных модулей во вложенном каскаде. Таким образом, сформируется итоговый вектор:

$$\bar{\Delta}_{\alpha}(x) = (\delta_{\alpha}^1(x)\beta^1(x), \dots, \delta_{\alpha}^m(x)\beta^m(x))^T, \quad (7)$$

где $\delta_{\alpha}^1(x), \dots, \delta_{\alpha}^m(x)$ – индивидуальные значения каждого выхода для интеллектуального модуля, реализующего внешний каскад, $\beta^i(x)$ – компонента входного сигнала при реализации внешнего каскада с использованием алгоритма нечеткого вывода Сугено (рисунок 3).

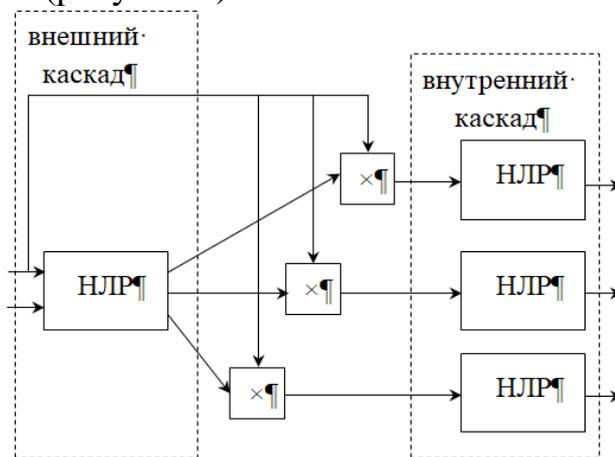


Рисунок – 3. Функциональная схема МНЛР с алгоритмом нечеткого вывода Сугено во внешнем каскаде

Вектор столбец, представленный выражением (7), определяет набор и информационную структуру входных лингвистических переменных внутреннего каскада для развитого нечеткого логического регулятора. Кроме того, необходимо отметить, что наличие функции $\beta^i(x)$ определяется лишь выбором алгоритма нечеткого вывода Сугено нулевого порядка для реализации внешнего каскада. При реализации такого структурного решения на внешний нечеткий модуль возлагается функция классификации выходных значений, а передача компонентов входного

сигнала многокаскадного нечеткого регулятора для обработки производится непосредственным внедрением $\beta^i(x)$ во входной вектор внутреннего каскада напрямую.

Независимо от алгоритма, реализуемого интеллектуальным модулем внешнего каскада, его итоговое приведенное значение будет определяться по следующей формуле:

$$z_0^i(x) = \frac{\int_l \delta_\alpha(x) \beta(x) \omega(x) dx}{\int_l \omega(x) dx} \quad (8),$$

или в случае средневзвешенного

$$z_0^i = \frac{\sum_{i=1}^l \delta_\alpha^i(x) \beta^i(x) \omega_i(\bar{x}^*)}{\sum_{i=1}^l \omega_i(\bar{x}^*)} \quad (9).$$

Сформированная таким образом выборка по всем элементам множества выходных сигналов (9), реализуемых каждым элементарным интеллектуальным модулем вложенного каскада, будет иметь вид:

$$Z_0^{inp} = [z_0^1, z_0^2, \dots, z_0^l] \quad (10).$$

Вектор, представленный формулой (10), будет определять состав входных лингвистических переменных для каждого интеллектуального модуля, расположенного во внутреннем каскаде.

В случае, когда регулятор внутреннего каскада формализуется единственной входной и выходной лингвистическими переменными, стандартный набор продукционных правил будет иметь следующий вид:

$$\text{Если } z_0^i \text{ есть } C^i \text{ то } s \text{ есть } D^i,$$

где z_0^i - входная переменная, s переменная вывода, C^i , D^i - функции принадлежности, определенные для входных и выходных переменных соответственно.

В общем случае, при треугольных функциях принадлежности, импликации в форме Мамдани, композиции с применением оператора \min и центроидном методе приведения к четкости:

$$C^i = \begin{cases} \frac{1-|c_i-z_0^i|}{\gamma_j}, & \text{если } |c_i - z_0^i| \leq \gamma_j \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (11)$$

$$D^i = \begin{cases} \frac{1-|d_i-s|}{\varepsilon_j}, & \text{если } |d_i - s| \leq \varepsilon_j \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (12)$$

$$z_0^{out} = \frac{\sum_{i=1}^k d_i \min C^i(z_0^i) D^i(s)}{\sum_{i=1}^k \min C^i(z_0^i) D^i(s)} \quad (13)$$

В случае применения алгоритма Сугено приведение к четкости будет проводиться с использованием средневзвешенного, как упрощенного варианта центроидного метода.

Итоговое суммарное «четкое» значение выходного сигнала нечеткого многокаскадного регулятора можно определить как сумму всех компонент по каждому выходу с модулей внутреннего каскада:

$$Z_0^\Sigma = \sum_{i=1}^m z_{0i}^{out} \quad (14)$$

В третьей главе показано применение многокаскадных нечетких систем для реализации процедур управления (рис. 1) при решении задач управления приводом постоянного тока в рамках следящей системы при трансформации законов регулирования, а также формировании и классификации этих законов при компенсации произвольного вида нелинейностей.

Задача компенсации искусственных и естественных нелинейностей в САУ связана с внедрением компенсирующих звеньев в различные каналы. При этом основная задача классификации, такой нелинейности, и как следствие, выбор способа ее компенсации остаются открытыми. Применение предлагаемого подхода позволяет комплексно решать такого рода задачи, при этом на внешний каскад возлагаются функции классификации нелинейности и выбора способа компенсации, а элементы внутреннего каскада непосредственно реализуют эти способы. В зависимости от формализации объекта регулирования и вида статической характеристики нелинейного элемента, классические способы компенсации располагают различными компенсирующими возможностями, при этом использование совокупности из всех методик позволяет увеличить точность корректировки САУ, что делает систему универсальной.

В основе реализации и моделирования нечеткой системы управления лежат способ компенсации нелинейных элементов систем автоматического управления и методика, основанная на нечетком многокаскадном управлении. На рисунке 4 представлена имитационная модель многокаскадной нечеткой системы управления. Внутренний каскад МНЛР состоит из элементарных модулей, ориентированных на основные способы компенсации нелинейных элементов систем автоматического регулирования. Каждый модуль внутреннего каскада соответствует классическому методу компенсации: с подачей сигнала управления на вход нелинейности в прямом канале; с подачей сигнала управления на выход нелинейности; с подачей сигнала управления на вход нелинейности по каналу обратной связи.

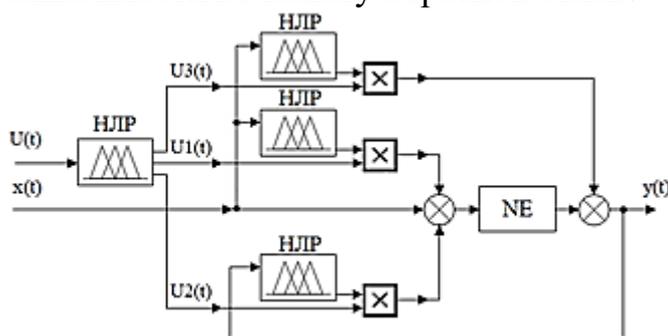


Рисунок 4 – Общий вид системы управления с МНЛР

Применение методологии основанной на многокаскадном нечетком управлении позволит применять более сложные формы компенсации нелинейных элементов САУ за счет различного соединения методов компенсации реализуемых модулями вложенного каскада. Математическая модель такой интеллектуальной системы представлена на рисунке 5.

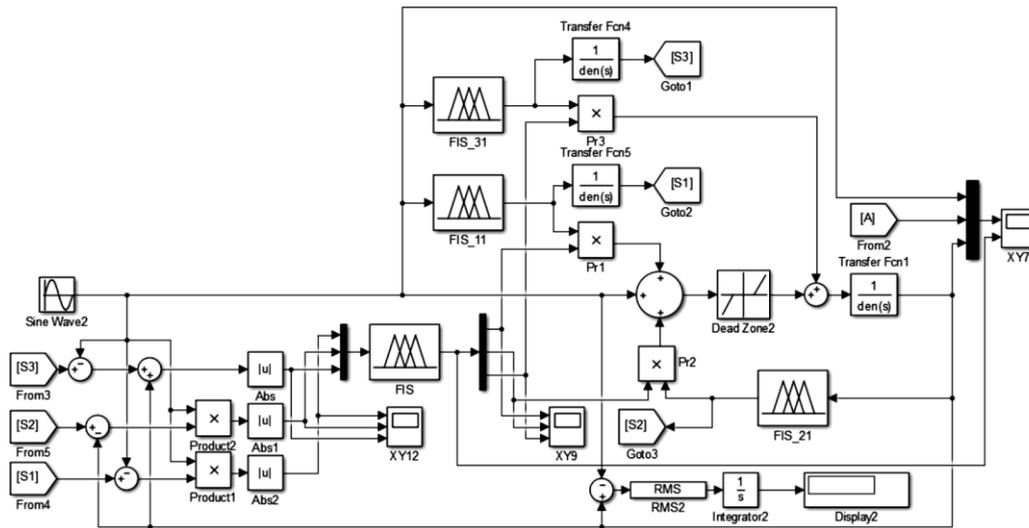


Рисунок 5 – Математическая модель многокаскадной системы управления

Результаты моделирования, основанные на применении классических методов компенсации, представлены на рисунке 6.

С учетом применения различных способов компенсации величина среднеквадратичной ошибки составила:

- сигнал без компенсации $\theta(t) = 34,87$.
- компенсация по методу введения сигнала коррекции на вход нелинейного элемента $\theta(t) = 4,981$;
- компенсация по методу введения сигнала коррекции обратной связи на вход нелинейного элемента $\theta(t) = 5,409$;
- компенсация по методу введения сигнала коррекции на выход нелинейного элемента $\theta(t) = 3,135$.

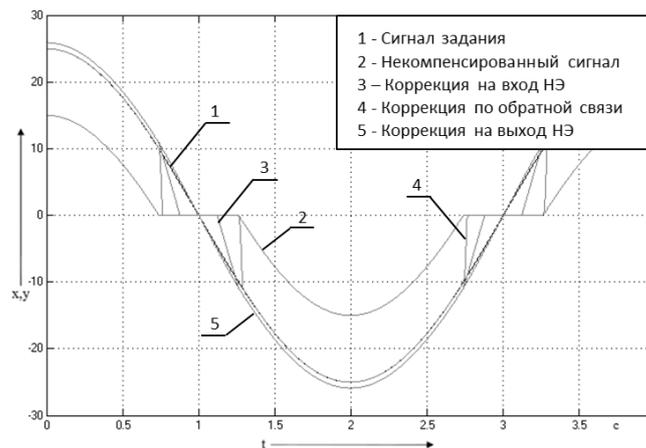


Рисунок 6 – Графики переходных процессов сигналов корректируемой системы

В случае компенсации нелинейностей с использованием технологии, основанной на многокаскадном нечетком управлении, динамические характеристики будут иметь вид показанный на рисунках 7 и 8.

Среднеквадратичная ошибка для многокаскадной системы регулирования составила:

- сигнал без компенсации $\theta(t) = 34,87$.
- компенсация с применением механизма вывода Мамдани $\theta(t) = 2,265$;
- компенсация с применением механизма вывода Сугено $\theta(t) = 2,751$;

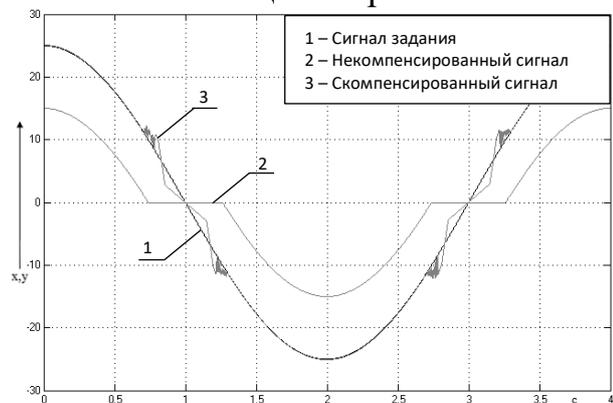


Рисунок 7 – Графики переходных процессов сигналов корректируемой системы (нечеткий логический вывод Мамдани)

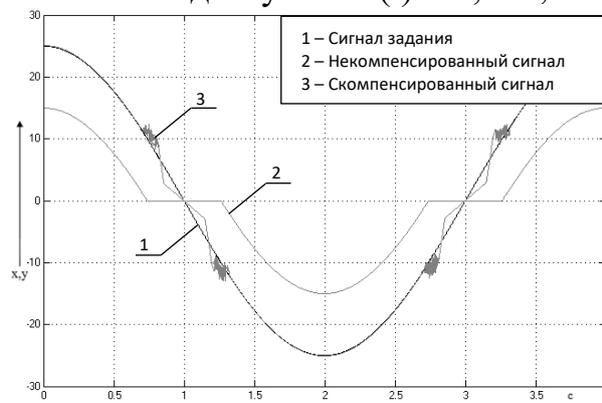


Рисунок 8 – Графики переходных процессов сигналов корректируемой системы (нечеткий логический вывод Сугено)

Несмотря на схожесть переходных процессов компенсированных сигналов, представленных на рисунках 7 и 8, моменты переключения внешнего каскада между выбором способов для компенсации в определенный момент времени – различны.

Анализ рисунков показал что, использование предлагаемой методики на основе многокаскадной интеллектуальной системы автоматического регулирования с нечеткими логическими компенсаторами во внутреннем каскаде позволило снизить общую ошибку системы управления и получить динамические характеристики, по показателям несколько превышающие системы с компенсаторами работающими обособлено.

Полученное решение по компенсации нелинейных элементов, при помощи систем с искусственным интеллектом, позволяет управлять не только включением отдельно взятых способов компенсации нелинейных элементов САУ, но и использовать их совместно для улучшения качества динамических характеристик.

Основным оптимизационным показателем является повышение качества функционирования объектов и систем автоматического управления с точки зрения компенсации различного рода нелинейностей, а также увеличения срока службы технологического объекта, путем динамического контроля над протекающими процессами.

Одним важнейших достоинств регуляторов, реализуемых на базе нечеткой логики, является возможность их гибкой настройки, что в конечном итоге обеспечит повышение качества регулирования. С другой стороны, придание свойств каскадности нечеткому регулятору позволит значительно упростить работу с переменными и с базой правил, за счёт разделения диапазона регулируемой выходной величины (сигнала управления) регуляторами второго каскада. То есть, средствами настройки многокаскадного нечеткого регулятора можно обеспечить такие показатели качества регулирования системы управления, которые не будут

уступать аналогичным в идеализированной классической системе управления, а именно обладать высоким быстродействием, низким перерегулированием или вообще его отсутствием.

Для доказательства отмеченного утверждения рассмотрим реализацию систем управления, регуляторы которых выполнены на основе многокаскадного принципа, на ряде конкретных задач. В качестве одной из таких задач возьмем широко используемую в управлении технологическими механизмами, задачу управления положением исполнительного механизма.

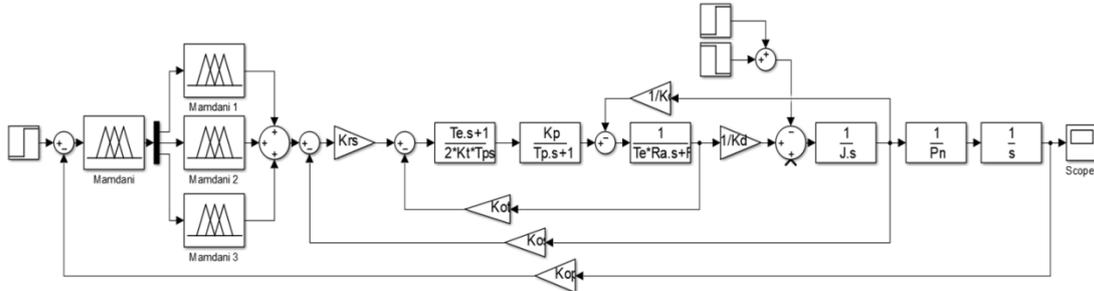


Рисунок 9 – Модель системы регулирования положения с нечетким многокаскадным регулятором

Имитационная модель одного из возможных вариантов системы регулирования положением исполнительного механизма на основе электропривода постоянного тока с нечетким многокаскадным регулятором представлена на рисунке 9.

Такое структурное решение для систем управления, функционирующих в режиме слежения для обеспечения необходимой адаптивности, требует реализации многокаскадного нечеткого регулятора показанного на рисунке 10. Модуль внешнего каскада реализуется набором из одной входной и трех выходных лингвистических переменных.

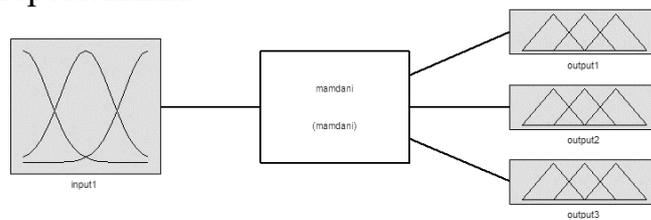
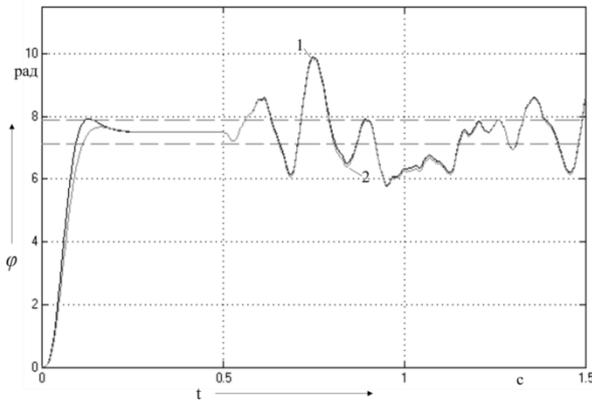


Рисунок 10 – Функциональная схема внешнего каскада нечеткого регулятора

Набор элементов базового терм-множества и область определения лингвистической переменной, формализующей сигнал ошибки по положению, представлен тремя аппроксимированными функциями принадлежности треугольного типа. Выход нечеткого регулятора, реализующего внешний каскад, определяется набором из трех лингвистических переменных, соответствующих различным диапазонам перемещений. Базовое терм-множество каждой выходной лингвистической переменной формализуется пятью нечеткими переменными с ограничениями в виде функций принадлежности треугольной формы. Нечеткая продукционная база знаний с консеквент выводимой структурой регулятора с

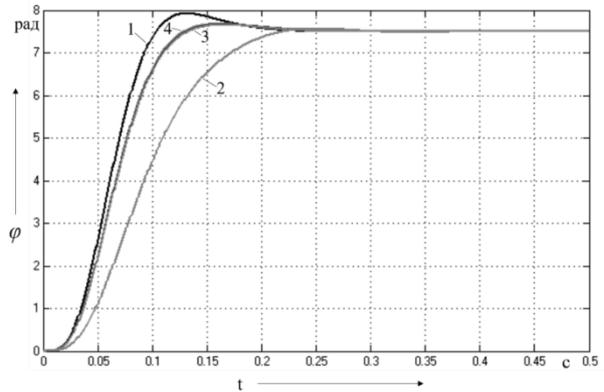
алгоритмом нечеткого вывода Мамдани и тремя выходами включает в себя десять правил.

Динамические характеристики для систем управления с классическим регулятором и многокаскадным нечетким управлением приведены на рисунке 11.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор Мамдани-Мамдани

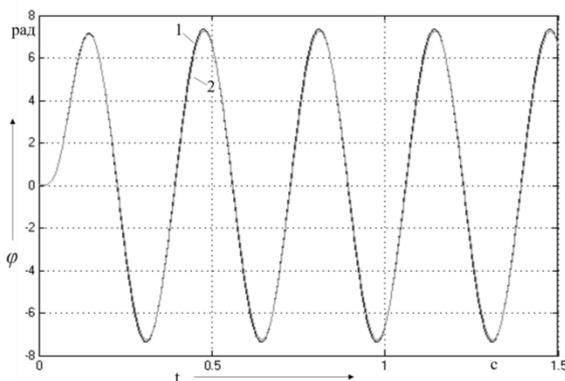
Рисунок 11 – Реакция систем при подаче случайного сигнала большого номинала как возмущающее воздействие



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор Сугено-Мамдани; 3 – нечеткий регулятор Мамдани-Мамдани; 4 – нечеткий регулятор Мамдани-Сугено

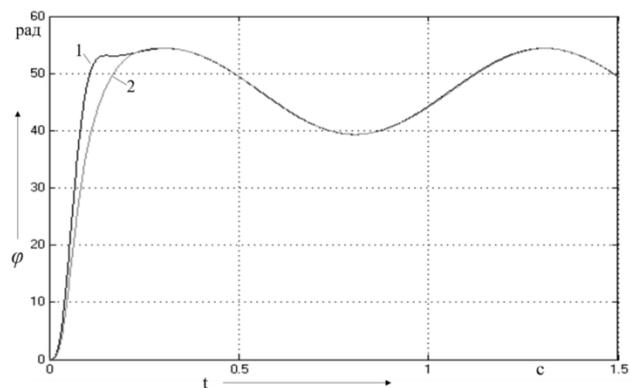
Рисунок 12 – Реакция систем на входное воздействие $U=8$

На рисунках 12–14 представлен анализ качества регулирования предлагаемого подхода с учетом возможных вариаций сигналов характерных для систем слежения, таких как ступенчатый с пороговым значением 8В, а также синусоидальный сигнал с различной амплитудой и смещением.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор Мамдани-Мамдани

Рисунок 13 – Реакция системы на входное воздействие



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор Мамдани-Мамдани

Рисунок 14 – Реакция системы на входное синусоидальное воздействие со смещением вверх

Реализация законов управления технологическим процессом с использованием интеллектуального подхода, основанного на теории мягких вычислений, зачастую ограничивается применением одного модуля, организованного на единственном алгоритме вывода. Типичным объектом управления для такого рода систем

являются модели электроприводов постоянного тока. Нечеткий регулятор в таких системах, как правило, моделирует ПИ- или ПИД-закон управления с учетом ряда дополнительных информационных каналов. В целом реализация систем автоматического управления, содержащих элементы искусственного интеллекта, позволяет сформировать законы регулирования различной сложности, при этом существенно увеличивая алгоритмическую сложность основных блоков самого нечеткого регулятора. Ограничивающими факторами при этом будут как количество лингвистических переменных на входах и выходах, объем базы знаний, так и сложность при выборе алгоритма вывода и формы функций принадлежности.

Процесс формирования нечеткой системы в ее классическом понимании представляет собой задачу, ориентированную на внедрение в контур управления экспертных оценок. Учитывая определенные сложности, связанные как с выбором экспертов в заданной предметной области и обработкой их мнения, так и проблемами, обусловленными сложностями интерпретации качественных специализированных знаний, определенную актуальность приобретают безэкспертные методы настройки основных параметров нечетких систем. Стандартный алгоритм настройки нечеткого логического регулятора адаптивной нейронной сетью может быть применен и к синтезу предложенных нечетких многокаскадных систем управления. Ниже приведена структурная схема ОУ с многокаскадной нечеткой системой управления (рис. 15).

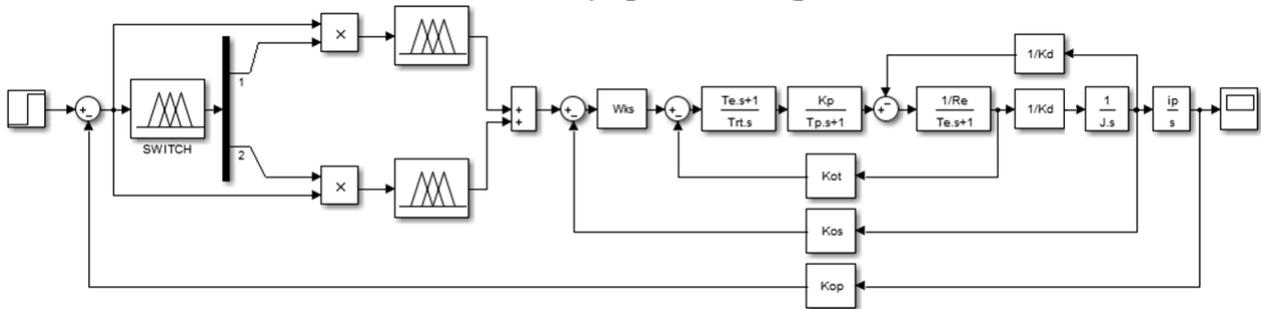


Рисунок 15 – Структурная схема ОУ с многокаскадной нечеткой системой управления

Реализация нечеткого регулятора по каскадному принципу дает возможность модулю внешнего каскада решать многокритериальную задачу регулирования сложного технологического объекта, а именно интеллектуально совмещать различные настройки системы управления, например, совмещая симметричный и модульный оптимумы.

Функциональная схема НЛР, который был синтезирован с помощью адаптивной нейронной сети, на основе обучающих данных классического регулятора имеет вид, показанный на рисунке 10.

Проведем анализ результатов работы синтезированной МНСУ при сравнении ее с классической системой регулирования. Так как целевой задачей синтеза МНСУ является решение многокритериальной задачи по управлению, то рассмотрим поведение систем при входном и возмущающем воздействии (рис. 16).

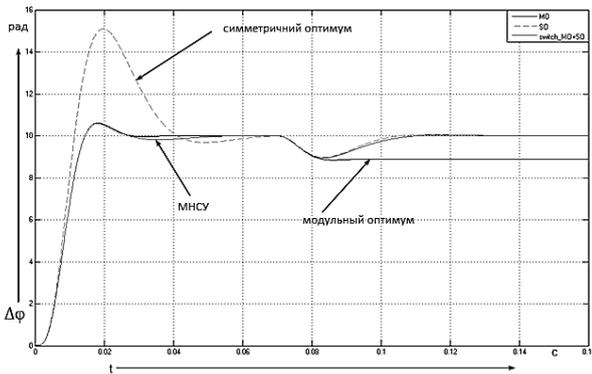


Рисунок 16 – График переходного процесса системы при подаче сигнала задания и возмущающего воздействия

По полученным результатам моделирования можно сделать вывод, что применение многокаскадной нечеткой системы управления позволило совместить свойства двух различных регуляторов, настроенных на различные критерии оптимизации.

Для более наглядного отображения работы МНСУ, рассмотрим реакцию системы на синусоидальный сигнал задания (рис. 17). Результаты моделирования наглядно показывают, что переключатель на базе НЛР внешнего контура МНСУ реализует управление с настройкой на модульный оптимум при верхнем пороге ошибки по положению, в обратном случае включается регулятор, настроенный на симметричный оптимум. Плавность в точке переключения достигается за счёт зоны сопряжения двух нечетких термов лингвистической переменной.

Предложенный подход к реализации МНСУ позволяет интеллектуально совместить различные форматы настроек регуляторов, получая при этом качественные переходные характеристики регулирования, то есть расширить интеллектуальность системы управления без применения сложного математического аппарата, оперируя лишь данными и знаниями эксперта о процессе.

На основании выполненного исследования по параметрической адаптации нечетких модулей многокаскадной структуры регулятора можно сделать следующие выводы: использование нейронечеткого подхода к оптимизации параметров нечетких модулей регулятора целесообразно при перенастройке интеллектуальной системы управления с учетом неустойчивости ряда параметров технологического объекта; включение дополнительного модуля во внутренний каскад интеллектуальной системы обеспечивает расширение диапазона регулирования всей системы управления технологическим объектом; использование нейронечеткого подхода позволяет осуществить безэкспертную настройку основных параметров нечетких модулей.

Четвертая глава посвящена применению технологии управления с использованием многокаскадных нечетких регуляторов при решении многокритериальных задач управления сложными технологическими объектами. Необходимо отметить, что такую постановку задачи можно считать достаточно типичной при настройке многоконтурных систем управления. В целом такой подход

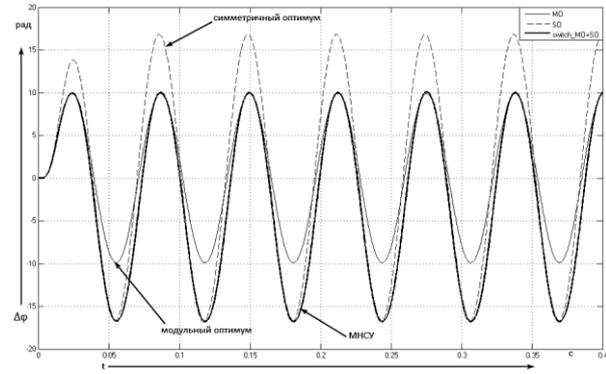


Рисунок 17 – График переходного процесса системы при подаче синусоидального сигнала задания

направлен на настройку каждого контура регулирования отдельно, ориентирував его на точность, быстродействие и т.д.

Классические системы управления в своей основе имеют некоторый базовый алгоритм, который может быть отражен четырьмя последовательными компонентами или звеньями: математическое описание объекта регулирования – формализация целей существования объекта – критерий управления – система управления. При этом отсутствие какого-либо звена или нарушение порядка следования приводит к отсутствию возможности по синтезу классической системы управления для объекта с традиционным подходом к его формализации. Одной из самых проблемных областей при проектировании систем регулирования является наличие целого ряда критериев. В случае реализации классического подхода многокритериальность зачастую представляет собой задачу трудноразрешимую.

В таких системах ограничение переменных представляет более сложную задачу. Задача ограничения координат системы является актуальной при обработке режимов больших перемещений или регулирования "в большом", а также при наличии существенных перегрузок на валах приводных двигателей. Позиционная САР должна выполнять согласование процессов управления в режимах больших перемещений, с ограничением переменных и режимах перемещений "в малом" с обеспечением заданной точности позиционирования и уравнивании системы в заданных позициях. Простые решения, основанные на использовании ограничений регуляторов позиционной системы управления, дают отрицательные результаты, и являются причиной выхода системы регулирования за границы устойчивости. Поэтому для таких систем регулирования положением используют подход, базирующийся на положениях теории оптимального управления процессами позиционирования с ограничением фазовых координат и на приближенной реализации этих процессов с помощью структур подчиненного регулирования. Формирование нелинейного регулятора положения осуществляется путем «сшивания» из нескольких зависимостей: линейной (при обработке перемещений «в малом»), параболической (при обработке перемещений «в большом») и ограничения. Даже незначительная флуктуация параметров системы вызывает необходимость перенастройки регулятора, что на практике не всегда приемлемо.

Для реализации процедур управления нечеткой многокаскадной системой регулирования воспользуемся ранее рассчитанной моделью позиционного электропривода. Выполним замену классических регуляторов положения и скорости на нечеткий многокаскадный регулятор (рис. 18).

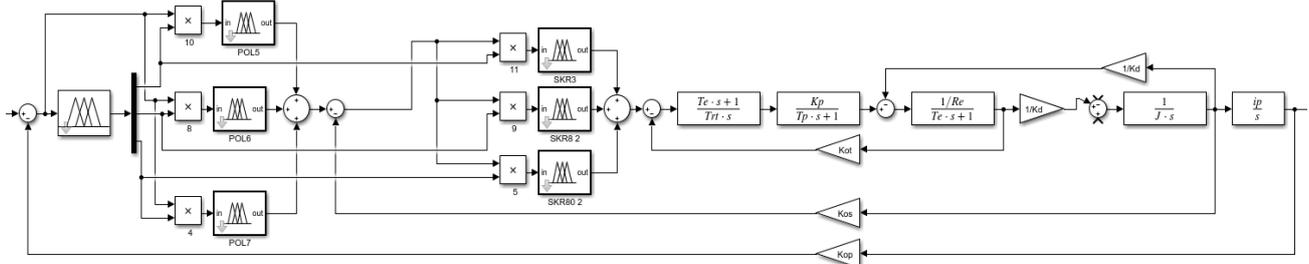


Рисунок 18 – Структурная схема системы автоматического управления положением и скоростью с нечетким многокаскадным регулятором

На реализованный нечеткий логический регулятор, также возлагается функция ограничения управляющего сигнала, показанная на структурной схеме рисунка 18. Нелинейный элемент, с функцией ограничения, реализован на основе элементарного нечеткого модуля POL7 и представляет собой нечеткий регулятор в структуре развитой интеллектуальной системы управления с упрощенным алгоритмом вывода, состоящий из одной лингвистической переменной на входе и выходе, соответственно. Формализация входного сигнала выполняется стандартно при помощи лингвистической переменной и представляет собой набор из пяти нечетких термов с треугольными функциями принадлежности и областью определения заданной в диапазоне $[-80; 80]$. Выходное значение этого интеллектуального модуля описывается набором констант $[-10; -10; 0; 10; 10]$.

Динамические характеристики интеллектуальной системы управления по положению при различных сигналах задания $U = 8 \text{ В}$, $U = 80 \text{ В}$ при использовании классических и многокаскадных нечетких регуляторов представлены на рисунках (рис. 19, 20). На рисунках цифрами обозначены: 1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечетким регулятором.

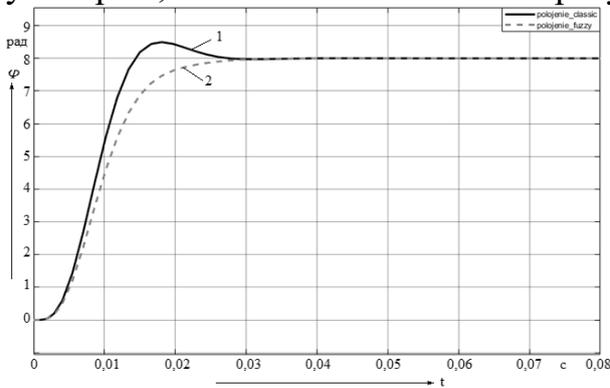


Рисунок 19 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=8 \text{ В}$

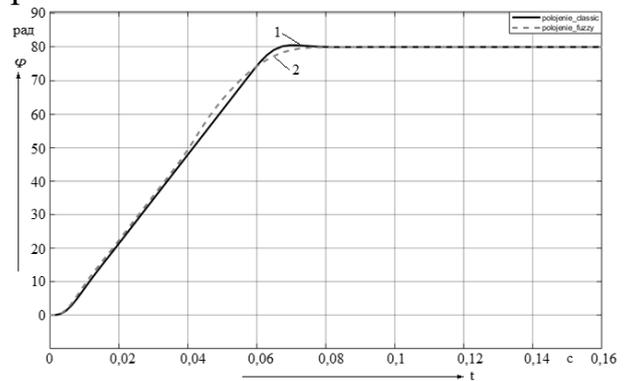


Рисунок 20 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=80 \text{ В}$

Как видно из характеристик, представленных на рисунках 19 и 20, система с нечетким регулятором обеспечивает стабилизацию выходной координаты на заданном уровне, также как и в классическом варианте, и имеет меньшее время регулирования и отсутствие перерегулирования.

Анализ изменения сигнала в контуре скорости (рисунки 21 и 22) показал аналогичные результаты.

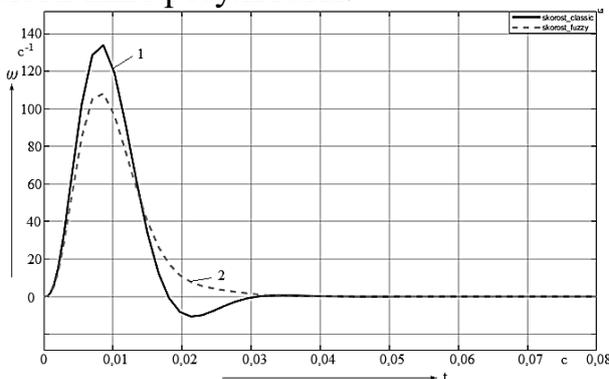


Рисунок 21 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=8 \text{ В}$

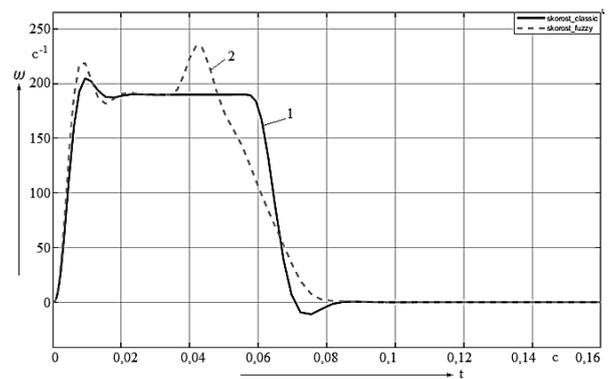
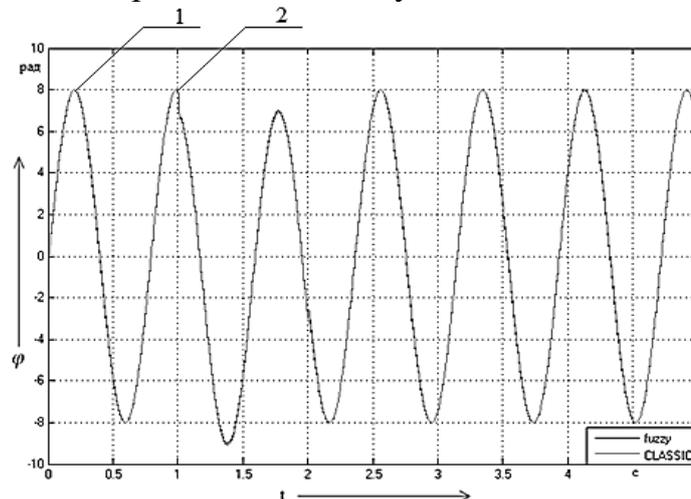


Рисунок 22 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=80 \text{ В}$

Наиболее характерно адаптивные свойства можно проследить по динамическим характеристикам, представленным на рисунке 22. Дополнительный разгон системы на участке около 0,04с позволяет приблизиться к заданному положению плавно, при отсутствии выхода характеристики в отрицательную полуплоскость.

На рисунках показаны динамические характеристики при реакции системы управления технологическим процессом на синусоидальный сигнал (рис. 23).



1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечетким регулятором

Рисунок 23 – Реакция систем на подачу возмущающего воздействия

Как видно из рисунка 23 следящая система с нечетким многокаскадным регулятором обрабатывает входное синусоидальное воздействие не хуже классической системы управления.

Особенностью предложенного подхода при реализации интеллектуальных систем управления является возможность нечеткой системы управления реализовывать целый ряд различных функций с целым набором различных критериев. При этом за счет наличия внешнего каскада, находящегося под управлением интеллектуального модуля, возникает возможность сочетания этих критериев и даже гибкого перехода между ними. На базе многокаскадного регулятора реализована нечеткая система, управляющая независимо частями объекта, например, по критерию точности в контуре положения, критерию быстродействия соответственно в контуре скорости, а также выполняющая ограничивающие функции на ряд сигналов формируемых предложенной системой.

Пятая глава посвящена построению нечетких регуляторов, базирующихся на предложенном подходе, реализующим пространственную форму функций принадлежности в блоках дефазификации внутреннего каскада.

Актуальность предложенной методологии заключается, прежде всего, в тенденции увеличения сложности математических моделей реальных систем и процессов управления, связанная с желанием повысить их адекватность и учесть все большее число различных факторов, оказывающих влияние на процессы принятия решений. Кроме того, такой подход является наиболее применимым для объектов регулирования характеризующихся дискретизацией технологического процесса и не отличается универсальностью.

В этой главе рассмотрена альтернативная возможность построения нечеткой интеллектуальной системы с пространственными функциями принадлежности для управления сложными технологическими объектами, которые чаще всего обладают свойствами уникальности, слабоструктурированности и отсутствием формальных критериев существования. Нечеткие регуляторы, оперирующие пространственными функциями принадлежности, позволяют организовывать процесс управления целым классом объектов, что в конечном результате приводит к формированию экспертной системы.

Для разработки управления системы будет использовано моделирование технологического процесса и непрерывно-детерминированный подход.

При решении задачи синтеза нечеткого регулятора будем опираться на некоторую абстрактную энергоэффективную систему управления технологическим процессом, построенную по подчиненному принципу. При этом на внешний контур регулирования возлагается задача поддержания задающего сигнала с заданными быстродействием и точностью, а внутренние контуры регулирования должны обеспечить режим минимума энергозатрат. В такой постановке просматривается зависимость выходной координаты системы управления одновременного от двух параметров: задающего сигнала и энергопотребления.

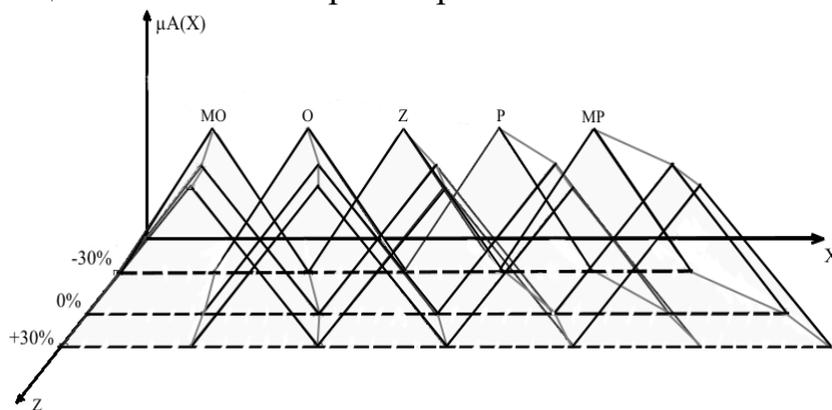


Рисунок 24 – Расположение пространственных функций принадлежности в заданном диапазоне регулирования

В случае применения функций принадлежности аппроксимированного типа зависимость координат системы можно изобразить в виде набора пространственных функций принадлежности, приведенными на рисунке 24.

При формировании функций принадлежности принималось во внимание, что входной сигнал может претерпевать изменение в пределах $\pm 30\%$ от номинального значения.

Как известно, пространственные функции принадлежности в настоящее время моделируются или формируются на основании формализованных нечетких моделей Такаги-Сугено. При таком подходе переключения между элементами такой пространственной функции происходят дискретно с использованием нечеткого отношения вида:

$$R_{\delta}^k: (x_1 = A_{\delta 1}^k) \cap \dots \cap (x_m = A_{\delta m}^k), \quad (15)$$

где x_i – входной сигнал, $A_{\delta i}^k$ – входные нечеткие множества, δ – множество переключений или количество дискретных состояний.

Тогда набор продукционных правил, который может быть сформирован для заданного технологического объекта с использованием знаний эксперта, можно записать:

$$R_{\delta}^k: (x_1 = A_{\delta 1}^k) \cap \dots \cap (x_m = A_{\delta m}^k) \rightarrow y = a_{\delta}^k x^T + b_{\delta}^k, \quad (16)$$

где a_{δ}^k и b_{δ}^k постоянные коэффициенты полинома консеквентной части нечеткого логического вывода Сугено.

При условии применения упрощенного алгоритма нечеткого логического вывода (Сугено 0 порядка), консеквенты управляющих продукционных правил можно записать:

$$R_{\delta}^k: (x_1 = A_{\delta 1}^k) \cap \dots \cap (x_m = A_{\delta m}^k) \rightarrow y = b_{\delta}^k, \quad (17)$$

Тогда выходное значение сигнала, формируемое нечетким регулятором внешнего каскада при условии применения дискретного варианта центроидного метода в общем случае, для моделей Такаги-Сугено, имеет вид:

$$y = \sum_{i=1}^N \alpha_{i\delta}^k (a_{i\delta}^k x^T + b_{i\delta}^k) / \sum_{i=1}^N \alpha_{i\delta}^k, \quad (18)$$

где N – объем базы правил регулятор внешнего каскада.

В случае применения упрощенного алгоритма нечеткого логического вывода можно записать:

$$y = \sum_{i=1}^N \alpha_{i\delta}^k b_{i\delta}^k / \sum_{i=1}^N \alpha_{i\delta}^k, \quad (19)$$

В общем случае при реализации любого механизма нечетких выводов уровень отсечения каждой предпосылки для каждого правила на этапе логического вывода будет иметь вид:

$$\alpha_{\delta}^k = \prod_{i=1}^m A_{\delta i}^k \mu_{i\delta}^k, \quad (20)$$

где $\mu_{i\delta}^k$ – степень принадлежности элемента x_i входному нечеткому множеству $A_{\delta i}^k$, m – количество входов, определяемая заданной функцией принадлежности:

$$\mu_{i\delta}^k = \begin{cases} 0, & x_i \leq c_{i\delta}^k \\ \frac{x_i - c_{i\delta}^k}{d_{i\delta}^k - c_{i\delta}^k}, & c_{i\delta}^k \leq x_i \leq d_{i\delta}^k \\ \frac{d_{i\delta}^k - x_i}{d_{i\delta}^k - e_{i\delta}^k}, & d_{i\delta}^k \leq x_i \leq e_{i\delta}^k \\ 0, & e_{i\delta}^k \leq x_i \end{cases}, \quad (21)$$

где $c_{i\delta}^k$, $d_{i\delta}^k$, $e_{i\delta}^k$ – параметры треугольной функции принадлежности соответствующей вершинам.

При распространении такого подхода для случая реализации внешнего каскада развитого нечеткого регулятора с применением алгоритма Мамдани, при условии использования оператора Prod на этапе логического вывода при формировании единственного нечеткого множества для каждой переменной вывода получим:

$$R_{\delta}^k: (x_1 = A_{\delta 1}^k) \cap \dots \cap (x_m = A_{\delta m}^k) \rightarrow C_{i\delta}^{*k} = C_{i\delta}^k(y) \alpha_{i\delta}^k, \quad (22)$$

где $C_{i\delta}^{*k}$ итоговое нечеткое множество для каждой переменной вывода в каждом правиле отмасштабированное соответствующим уровнем отсечения $\alpha_{i\delta}^k$.

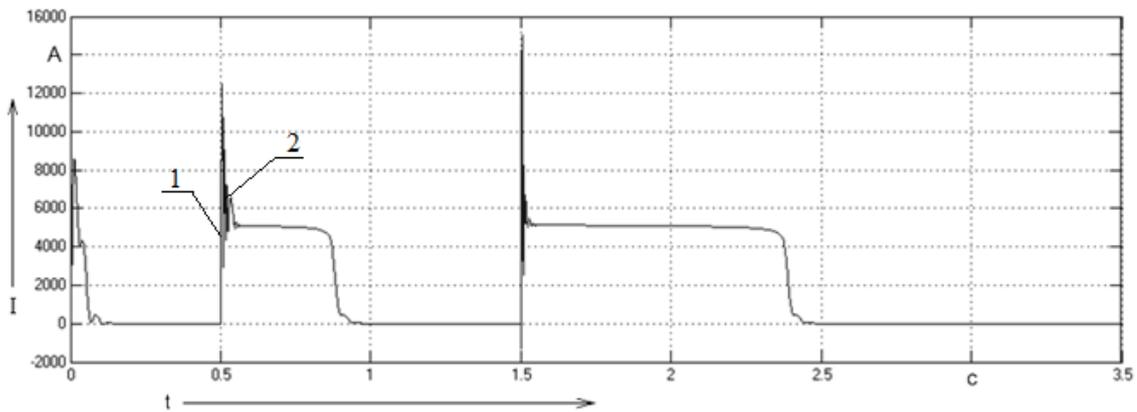
Приведение к четкости проводится с применением метода первого максимума:

$$y = \min(y_i | C_{i\delta}^{*k} = \max_z C_{i\delta}^{*k}(z_i)), \quad (23)$$

где z_i – множество переменных вывода составляющих максимум итогового нечеткого множества.

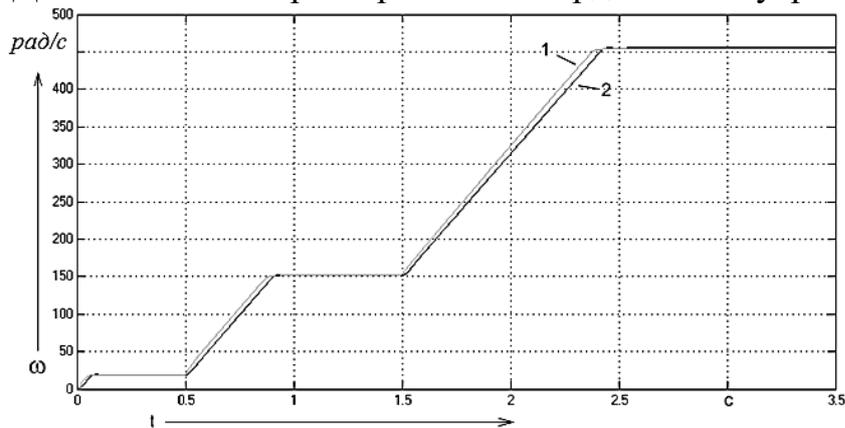
Таким образом, формирование пространственных функций принадлежности при помощи многокаскадной нечеткой системы возможно как дискретно с использованием алгоритма Сугено, так и непрерывно при условии использования алгоритма Мамдани.

В общем случае структура нечеткой системы управления абстрактным технологическим объектом может быть представлена в виде, показанном на рисунке 9. В результате моделирования получены следующие графики переходных процессов системы (рис. 25 - 27).



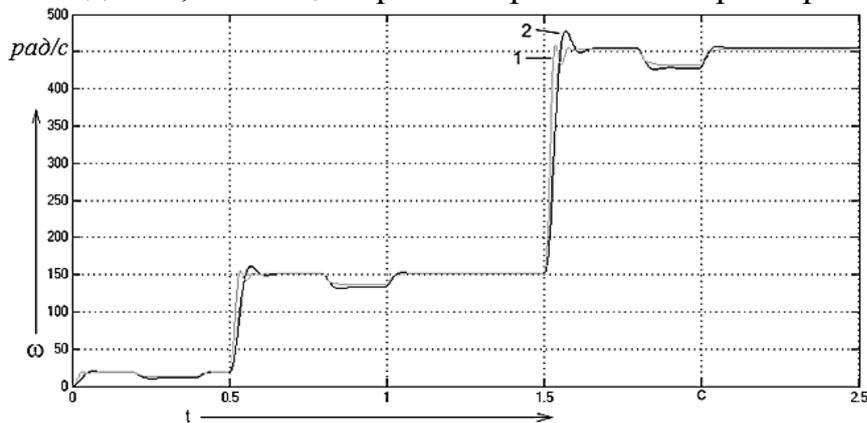
1. - интеллектуальная система, 2. - классическая система

Рисунок 25 – Динамические характеристики координаты внутреннего контура



1. - интеллектуальная система, 2. - классическая система

Рисунок 26 – Динамические характеристики в системе при обработке сигнала задания, имеющего резко переменный характер



1. - интеллектуальная система, 2. - классическая система

Рисунок 27 – Динамические характеристики в системе управления при действии внешнего возмущающего воздействия.

Для реализации пространственной формы функций принадлежности применяется интеллектуальный регулятор, представленный на рисунке 3, внутренний каскад, которого состоит из элементарных нечетких регуляторов с единственным входом и выходом и одинаковыми механизмами выводов.

Подводя итог всему вышесказанному, можно сделать вывод, что регуляторы, построенные с использованием классических методов, не обладают необходимой гибкостью, особенно при внедрении в систему недетерминированных возмущающих воздействий. Главным достоинством интеллектуальной системы управления является ее гибкость и робастность к целому ряду как внешних, так и внутренних воздействий. Вместе с тем, робастные свойства нечеткого регулятора ограничены некоторым пределом, что влечет за собой необходимость более точной настройки при изменении внутренних параметров объекта регулирования.

Гибкость настроек и модульность внутренней структуры многокаскадных нечетких систем позволяет реализовывать их модели с учетом как различных критериев по управлению техническим объектом, так и добавляет ряд возможностей по сочетанию различных алгоритмов нечеткого вывода внутри одного вложенного каскада. При реализации модели МНЛР при таких условиях на нечеткий регулятор внешнего каскада возлагаются дополнительные функции по экспертной оценке применимости определенного критерия управления в определенный момент времени, при определенных сложившихся условиях, и, в конечном счете, даже их сочетание.

При выполнении настройки регуляторов любой системы управления технологическим процессом, как правило, ориентируются на реализацию некоторой целевой функции при выполнении определенных требований к качественным показателям регулирования. При наличии внутренних модулей регулятора, настроенных на различные алгоритмы нечеткого логического вывода настройка системы может быть реализована дискретно при использовании механизма Сугено и в аналоговом виде с применением механизма Мамдани. Такой подход реализует особенности построения следящих систем при управлении в большом и малом. Большие перемены могут быть выполнены с использованием алгоритма нечеткого вывода Сугено, дотягивание или малые перемещения реализуются аналоговыми сигналами, формируемыми интеллектуально с применением алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Кроме того, использование упрощенного алгоритма нечеткого вывода позволит несколько увеличить быстродействие при больших углах поворота за счет формирования постоянных величин сигналов на выходе интеллектуальной системы.

В шестой главе представлены возможности предлагаемого подхода по реализации нечеткой системы управления сочетающей в себе свойства различных алгоритмов вывода в рамках наполнения внутреннего каскада. Характерным технологическим объектом, наиболее полно отражающим сложные нестационарные, нелинейные динамические процессы является технологический процесс пиролиза древесины в мобильных углевыжигательных установках, который можно описать, как сложный теплообмен, формализуемый математически системой дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений. Такая система в общем случае описывает не только набор и взаимосвязи между физическими

параметрами объекта и среды, но и должна учитывать различные переносы энергии, например, радиационный, конвективный или кондуктивный.

Математическое описание объекта управления представлено в виде структурной схемы, показанной на рисунке 36. Данная математическая модель реализована с применением метода тепловых схем замещения и имеет набор допущений: источником тепла является все дно камеры с равномерным распределением теплового потока по всей площади, объектом сугливания является сплошной физический объект с постоянными коэффициентом теплопроводности, плотностью и удельной теплоемкостью, а также отсутствуют контактные термические сопротивления между поверхностями внутри установки.

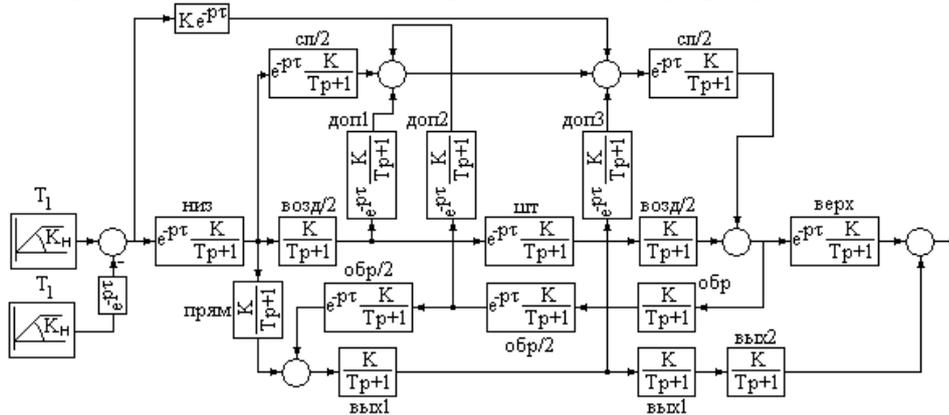


Рисунок 28. – Структурная схема пиролизной установки мобильного типа

К главным критериям, которые позволяют повысить качество конечного продукта можно отнести сокращение разницы температур между подом и сводом установки, в том числе с учетом появления дополнительного внутреннего источника тепла и стабилизация температуры прокаливания конечного продукта.

На структурной схеме (рис. 29) показана реализация интеллектуальной системы управления технологическим объектом с многокаскадным нечетким регулятором со смешанным исполнением внутренних модулей. Модель камеры сугливания построена с учетом внедрения в ее стенки управляемых штор, позволяющих распределять тепловые потоки внутри установки более равномерно. Внутренний каскад развитого нечеткого регулятора представлен двумя парами элементарных модулей с различными алгоритмами вывода. Каждая пара, в свою очередь, реализует независимое управление шторами согласно алгоритма, определяемого нечетким контроллером внешнего каскада. Элементы шт1 и шт2 соответствуют управляющим шторам, внедренным в стенки контейнера с сырьем.

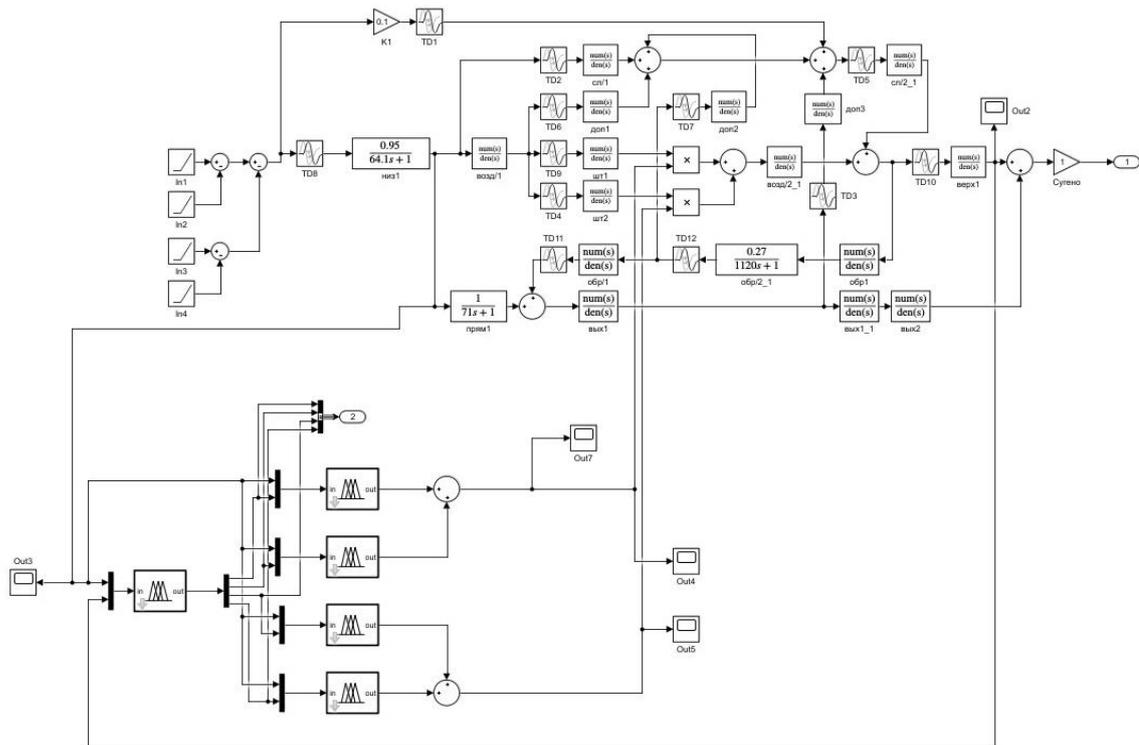
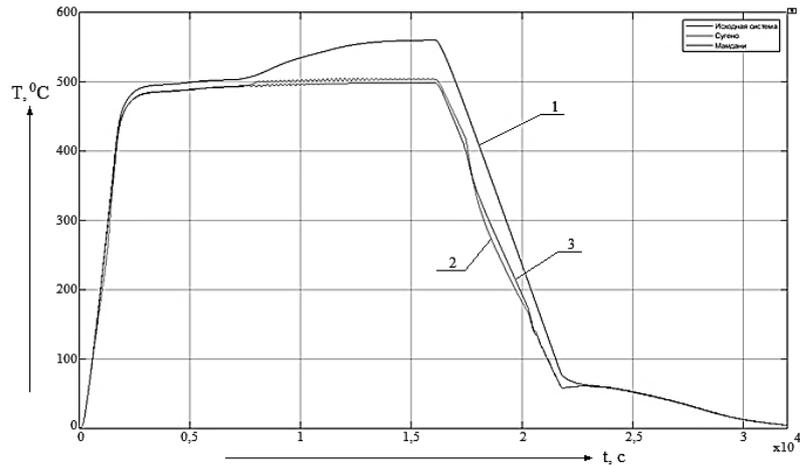


Рисунок 29 – Структурная схема интеллектуальной системы управления пиролизной установкой мобильного типа

С учетом допущений, ограничений и принятой целевой задачи управления процессом пиролиза многокаскадный нечеткий логический регулятор может быть построен на основании следующих требований. Внутренний каскад представляет собой два набора элементарных НЛР ориентированных на распределение температурных полей у пода и свода печи. Критерии этих наборов направлены на решение двух задач: первый стабилизация температуры у пода печи, а именно ее «выравнивание» и второй на минимизацию температуры у свода печи и ее приближение к температуре пода, что позволяет повысить качество продукта и снизить зольность. При этом каждый из наборов, организующих внутренний каскад, в свою очередь разделен на две части, отличающиеся алгоритмами нечеткого логического вывода, таким образом, организуя гетерогенность построения внутренней структуры интеллектуального регулятора. Управление технологическим процессом производится за счет изменения угла поворота штор встроенных в стенки контейнера. Модули внутреннего каскада построены с применением двух механизмов выводов, что обеспечивает гетерогенность интеллектуальной системы: нечеткий модуль с алгоритмом вывода Сугено, связан с большими перемещениями штор контейнера; нечеткий модуль с алгоритмом вывода Мамдани, за малые изменения угла поворота – плавно.

Применение алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани приводит к получению более гладких характеристик учитывающих большее число управляемых параметров, о чем говорит наличие дополнительного переключения регуляторов внутреннего каскада в интервале времени около 1.7×10^4 с (рисунок 30). Применение упрощенного алгоритма нечеткого логического вывода позволяет сократить количество переключений, и, как следствие, придать ряду координат системы

некоторые свойства робастности, получая соответственно выигрыш по быстродействию.



1- классическая система; 2 – интеллектуальная система с алгоритмом Сугено во внешнем каскаде;
3. – интеллектуальная система с алгоритмом Мамдани во внешнем каскаде

Рисунок 30 – Динамические характеристики

Анализ представленных динамических характеристик позволяет сделать выводы о том, что применение интеллектуальных подходов при реализации систем управления дает возможность повысить качество переходного процесса, что особенно явно видно на участке прокали и появления дополнительного источника тепла. Стабилизация характеристик технологического объекта на этом участке позволяет сократить зольность конечного продукта и повысить его качество и количество.

Влияние нестационарности параметров системы оценим путем вариации коэффициента усиления в пределах $[-20\%; +20\%]$ от заданного значения для звена (низ1, рис.28), моделирующего изменения температуры пода пиролизной установки. Семейство характеристик для классической системы и интеллектуальных систем с алгоритмами вывода Сугено и Мамдани показаны на рисунках.

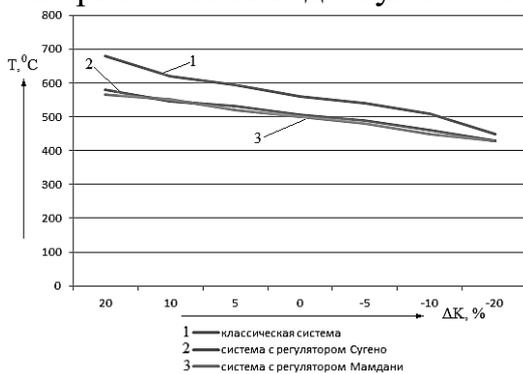


Рисунок 31 – Интегральные характеристики при изменении коэффициента усиления в пределах $[-20\%; 20\%]$

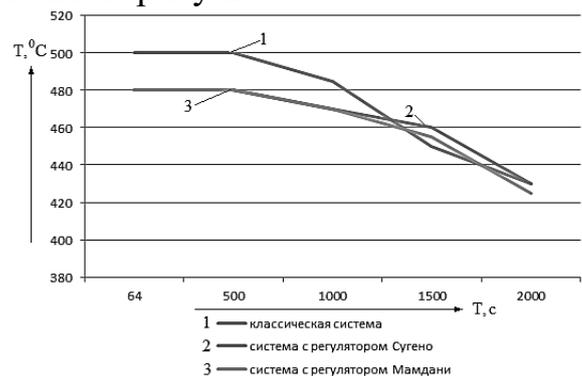


Рисунок 32 – Интегральные характеристики при изменении постоянной времени в пределах от номинально значения до 2000

Фиксируя положение системы управления в момент времени равный $0,5 \cdot 10^4$ с, построим интегральные характеристики, приведенные на рис. 31 и 32, при изменении внутренних параметров системы.

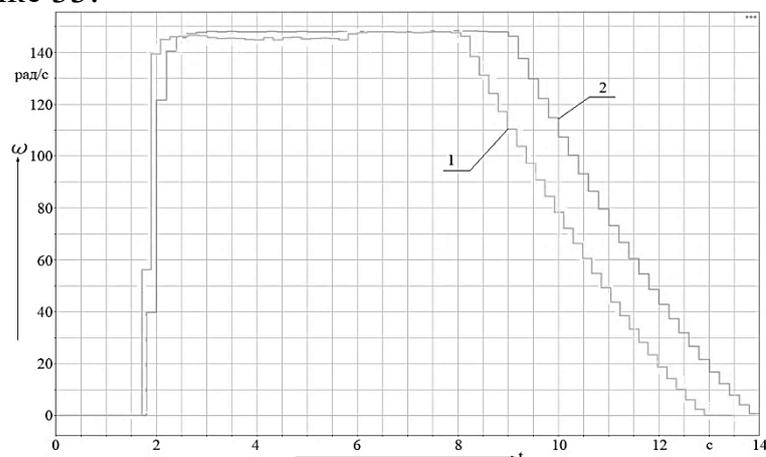
Анализ интегральной характеристики (рис. 31) показывает, что применение многокаскадного нечеткого регулятора в системе управления технологическим объектом, позволяет добиваться более стабильных динамических характеристик, снижая при этом влияние коэффициента усиления, о чем свидетельствует более линейный вид графиков для интеллектуальных систем.

Кроме того, при изменении инерционной составляющей теплового поля у пода пиролизной установки интеллектуальная система показывает некоторые адаптивные свойства. При изменении этого параметра наблюдаются незначительные отклонения в переходной характеристике интеллектуальной системы управления (рис. 28), для классической системы отклонения от заданной траектории показывают большие отклонения (рис. 32).

В седьмой главе показаны возможности по реализации развитых интеллектуальных систем управления на базе предложенного подхода с применением широко используемой элементной базы.

Нечеткая система управления с внешним интеллектуальным переключающим устройством и внутренним каскадом из двух вложенных модулей, реализована на базе программируемого контроллера SAM3X8E ARM Cortex-M3, в задачу которого входит формирование итогового сигнала соответствующего реализуемому закону управления, блока передачи данных в аппаратную часть системы и панель контроля основных параметров электропривода.

Экспериментальные зависимости изменения скорости электропривода показаны на рисунке 33.



1- классическая система; 2- система с МНЛР

Рисунок 7.6 – Переходный процесс по скорости

Результаты проведенного эксперимента показали достаточную точность и качество процедур управления, формируемых многокаскадным нечетким логическим регулятором.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено решение научно-исследовательской проблемы управления связанной с отсутствием комплексного подхода по созданию развитых нечетких систем управления позволяющих учесть такие особенности технологических процессов как многокритериальность, нестационарность, многокоординатность.

Оно выполнено на основе разработки моделей и алгоритмов, ориентированных на расширение возможностей применения нечётких систем управления, направленных на повышение интеллектуальности таких систем путём расширения их гибкости и универсальности без процедур перенастройки баз знаний и блоков дефаззификации.

Для этого разработан методологический принцип построения нечётких многокаскадных систем управления технологическими процессами, сочетающий в себе различное сочетание механизмов выводов и количества вложенных модулей. На основе исследования влияния количества элементарных модулей на основные показатели качества разработана технология многокаскадного нечёткого управления, позволяющая реализовать процедуры управления различными объектами, характеризующимися многокоординатностью, многокритериальностью и существенными изменениями диапазонов входных координат и их взаимосвязанностью.

В итоге работы предложен и теоретически обоснован феноменологический принцип формирования нечёткой системы управления, реализующей в блоке дефаззификации пространственные функции принадлежности, разработан логический регулятор, базирующийся на сочетании механизмов нечётких выводов Сугено-Мамдани и позволяющий учитывать многокоординатность и взаимосвязанность при описании технологического процесса.

На основании изложенного сформулированы следующие выводы:

1. Предложенный новый подход решения проблемы управления классами технологических объектов выявил методологическую возможность разработки универсальной математической модели, включающей в себя формальное описание и новые принципы построения многокаскадных нечетких систем, позволяющие существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки, и отличающиеся иерархичностью и модульностью формирования;

2. Установлено, что разработанные алгоритмы многокаскадного нечёткого управления позволяют сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность интеллектуальных систем регулирования технологическими процессами, за счет снижения алгоритмической сложности формируемых баз правил интеллектуальных модулей;

3. Показано, что формальное описание нечётких систем с пространственной формой функций принадлежности в блоке дефаззификации позволяет обосновать структурную и функциональную реализацию таких нечётких систем управления и учитывать ряд параметров технологического процесса, имеющих лишь косвенную связь, на основании разработанной методологии каскадного построения.

4. Установлено, что выявленные особенности построения моделей нечётких многокаскадных систем управления позволяют учитывать влияние сочетания механизмов выводов, вложенности элементарных модулей, а также гетерогенности внутреннего каскада регулятора основанного на мягких вычислениях; представлены рекомендации по настройке основных блоков развитых

нечетких систем с учетом вложенности, гетерогенности и вариации сочетания различных алгоритмов нечетких логических выводов;

5. Выявлено, что предложенный принцип решения проблемы позволяет разработать структурные и методологические решения по реализации комплексных подходов для сложных объектов управления, обеспечивающих реализацию процедур управления, адаптирующихся к изменению полноты информационного обеспечения, нестационарности и недетерминированности;

6. Установлено, что применение предложенных принципов решения задач по компенсации различного рода нелинейностей систем автоматического регулирования технологическими процессами на основе принципов многокаскадного нечеткого управления позволяет не только компенсировать произвольный вид нелинейности, но и осуществить выбор необходимого способа компенсации, а также использовать совокупность этих способов для компенсации естественных и искусственных нелинейных элементов.

Перспективы дальнейших исследований предложенной тематики могут быть направлены на: разработку и исследование подходов, позволяющих увеличивать вложенность каскадов развитых нечетких систем управления технологическими процессами; расширение возможностей по увеличению количества учитываемых критериев управления, а также их взаимодействию; созданию методик по динамическому формированию и трансформации пространственных функций принадлежности; внедрение каскадируемости при взаимодействии развитых нечетких систем и нейросетевых проектов.

Публикации по теме исследования.

Из перечня рекомендованного ВАК:

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

2. Черный С.П. Один из подходов к реализации модели нечеткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, Е.О. Полей, С.А. Васильченко, А.С. Гудим. - Ученые записки КнАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2018, № IV - 1(36), «Науки о природе и технике». – С. 25-32

3. Черный С.П. Повышение точности компенсации нелинейных элементов систем управления / С.П. Черный, В.А. Соловьев, Д.О. Савельев. - Известия вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 3. С. 157—166. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-3-157-166 (K1, RSCI)

4. Черный С.П. Разработка интеллектуальной системы управления электроприводом якорной лебедки / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, А.К. Тимофеев. - Морские интеллектуальные технологии, Научный журнал, № 4 (54), т. 1, 2021 (K2, ESCI)

5. Черный С.П. Особенности моделирования нечетких систем управления с комбинированным внутренним каскадом / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, А.К.

Тимофеев, Э.Д. Енин, М.И. Шестаков. - Ученые записки КнАГТУ 2020 № I-1(41) «Науки о природе и технике». – С. 73-82.

6. Черный С.П. Моделирование интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечетким ПИД-регулятором / С.П. Черный, А.С. Филатова, Е.Н. Землянская. - Ученые записки КнАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2015, № IV - 1(24), «Науки о природе и технике». – С.15-21

7. Черный С.П. Система совместного управления электроприводами мотор-колесо робототехнического транспортного комплекса для магистральных трубопроводов / С.П. Черный, М.А. Лямин. - Ученые записки КнАГТУ 2023 № 7(71) «Науки о природе и технике». С. 66 – 73

8. Черный С.П. Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора для управления многосоставным траловым механизмом на основе оператора сложения / С.П. Черный, В.Н. Хрульков. - Ученые записки КнАГТУ 2023 № 5(69) «Науки о природе и технике». С. 53 – 60.

9. Черный С.П. Моделирование нечеткой системы контроля городского трафика / С.П. Черный, Е.М. Муравьев, Д.Р. Иванов. - Ученые записки КнАГТУ 2024 № I(73) «Науки о природе и технике», С. 11-18. (К2, ВАК)

10. Черный С.П. Моделирование следящей системы управления с применением многокаскадного нечеткого регулятора / С.П. Черный, Бичаев И.Е. - Электротехнические комплексы и системы управления, Воронеж: Издательский дом «Кварта», 2014, №1 (33), С. 47-54

11. Сухоруков С.И. Система управления модулем подачи и позиционирования проволоки для роботизированного комплекса трехмерной печати металлических изделий / С.И. Сухоруков, С.П. Черный, А.В. Бузикаева, А.Р. Овсянников. - Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2022. Т. 65. № 3. С. 66-73. (К1, RSCI)

12. Черный С.П. Методы оценки устойчивости нечетких систем управления / С.П. Черный, С.И. Сухоруков, Д.А. Манчук.- «Вестник «ТОГУ» – № 3(34) – Хабаровск, 2014. – С.49-54

13. Гудим А.С. Особенности компенсации неоднозначных сопутствующих нелинейностей с использованием нечеткого подхода / А.С. Гудим, С.П. Черный, Д.О. Савельев. - Информатика и системы управления, 2014, №4(42) – С. 149-158.

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

15. Черный С.П. Анализ устойчивости нечетких систем управления в малом, в большом, в целом / С.П. Черный, Д.А. Манчук.- Современные наукоемкие технологии, Пенза: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2014, № 5-1 – С. 74-75

16. Черный С.П. Особенности моделирования систем управления сложными объектами, требующими учета геометрических параметров / С.П. Черный, Д.О. Савельев, Н.Р. Сбитнев, П.О. Саяпина. - Ученые записки КнАГТУ 2024 № I(73) «Науки о природе и технике», С. 4-10. (К2, ВАК)

17. Черный С.П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С.П. Черный, А.А. Гусаров.- Ученые записки КНАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2011, № II - 1(6) 2011 «Науки о природе и технике». – С.24-30
18. Черный С.П. Анализ возможностей снижения информационной избыточности нечетких регуляторов / С.П. Черный, А.А. Духно, Д.Ю. Чигрин, Б.Н. Толибов. - Ученые записки КНАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2017, № I - 2(30), «Науки о природе и технике». – С. 12-21
19. Черный С.П. Анализ влияния параметров объекта управления на основные характеристики нечеткого регулятора / С.П. Черный, А.В. Бузикаева, Е.О. Полей, Чжо Мин У. - Ученые записки КНАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2018, № I - 1(33), «Науки о природе и технике». – С. 28-33
20. Черный С.П. Оптимизация распределения функций принадлежности при синтезе нечеткого регулятора для систем управления тепловыми процессами / С.П. Черный, В.А. Соловьев, В.Г. Косицын, Е.П. Иванкова. - Журнал 1(5) "Информатика и системы управления". - Благовещенск 2003
21. Бакаев В.В. Система управления установкой пиролиза древесины с элементами искусственного интеллекта / В.В. Бакаев, В.А. Соловьев, С.П. Черный. - Журнал 1(3) "Информатика и системы управления". - Благовещенск 2002
22. Суздорф В.И. Синтез энергосберегающего управления двигателем последовательного возбуждения / В.И. Суздорф, С.П. Черный, А.В. Бузикаева. - Ученые записки КНАГТУ 2020 № III-1(42) «Науки о природе и технике». – С. 19-29 (К3)
23. Урасов Д.В. Фильтрация сигнала управления пропорциональным регулятором для электрода клапана в дуговой сталеплавильной печи // Д.В. Урасов., С.П. Черный. - Ученые записки КНАГТУ 2022 № 1(57) «Науки о природе и технике». – С. 46-51.
24. Черный С.П. Особенности реализации нечетких алгоритмов управления на базе программируемых логических контроллеров // С.П. Черный, В.Н. Хрульков - Ученые записки КНАГТУ 2022 № 1(57) «Науки о природе и технике». – С. 52-62.
25. Черный С.П. Моделирование развитой нечёткой системы управления с интеграцией внутренних модулей на основе оператора умножения // С.П. Черный, А.В. Охотников - Ученые записки КНАГТУ, 2023 № 1(65), «Науки о природе и технике». – С. 102 – 108
- Из международных наукометрических баз:*
26. Cherniy S.P. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, V.I. Susdorf, V.N. Khrulkov. - EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19. DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496
27. Cherniy S.P. Another approach to enhancement of intellectual capabilities of the fuzzy controller / S.P. Cherniy, V.A. Soloviev. - 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076154
28. Cherniy S.P. General Principals of Building the Fizzy Multi-Cascade Tracking Control Systems / S.P. Cherniy, V.A. Soloviev. - 2018 International Multi-

Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602646

29. Cherniy S.P. Modeling Multi-Cascade Fuzzy Controller with Integrated Implementation of Various Control Laws / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, V.I. Susdorf. - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) DOI: 10.1109/URALCON.2019.8877652

30. Cherniy S.P. A Model of Multi-Cascade Fuzzy Logic Controller Implemented Using Different Variations of Inference Algorithms / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, A.S. Gudim. - 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934872

31. Cherniy S.P. Fuzzy Multi-Cascade AC Drive Control System / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, A.S. Gudim. - 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602930

32. Cherniy S.P. Algorithm of fuzzy controller membership function allocation at fuzzification stage / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, V.I. Susdorf, S.A. Vasilchenko. - Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Warsaw, 2021. C. 117-125 DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_13

33. Urasov D.V. Intelligent control system for the complex of ultrasonic gas-oxygen burners / D.V. Urasov, S.P. Cherniy, V.A. Solovyev, A.V. Buzikayeva. - Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Warsaw, 2021. C. 106-116 DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_12

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

35. Susdorf V.I. Optimization of Series Motor Drive Dynamics / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, V.I. Susdorf. - 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344

36. Cherniy S. Multi-stage Fuzzy Controller for a Multi-motor System / Sergey Cherniy, Kirill Emelyanov - 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 13 December 2023, Novosibirsk, Russian Federation DOI: 10.1109/APEIE59731.2023.10347676

37. Bakaev V.V. Methodology of the control systems construction of nonstationary processes technology by the example of wood pyrolysis processes / V.V. Bakaev, S.P. Cherniy. - Proceedings of the 8-th International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists MODERN TECHNIQUE AND TECHNOLOGIES MTT' 2002 April 8 - April 12, 2002, TOMSK, RUSSIA DOI: 10.1109/SPCMTT.2002.1213789

38. Sukhorukov Sergei A Distributed Algorithm of Control Software Processing for a Robotic Laser Welding Complex / Sergei Sukhorukov, Sergey Cherniy, Sergey Bogatenkov, Igor Borodin, Ruslan Bazhenov, Olga Chuyko. - 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC), 17-19 Nov. 2020, Chelyabinsk, Russia. DOI: 10.1109/GloSIC50886.2020.9267821

39. Urasov D. Second-order aperiodic link modelling with the use of Siemens programmable logical controller SCL hardware / D. Urasov, S. Cherniy, R. Bazhenov, L. Alekseeva, I. Korosteleva. - Journal of Physics: Conference Series, Volume 1661, International Conference on Information Technology in Business and Industry (ITBI 2020) 6-8 April 2020, Novosibirsk, Russia. DOI:10.1088/1742-6596/1661/1/012111

40. Cherniy S., Intelligent Suspension Control System for Modular Trawl System / S. Cherniy, V. Khrulkov. - Proceedings - 2023 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2023, 2023, pp. 315–319. DOI: 10.1109/RusAutoCon58002.2023.10272806.

Монографии

41. Соловьев В.А. Ледообразование на линиях электропередач. Причины возникновения. Методы удаления. (Глава 5 Прогнозирующий модуль для автоматизированной системы удаления гололеда с проводов ЛЭП) / В.А. Соловьев, С.И. Сухоруков, С.П. Черный. - Владивосток: Дальнаука, 2018. – 303 с.

42. Соловьев В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В.А. Соловьев, С.П. Черный. - Владивосток, «Дальнаука», 2010, 280 с.

Патенты и свидетельства о регистрации программ

43. Углевыхжигательная печь : Пат. 2228348 РФ, 7 С 10 В 53/02, 1/04. №2002131600/12; Заявлено 25.11.2002; Опубл. 10.05.2004. Бюл. № 13

44. Программа оптимизации распределения функций принадлежности нечеткого регулятора при заданных показателях качества системы управления. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003612124/ Москва, 11 сентября 2003г

45. Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде для формирования процедур управления мобильной пиролизной установкой. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022664286 / Москва 27 июля 2022.

46. Программа реализации многокаскадного нечеткого регулятора с механизмом вывода Сугено во внешнем каскаде. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022663048 / Москва, 11 июля 2022.

47. Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для электропривода постоянного тока. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022680044 / Москва, 26 октября 2022.

48. Программная реализация нечеткого логического регулятора для управления модульной платформой по перемещению крупногабаритных высокотоннажных объектов. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2023617058 / Москва, 5 апреля 2023.

49. Программа реализации нечеткого регулятора для системы управления маломощным электроприводом. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2023617229 / Москва, 6 апреля 2023.

Другие публикации

50. Владыко А.Г. К вопросу синтеза нечетких регуляторов систем электропривода подач / А.Г. Владыко, Ю.Г. Кабалдин, В.А. Соловьев, С.П. Черный.

- Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. Докт. Техн. Наук, проф. Кабалдина Ю.Г. - Владивосток: Дальнаука, 2001 - 205 с

51. Соловьев В.А. К вопросу использования нечетких логических регуляторов в системах управления электроприводами / В.А. Соловьев, С.П. Черный, В.Г. Косицын. - В межвузовском сб. научных трудов "Электротехнические системы и комплексы" под ред. Сарбатова А.С., вып. № 6.- Магнитогорск, 2001

52. Владыко А.Г. Интеллектуальные регуляторы в системах электроприводов / А.Г. Владыко, В.А. Соловьев, С.П. Черный. - Вестник КНАГТУ: Вып.3. Сб.1. Прогрессивные технологии в специальном машиностроении и строительстве: Сб.науч.тр. / Редкол.: Ю.Г. Кабалдин (отв. ред.) и др. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2002.

53. Бакаев В.В. Повышение эффективности процесса пиролиза в мобильных углевыжигательных установках / В.В. Бакаев, Ю.В. Рубцов, В.А. Соловьев. С.П. Черный. - Актуальные проблемы лесного комплекса. Сборник научных трудов. - Брянск, 2002.

54. Гудим А.С. Интеллектуальная система управления следящим электроприводом / А.С. Гудим, В.А. Соловьев. С.П. Черный, Е.Д. Петренко.- Межвузовский сборник научных трудов «Электротехнические системы и комплексы», Магнитогорск: МГТУ, вып.16, 2009г, с.45-48

55. Соловьев В.А. Об эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередачи / В.А. Соловьев. С.И. Сухоруков, С.П. Черный. - Электротехнические системы и комплексы, Магнитогорск: Издательство ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет», 2014, №1 (22), С.14-18

56. Сухоруков С.И. К вопросу определения текущей частоты импульсов при удалении гололеда с проводов линий электропередач электродинамическим способом / В.А. Соловьев. С.И. Сухоруков, С.П. Черный, Д.О. Савельев. - Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1. № 2. – С. 10-13.

57. Черный С.П. Реализация задатчиков интенсивности с применением мягких вычислений / С.П. Черный, А.С. Гудим, Д.О. Савельев. - Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 1. № 2. – С. 14-16.

58. Sukhorukov S.I. The question of limiting characteristics of de-icing the power line wires / S.I. Sukhorukov, V.A. Soloviev, S.P. Cherniy. - 2nd International Conference on Industrial Engineering. Applications and Manufacturing. ICIEAM 2016. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911679

59. Черный С.П. Коррекция параметров нечеткого регулятора при изменении параметров объекта регулирования / С.П. Черный, А.В., Бузикаева. - International periodic scientific journal, SCIENTIFIC-WORLDJOURNAL, Issue No 15, Volume 1, (Yolnat PE, Minsk, 2017), December 2017. pp 22-26. DOI: 10.21893/2227-6920.2017-15.1-023

60. Черный С.П. Особенности реализации нечетких многокаскадных систем для управления электроприводом переменного тока. / С.П. Черный, А.В., Бузикаева. - The International Scientific Periodical Journal "Modern Technology and Innovative Technologies", Issue No 5, Vol.1, October 2018, pp 37-41, DOI 10.30890/2567-5273

61. Vasilchenko Sergey Improving Dynamic and Energy Characteristics of Electromechanical Systems with Single-Phase Rectifiers / Sergey Vasilchenko, Sergey Cherniy, Vladimir Khrulkov. - 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902
62. Susdorf V.I. Synthesis of Power-Efficient Series Motor Control / V.I. Susdorf, S.P Cherniy, A.V. Buzikayeva. - 6-9 Oct. 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271245.
63. Сухоруков С. И. Концепция формирования управляющей программы для роботизированного комплекса лазерной сварки // С. И. Сухоруков, С.П. Черный, Мешков А. С., Киба Д. А. - Ученые записки КНАГТУ 2020 № VII-1(47) «Науки о природе и технике». – С. 26-34.
64. Vasilchenko S.A. High-Speed Energy-Efficient Power Sources for Electromechanical Systems / S.A. Vasilchenko, S.P Cherniy, V.N. Khrulkov. - Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies. Warsaw, 2021. С. 126-135 DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_14
65. Savelyev D.O. Simulation of a discrete event system for process control of robotic casting / D.O. Savelyev, S.P Cherniy, A.S. Savelyeva, R.I. Bazhenov, I.V. Povkh. - Journal of Physics: Conference Series Vol 2032, 18 October 2021 № 0120802021 International Conference on IT in Business and Industry, ITBI 2021Novosibirsk DOI: 10.1088/1742-6596/2032/1/012080
66. Dubovik M. Analysis and study of cycloconverter based on rotating magnetic field transformer / M. Dubovik, V. Solovjev, V. Klimash, S. Cherniy. - 18th International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives, ACED 2021 - Proceedings. 18. 2021. С. 9462254.
67. Сухоруков С.И. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололеда на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, Д.О. Савельев, К.Е. Костин. - Ученые записки КНАГТУ, Комсомольск-на-Амуре, 2015, № III - 1(23), «Науки о природе и технике». – С.24-30
68. Sukhorukov S. Development of automatic tool calibration method for robotic machining complex / Sergei Sukhorukov, Markel Melnichenko, Sergey Cherniy, Ruslan Bazhenov, Irina Карпова, Irina Povkh, Zoya Arkhipova. - AIP Conference Proceedings 2700, 020037 (2023), doi.org/10.1063/5.0125134