

Федеральное государственное бюджетное учреждение
высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

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

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор,
Соловьев Вячеслав Алексеевич

Комсомольск-на-Амуре 2024

Оглавление

Введение.....	4
1 Глава. Обзор задач и общепринятых подходов к построению нечетких систем управления	16
1.1 Классификация нечетких логических регуляторов и возлагаемых на них задач управления.....	16
1.2 Традиционные подходы к построению нечетких систем управления. Проблемы аппаратной реализации.....	18
1.3 Анализ существующих теоретических и практических решений по разработке и проектированию нечетких систем управления	20
1.4 Роль вида, формы, распределения функций принадлежности в структуре нечеткого логического регулятора. Особенности бесэкспертного подхода... 24	
1.5 Особенности формирования базы правил нечетких логических регуляторов	32
1.6 Типовые подходы, возлагаемые на нечеткие логические регуляторы.....	34
1.7 Устойчивость нечетких систем управления. Проблемы ее оценки.....	39
1.8 Параметрическая интеллектуальность нечетких систем управления	46
1.9 Анализ влияния параметров объекта управления на структуру и характеристики нечеткого регулятора	63
Выводы по первой главе.....	84
2 Глава. Разработка математического описания нечеткого логического регулятора с развитой структурой.....	86
2.1 Разработка математического описания многокаскадного нечеткого логического регулятора для различных алгоритмов вывода	91
2.2 Разработка структурных решений построения многокаскадного нечеткого логического регулятора.....	100
Выводы по второй главе.....	128
Глава 3 Структурный и параметрический синтез многокаскадного нечеткого регулятора систем управления технологическими процессами	130
3.1 Синтез многокаскадного нечеткого логического компенсатора нелинейностей	131
3.2 Параметрический и структурный синтез многокаскадного НЛР систем управления позиционированием	141

3.3 Нейросетевые подходы при параметрическом синтезе многокаскадных нечетких логических регуляторов	180
Выводы по третьей главе	205
Глава 4 Разработка принципов построения многокаскадных нечетких логических регуляторов систем управления технологическими процессами, характеризующимися многокритериальностью	207
Выводы по четвертой главе	232
Глава 5 Структурная и функциональная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для систем управления с пространственной формой функций принадлежности	233
Выводы по пятой главе	246
Глава 6 Построение многокаскадных нечетких логических регуляторов с гомогенной и гетерогенной структурой	247
Выводы по шестой главе	266
Глава 7 Экспериментальное исследование систем управления технологическими объектами на базе многокаскадного нечеткого подхода	267
Выводы по седьмой главе	275
Заключение	276
Литература	279
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	319
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	323
ПРИЛОЖЕНИЕ 3	351
ПРИЛОЖЕНИЕ 4	380
ПРИЛОЖЕНИЕ 5	389

Введение

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. 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. Обозначенные алгоритмы чаще всего ориентированы на снижение сложности механизмов и процедур вывода, а также повышение быстродействия системы. Во втором случае реализация нечеткой системы управления ориентированы на качество формализации сложного объекта регулирования и обеспечение необходимых требований к технологическому процессу. Во всех случаях система с элементами искусственного интеллекта направлена на устранение внутренних и внешних детерминированных или недетерминированных воздействий, компенсацию целого набора сопутствующих нелинейностей, а также снижению влияния неполноты, неточности априорной информации и сокращению набора 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 быстродействие 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.

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.

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 вывода 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 быстрдействию 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.

Объект исследований - алгоритмы управления технологическими процессами объектов различной сложности на основе принципа

многоступенчатого нечеткого регулирования, реализация которого базируется на учете структурных и функциональных особенностей системы управления.

Предмет исследований - процедуры синтеза многоступенчатых 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 многоступенчатого 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 многоступенчатого нечеткого регулятора, с учетом особенностей функциональной и алгоритмической реализации его структуры.

3. Исследование особенностей функционирования многоступенчатой нечеткой системы управления 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 существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки, 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.

Достоверность полученных результатов определяется строгим использованием математического аппарата, заложенного в основу исследования, подтверждается результатами имитационного моделирования и экспериментальными исследованиями.

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

Разработана 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 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 существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки;
2. Алгоритмы многокаскадного нечеткого управления, позволяющие сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность 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;

б. 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; 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); IV Международная научно-практическая конференция «Наука в XXI веке: инновационный потенциал развития» Уфа, 2017; 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.

Структура и объем

Диссертационная работа содержит введение, семь глав, заключение, список литературы и приложения. Основная часть исследования составляет 319 страниц текста, 4 таблицы, и 236 рисунков. Список источников состоит 356 наименований.

1 Глава. Обзор задач и общепринятых подходов к построению нечетких систем управления

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.

1.1 Классификация нечетких логических регуляторов и возлагаемых на них задач управления

С точки зрения реализации процедур и законов управления для локальных систем автоматизации технологии и способы регулирования, основанные на теории нечетких множеств, 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, 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 логические регуляторы, которые выполняются на один или два входа и единственный выход, 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 1.1 представлена классификация задач, решаемых с применением систем управления, в основу которых заложены принципы мягких вычислений.

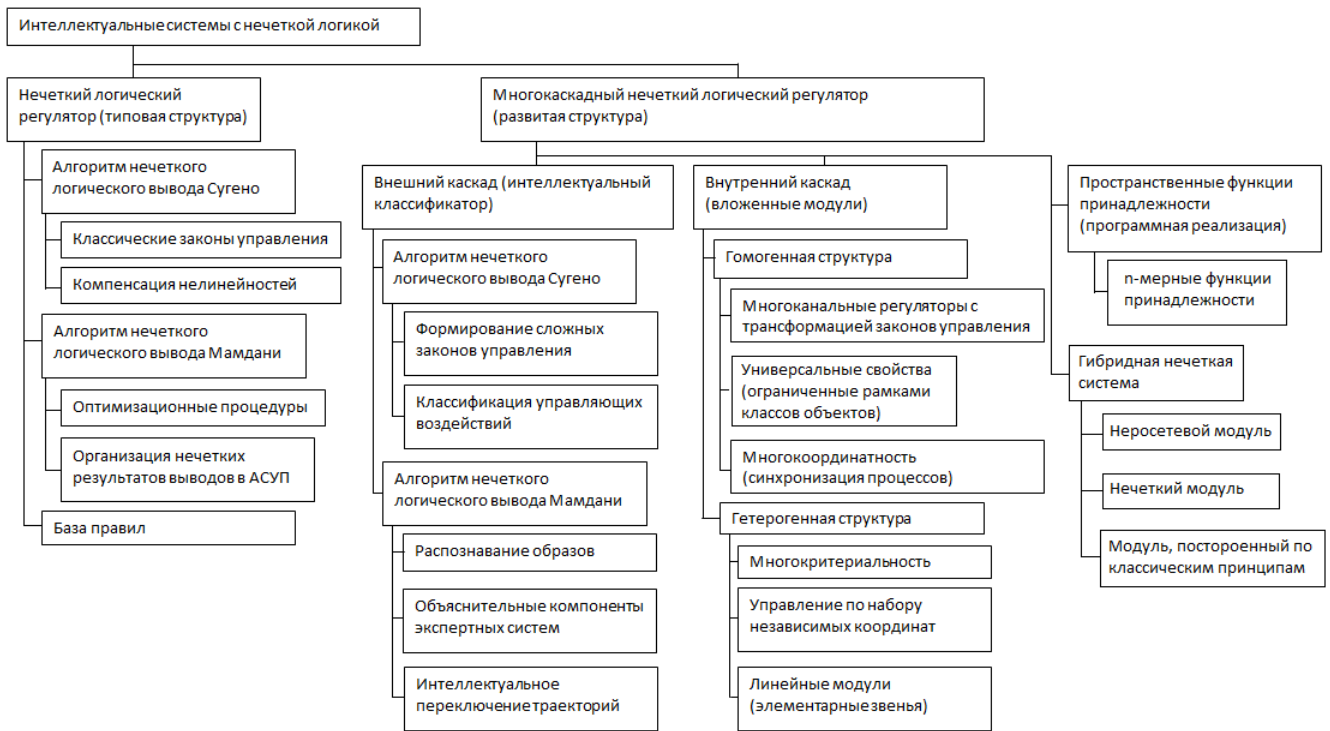


Рисунок 1.1 - Классификация нечетких систем управления по решаемым задачам.

Внедрение предлагаемой каскадной структуры в нечеткие логические регуляторы позволит существенно расширить область их применения, как с точки зрения решаемых задач, так и с позиции интеграции в другие формы и виды интеллектуальных систем.

1.2 Традиционные подходы к построению нечетких систем управления. Проблемы аппаратной реализации.

Зачастую решение задач управления сложными технологическими объектами с применением интеллектуальных систем носит 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 строятся на принципе нейросетевого подхода, другие с применением аппарата нечеткой логики. При этом

возникает 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.

Попытки достичь желаемого результата при решении задач управления технологическими объектами, имеющими сложную структуру и некую неполноту в математическом описании, вынуждает исследователя использовать интеллектуальные подходы. При этом для снижения уровня сложности общая задача дробится на составляющие, для каждой из которых используется собственный модуль. Очень часто наполнение модулей производится на основе смешанных подходов. Иными словами система управления приобретает свойства гибридности, в которой ряд управляющих модулей могут быть построены на принципах классической теории управления, нечетких алгоритмов, нейросетевых подходов и т.д.

В целом, необходимо отметить, что целый ряд типичных проблем, связанных с построением нечетких систем, в классическом их понимании, остается разрешенным лишь частично [276]. Ряд основных параметров нечетких управляющих модулей (в классической интерпретации регуляторов) определяются на основе экспертных оценок, что, в конечном счете, снижает эффективность их работы и выдвигает на первый план ошибки, обусловленные человеческим фактором. Наличие экспертных оценок в процессе синтеза нечеткого логического регулятора добавляет существенное количество сопутствующих задач, в первую очередь, связанных со сбором этих оценок, их обработкой, а также оценкой адекватности принятых решений. Исследование возможностей по реализации безэкспертных методик настройки частей блоков структуры нечеткого логического регулятора не носит системного характера и чаще всего направлены на решение локальных задач. В месте с тем, абсолютного исключения влияния эксперта в определенной предметной области добиться будет невозможно по целому ряду причин связанных как с особенностями

формализации предметной области и отсутствием достаточного уровня ее понимания со стороны специалиста в области проектирования нечетких систем, так и противоречиями, заложенными в само понятие интеллектуального подхода. Реализация синтеза нечеткой системы в полностью безэкспертном режиме может абсолютно исключить из нее интеллектуальную составляющую.

1.3 Анализ существующих теоретических и практических решений по разработке и проектированию нечетких систем управления

Наибольшее число работ, посвященных нечетким системам управления, связано с прикладными исследованиями и сводится зачастую к решению весьма конкретных задач по реализации таких интеллектуальных регуляторов для сложных объектов управления или технологических процессов, функционирующих в условиях неопределенности [142, 267, 303, 331, 335, 348, 349, 350, 356]. При этом достаточно полно анализируются особенности реализации отдельных блоков нечетких логических регуляторов в условиях конкретной поставленной задачи [161, 235, 245, 268, 282, 297, 338].

Основная масса публикаций, связанных с применением теории нечетких множеств при построении систем управления сложными объектами, зачастую ориентирована на реализацию законов управления с применением классических подходов, направленных на достижение «нормального» функционирования такого специфического объекта.

Одной из типичных задач для использования аппарата нечеткой логики является задача стабилизации положения какого либо объекта в условиях недетерминированности внешних воздействий, например посадка летательного аппарата в условиях изменения ряда погодных показателей. Особенностью применения нечеткой логики при решении подобных задач является из многокоординатность и априорная информационная

неопределенность зависимости этих координат, в том числе между собой [183, 205, 227, 262, 286, 328, 337, 354].

С целью решения подобного рода проблем был предложен подход, расширяющий возможности нечетких систем, основанный на понятии горизонтальных функций принадлежности. Применение функций принадлежности горизонтального типа позволяет повысить интеллектуальные свойства нечеткой системы управления при реализации законов регулирования в многокоординатном режиме путем расширения возможностей блоков, реализующих прямое и обратное преобразование лингвистических переменных [152, 153, 167, 168, 174, 206, 226, 260]. Кроме того необходимо отметить, что подобный подход позволяет перевести классическую вертикальную функцию принадлежности в трехмерный формат пространства [272, 271, 273, 275, 315].

В общем случае такой подход ориентирован на решение траекторной задачи слежения за динамическим объектом. При этом необходимо отметить, что классический подход не учитывал изменения внутренних параметров объекта, а также принимал одним из основных допущений детерминированность внешних возмущений. Математическая модель динамических систем с нестационарными параметрами в общем случае реализуется набором дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Для решения таких задач было введено понятие гранулированной производной, предложенной в подходе Мазарандани и позволяющей использовать в системе дифференциальных уравнений нечеткие коэффициенты [235, 237, 238, 239, 254, 255]. Рассмотренная задача нечеткого управления перемещением основана на прогнозировании интеллектуальным регулятором задающего воздействия. Система, построенная по такому принципу, реализует два нечетких компенсатора: первый формирует нечеткую обратную связь по полному вектору состояния и отслеживает задающий сигнал, второй реализует функцию нечеткого фильтра. Такая система позволяет определять постоянные внешние

возмущения и компенсировать и с учетом этого трансформировать закон регулирования. [223, 232, 278, 269, 285, 306, 307, 310]

Однако, учитывая существенную мощь предлагаемого подхода, основанного на применении горизонтальных функций принадлежности и гранулированной производной, авторами был принят целый ряд допущений, являющихся весьма типичными для подобных объектов регулирования. Кроме того, сложность заложенного математического аппарата подразумевает существенные трудности в аппаратной реализации такой интеллектуальной системы. [180, 208, 209, 217, 221, 225]

Следующий пласт задач представляет собой системы принятия решений диспетчерского управления производственными линиями и планирования очередей в рамках сложных технологических процессов [181, 182, 261, 228, 229]. Взаимодействие разноуровневых независимых нечетких систем управления производственной линией показало высокие результаты при оценке времени выполнения производственного цикла, при этом позволило системе гибко реагировать на изменения внешней обстановки и перестраивать очередности технологического процесса в реальном масштабе времени. Особенно актуально подобного класса задачи выглядят в рамках прогнозируемой доктрины Industry 4.0 [163, 175, 200, 219, 253], которую ряд исследователей приравнивает к новой технической революции. Внедрение IoT [164, 165, 207, 281, 291] в реализуемые подходы к автоматизации производственных систем существенно расширяет возможности систем мониторинга и диспетчерского управления.

В настоящее время большая часть предприятий, ориентированных на производство серийных деталей, стараются встраивать в технологические процессы ГАПС. Подобного рода модернизация производства позволяет увеличить номенклатуру выпускаемой продукции, снизить количество брака, повысить эффективность производства за счет преимущества внедрения робототехнических комплексов [86, 117], отлаженной системы управления и снижения влияния человеческого фактора.

Для проверки эффективности функционирования роботизированной линии [86] и качества формализации объектов технологического процесса, работающих в экстремальных условиях на литейном производстве, может быть использован класс математических моделей, называемых системами массового обслуживания. Функционирование таких сложных систем можно охарактеризовать, существенной нелинейностью протекающих технологических процессов с большим количеством взаимозависимых операций и формируемых ими очередностей и заявок. Классически, задачи планирования производственных процессов решаются с применением ряда стандартных подходов, для которых характерно наличие статически определенных интервалов времени реализации заданной операции и необходимостью остановки технологических линий для перебалансировки под новые виды продукции.

Особый интерес вызывает подход, основанный на внедрении в такие системы интеллектуальных модулей иерархически разных уровней [191, 176, 264]. Нечеткие регуляторы нижнего уровня решают задачи по регулировке производительности отдельных стадий производственного цикла, минимизируя при этом логистические задачи связанные с сырьевым голоданием на входе цикла и перегрузкой продукции на его выходе, и максимизируя загрузку технологического оборудования. Контроллер верхнего уровня решает стратегическую задачу по перебалансировке производственной линии в целом. Наличие интеллектуальных модулей внутри производственного процесса повышает информационную прозрачность, производительность и дает возможность к сокращению числа производственных линий.

Обобщая представленный анализ можно отметить, что большинство систем управления, базирующихся на аппарате мягких вычислений, сводятся к решению локальных задач, при этом упор делается на классические подходы в построении нечетких регуляторов. Расширение же интеллектуальных возможностей таких систем чаще всего не учитывает

такую важную составляющую как аппаратная реализация, поскольку вычислительные возможности универсальных контроллеров систем автоматизации не позволяют проектировать системы с многокоординатностью и многокритериальностью, выполняя при этом требования к основным показателям качества.

1.4 Роль вида, формы, распределения функций принадлежности в структуре нечеткого логического регулятора. Особенности бесэкспертного подхода.

Одними из базовых блоков, от которых зависят показатели качества нечеткой системы регулирования, являются блоки фаззификации и дефаззификации, формирование которых осуществляется с помощью функций принадлежности. Причем выбор этих функций, их количества, расположения и формы зачастую определяют качество настройки систем управления.

Важнейшей составляющей при настройке блоков фаззификации и дефаззификации является выбор формы функций принадлежности. Применение гладких и монотонных функций (сигмоидальные, тангенциальные, Гауссовы и т.п.) позволяют повысить как точностные характеристики системы, так и ее адаптивные свойства. Однако, аппаратная реализация регуляторов с использованием таких функций принадлежности существенно снижает показатели по быстродействию и диктует применение альтернативных аппроксимированных вариантов (треугольные, трапецевидные, z-образные и т.п.).

Выбор вариантов распределения функций принадлежности в заданном диапазоне регулирования представляет собой более масштабную задачу, поскольку она тесно связана с требованием полноты базы знаний нечеткого

регулятора. В частности, более простым вариантом распределения функций принадлежности является выбор симметричного диапазона, и получения симметричного набора нечетких продукционных правил. При таком подходе естественным образом возникают области в рамках выбранного распределения, в которых отсутствуют управляемые координаты и как следствие появляется избыточность при описании основных параметров нечеткого логического регулятора [316, 320, 323, 324, 327, 338, 343, 345].

Достаточно часто сами объекты управления оказывают влияние на распределение функций принадлежности. Для задач компенсации естественных и искусственных нелинейностей применяются распределения функций принадлежности, не содержащие нечеткой переменной в зоне нулевых значений диапазона регулирования, что четко коррелируется с необходимостью аппроксимации кусочно-непрерывной статической характеристики нелинейного элемента. Решение задач управления электроприводами распределение носит абсолютно иной характер. Например, для снижения статических ошибок и повышения быстродействия системы функции принадлежности целесообразно концентрировать в около нулевой зоне изменения сигнала управления.

Как правило, задачи распределения функций принадлежности решаются непосредственно экспертами. Однако использование таких оценок усложняет и затягивает процесс принятия решений. Поэтому для некоторых классов объектов регулирования существуют безэкспертные методики, которые ориентируются на желаемый вид сигнала управления.

Динамика любой системы управления технологическими процессами, в том числе и нечеткой описывается некоторым системой нелинейных дифференциальных уравнений вида [48, 49, 82, 109, 115]:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t - \tau) + B(t)u(t) + G(t)w(t - \theta) + H(x(t));$$

где $A(t)$, $B(t)$, $G(t)$ – соответственно матрицы системы, управления и возмущений, $x(t)$ и $u(t)$ – соответственно векторы координат состояния и

управляющего воздействия, $w(t)$ - возмущающее воздействие, τ и θ - соответственно величины запаздывания, обусловленные внутренними параметрами объекта управления и внешними возмущающими воздействиями, $H(x(t))$ -составляющая, которая определяет нелинейные свойства объекта регулирования. НЛР строится с применением типичных подходов с использованием механизма вывода Мамдани и реализуется на основе четырех основных этапов: фаззификация, логический вывод, композиция, дефаззификация. Набор продукционных правил для случая с произвольным количеством входных переменных и единственной лингвистической переменной на выходе могут быть записаны в виде:

П1: Если «входной сигнал x_1 » есть A^1_1 и ... и «входной сигнал x_n » есть A^1_n то «сигнал управления u » есть B^1

П2: Если «входной сигнал x_1 » есть A^m_1 и ... и «входной сигнал x_n » есть A^m_n то «сигнал управления u » есть B^m

Нечеткий вывод: «сигнал управления u » есть B' ,

где $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T = \bar{x}$ - вектор входного сигнала, u - скалярная величина сигнала управления. X_i является универсальным множеством для каждой лингвистической переменной x_i , а U - соответственно универсальным множеством u . Обозначая значения i -ых лингвистических переменных x_i и u через A^j_i и B^j $j = \overline{1, m}$ соответственно, получим нечеткое отношение вида

$$\mu_{A^j_i}(x) : X_i \rightarrow [0,1] \text{ и } \mu_{B^j}(u) : U \rightarrow [0,1].$$

Подобные нечеткие отношения формируются с использованием знаний экспертов для каждой лингвистической переменной каждого продукционного правила и определяется:

$$(A^j_1 \text{ и } A^j_2 \text{ и } \dots \text{ и } A^j_n) \rightarrow B^j;$$

$$\mu_{R^j}(x_1, x_2, \dots, x_n, u) = \mu_{A^j_1}(x_1) \mu_{A^j_2}(x_2) \dots \mu_{A^j_n}(x_n) \mu_{B^j}(u);$$

для m нечетких продукционных правил нечеткое отношение R будет определяться согласно выражению:

$$\mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n, u) = \max_{j=1}^m \mu_{R^j}(x_1, x_2, \dots, x_n, u);$$

В случае, если нечеткие термы лингвистической переменной входного сигнала x_i принимают значения на нечетких множествах $A_i, i = \overline{1, n}$, то нечеткое множество B^j лингвистической переменной сигнала управления, при условии консеквент выводимой структуры продукционной системы, определяется на основе импликационных связей и имеет вид:

$$\mu_{B^j}(u) = \max_{x_1, x_2, \dots, x_n} \left\{ \left[\prod \mu_{A_i^j}(x_i) \right] \cdot \left[\max_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right] \cdot \mu_{B^j} \right] \right\};$$

Пусть нечеткие подмножества B^j имеют вид:

$$\mu_{B^j}(u) = \begin{cases} 1, & u = \lambda^j; \\ 0, & u \neq \lambda^j; \end{cases}$$

где λ^j - значения сигнала на выходе нечеткого регулятора в каждый момент времени. В этом случае можно записать:

$$\mu_{B^j}(u) = \begin{cases} \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i), & u = \lambda^j; \\ 0, & u \neq \lambda^j \end{cases};$$

Приведения к четкости может быть реализовано любым методом приведения, но максимальную точность показывает метод центра тяжести. Тогда выходной сигнал нечеткого логического регулятора в дискретной форме можно определить по формуле:

$$u = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda^j \left[\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right]}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i)};$$

Обозначим:

$$\zeta_j(\bar{x}) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i)}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i)};$$

тогда сигнал управления, формируемый нечетким логическим регулятором, будет иметь вид:

$$u(\bar{x}, \bar{\lambda}) = \sum_{j=1}^m \lambda^j \zeta_j(\bar{x}) = \bar{\lambda}^T \zeta(\bar{x});$$

Таким образом, при соблюдении условий полноты и непротиворечивости продукционной базы правил, согласно выражению полученному для сигнала управления, НЛР может быть описан в виде произведения двух функций, вид которых определяются заданным диапазоном регулирования функций принадлежности, их формой, распределением, а также алгоритмом нечеткого логического вывода.

Если положить, что объект управления описывается упрощенными математическими выражениями и известны критерии оптимизации, то можно найти выражение для желаемого управляющего воздействия, обеспечивающего требуемые показатели качества. Желаемое управляющее воздействие может быть сформировано на основании функционала качества, который представлен в виде следующей:

$$J = \int_0^{\infty} [m^2 \gamma^2(\Psi) + c^2 \dot{\Psi}^2(t)] dt;$$

где $\Psi(t)$ - произвольная кусочно-непрерывная, дифференцируемая функция и $\Psi(0)=0$, $\gamma(\Psi)$ - непрерывная, дифференцируемая, однозначная $\forall \Psi$ функция, с условием $\gamma(0)=0$ и $\gamma(\Psi) \cdot \Psi < 0$ при $\forall \Psi \neq 0$, а m, c – постоянные коэффициенты.

С учетом минимизации приведенного выше функционала выходной сигнал формируемый нечетким логическим регулятором имеет вид:

$$u = -\frac{1}{b} \left[\frac{\partial \Psi(\bar{x})}{\partial x_n} \right]^{-1} \left[\frac{1}{T} \gamma(\Psi) + \sum_{k=1}^n \frac{\partial \Psi(\bar{x})}{\partial x_k} f_k(\bar{x}) \right];$$

При условии выполнения требований полноты и непротиворечивости базы знаний НЛР позволяет реализовать желаемую процедуру управления максимально приближенную к требуемому закону регулирования и зависящую от $\bar{\lambda}$ и $\zeta(\bar{x})$. Синтез нечеткого логического регулятора можно свести к оптимальному распределению функций принадлежности, в заданном диапазоне регулирования, при их фиксированном числе положив, что вектор $\bar{\lambda} = const$.

Учитывая, что форма функций принадлежности и их распределение по диапазону регулирования описываются набором логических операций, то для построения НЛР целесообразно применять сочетание математического и графо-аналитического подходов с применением универсальной шкалы, предложенной в [89].

Поэтому задача синтеза НЛР может быть сведена к отысканию таких формы и количества функций принадлежности, которые при всех указанных выше ограничениях и допущениях обеспечивали бы, на базе предложенного механизма нечеткого логического вывода, необходимый вид и форму сигнала управления.

В случае, когда заранее известна форма управляющего воздействия и закон изменения входного сигнала регулирования, проблема может быть

сведена к отысканию желаемой функции отображения [36, 37, 76, 101]. В месте, с тем при реализации алгоритма поиска такой функции отображения необходимо определить ряд ограничений.

1. Формирование желаемого закона регулирования производится на основе единственной лингвистической переменной, по одному входному сигналу НЛР. Дополнительные лингвистические переменные, формирующие входной сигнал НЛР могут быть учтены в дальнейшем при формализации дополнительных корректирующих сигналов.

2. Основная масса систем регулирования тепловыми процессами описываются высокой инерционностью, устойчивостью и ограниченным видом формируемых законов регулирования, а именно аperiodического и колебательного характера

На рисунке 1.2 представлена абстрактная система координат, на которой показан единичный квадрат $x \rightarrow [0;1]$ и $y \rightarrow [0;1]$. В таком случае функция отображения реализует копирование равномерно распределенных без искажений.

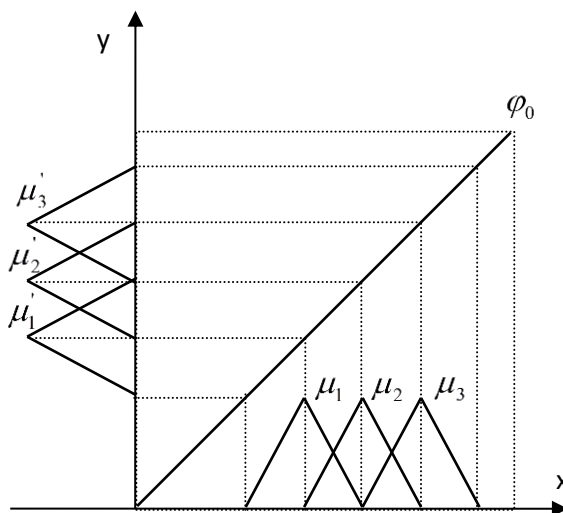


Рисунок 1.2 - Обобщенная координатная система.

В случае когда желаемый сигнал управления формируемый НЛР имеет форму, показанную на рисунке 1.3.

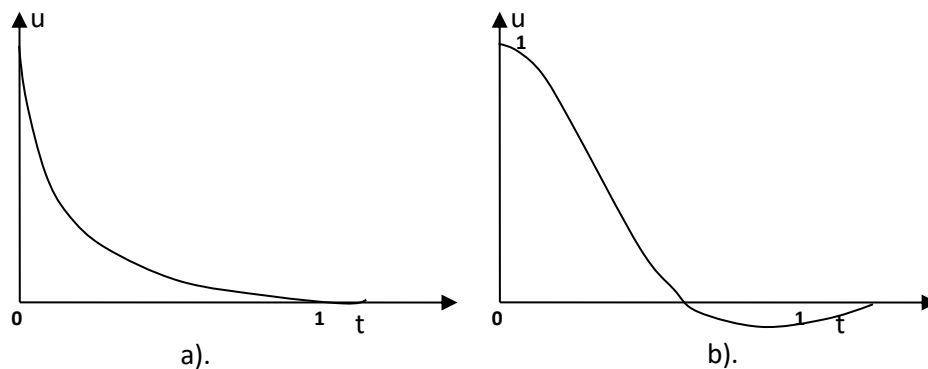


Рисунок 1.3 – Возможный вид выходного сигнала регулятора.

Далее производится преобразование входного сигнала в функцию $\varphi = u(-t)$, соответствующую прохождению сигнала управления в обратном направлении (рис. 1.4).

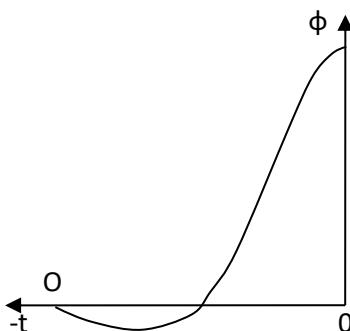


Рисунок 1.4 - Преобразованный сигнал управления.

При условии, что сигнал управления, реализуемый НЛР, по истечении переходного процесса стремится к нулевому положению, то функция отображения будет показывать свои максимальные значения. Поэтому расположение функции необходимо выполнить таким образом, чтобы касательная к точке O определила угол поворота искомой системы координат относительно φ -функции отображения (рис. 1.5).

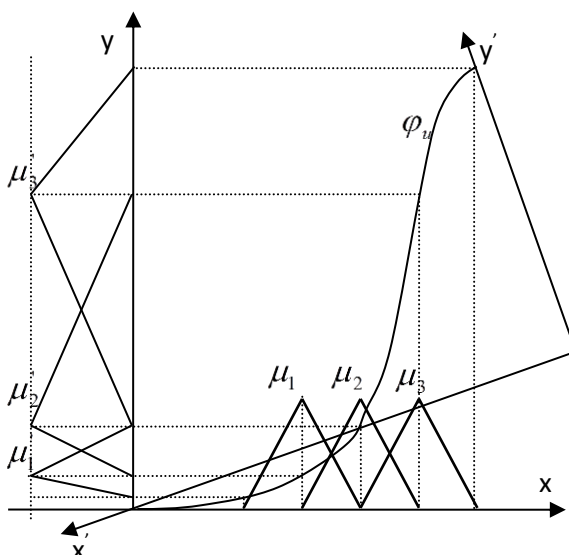


Рисунок 1.5 - Координатная система отражения функций принадлежности.

Такой поворот координатной системы относительно касательной функции отображения приведет к изменению равномерного распределения функций принадлежности. При этом произойдет их необходимая концентрация в окрестности нулевой зоны диапазона регулирования и растяжение на краях этого диапазона [105]. Представленный алгоритм реализует возможности по безэкспертной настройке некоторых модулей НЛР, но необходимо отметить, что данный подход приемлем только при решении частных задач, когда известен вид желаемой динамической характеристики выходного сигнала.

1.5 Особенности формирования базы правил нечетких логических регуляторов

Еще одним из важных элементов в составе НЛР является база правил (БЗ). На сегодняшний день при настройке и наполнении базовой части, реализующей непосредственно механизм вывода в нечеткой системе управления, имеется целый ряд узких мест. Основными требованиями, которые сформулированы для эффективного функционирования этой

базовой части нечеткого логического регулятора, являются полнота и непротиворечивость. Свойство полноты продукционной базы правил определяет ее способность к наиболее точному ее соответствию проблемной области и качественному представлению возможного набора текущих ситуаций [202, 329, 299, 201, 352, 284, 322]. Одним из решений, позволяющих предотвратить отсутствие полноты базы правил, является реализация полного перебора всех возможных сочетаний нечетких термов во всех лингвистических переменных [324, 332, 334, 340, 341, 342, 344, 346]. Однако такой подход существенно снизит быстродействие всей нечеткой системы управления и сведет к минимуму возможности по ее реализации на аппаратных платформах промышленных логических контроллеров. Непротиворечивость определяет отсутствие системных ошибок, связанных с совпадающими антецедентными частями правил и различными консеквентами. Проверка базы на противоречивость осуществляется путем перебора и сравнения всех правил, составляющих базу знаний нечеткого регулятора. При этом, необходимо отметить, что каких-либо автоматизированных или формализованных алгоритмов проверки на это требование нет.

Использование любого подхода к проектированию НЛР не исключает возможности получения БЗ, не удовлетворяющей условию о непротиворечивости наполняющих ее правил. Как известно [85, 88], непротиворечивость системы управляющих правил обычно трактуется как отсутствие правил, имеющих сходные посылки и различные или взаимоисключающие следствия. При этом, степень непротиворечивости j -го и k -го правил можно задать величиной:

$$C_{jk} = \left| \bigcup_{E_1} (\mu_{A_1^j}(\varepsilon_1) \wedge \mu_{A_1^k}(\varepsilon_1)) - \bigcup_{E_2} (\mu_{A_2^j}(\varepsilon_2) \wedge \mu_{A_2^k}(\varepsilon_2)) \right|;$$

Механизмы проверки баз правил нечетких регуляторов реализуются только для классических продукционных систем с консеквент выводимой

структурой на основе простого перебора, однако даже при таких недостатках они способны сократить ее объем, и как следствие ускорить работу всей интеллектуальной системы.

1.6 Типовые подходы, возлагаемые на нечеткие логические регуляторы

В перечне задач управления, которые на текущий момент можно назвать типовыми для применения систем с нечеткой логикой, являются задачи по реализации интеллектуального ПИД-регулятора [53, 56]. Существуют подходы позволяющие внедрять в ПИД-закон управления интеллектуальные составляющие только по части каналов регулятора, другие реализуют такие системы управления в едином нечетком контроллере [158, 224, 231, 246]. Наиболее обобщенный вариант реализации нечеткого ПИД-регулятора показан на рисунке 1.6. Нечеткие модули представленные в каждом из каналов регулирования позволяют формировать автономно одну из составляющих этого закона пропорциональную, интегральную или дифференциальную.

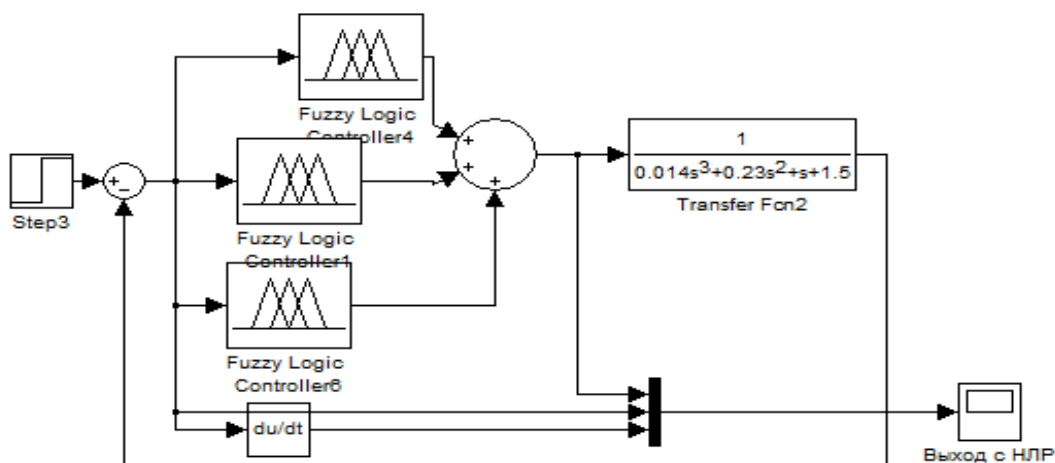


Рисунок 1.6 – Структурная схема нечеткой системы реализующей ПИД-закон регулирования поканально.

С точки зрения простоты исполнения и экономии вычислительных ресурсов на текущий момент приоритет отдается механизму нечеткого вывода Сугено, и в частности его упрощенному варианту. На основе таких алгоритмов выводов крайне эффективно реализуются классические линейные законы регулирования, например ПИД-регулирование.

Нечеткий регулятор, при его типичной настройке, в своей структуре содержит три основных элемента, соответствующих этапам алгоритма нечеткого логического вывода. На первом этапе производится преобразование классической переменной в лингвистическую, затем применяется непосредственно сам механизм выводов и процедура свертки, на последнем этапе выполняется обратное преобразование переменных [1, 2, 83, 120, 121, 122, 119, 230, 259].

Нечеткий логический регулятор реализует пропорциональную, интегральную и дифференциальную составляющие исходного классического регулятора [24, 68, 117, 155, 178, 210, 215, 317, 333] и состоит из единственных информационных входа и выхода. Функциональная схема нечеткого логического регулятора реализующего ПИД-закон управления поканально представлена на рисунке 1.7.

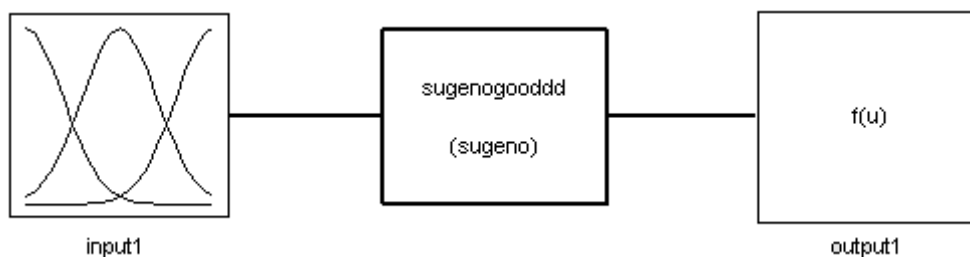


Рисунок 1.7 – Функциональная схема нечеткого логического регулятора.

Настройка основных параметров нечеткого регулятора осуществляется в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1.7. Качество настройки любого нечеткого логического регулятора, независимо от используемого в его структуре алгоритма вывода, определяется качеством формализации заданной физической величины при помощи лингвистической переменной.

Настройка НЛР на любой линейный закон регулирования, например ПИД-закон представляет собой типичную задачу. В классических системах основным сигналом управления является сигнал ошибки (ε) который и формализуется понятием лингвистической переменной. Для удобства реализации моделей и простоты выполнения основных этапов нечеткого вывода в качестве функций принадлежности элементов базовых термножеств примем треугольные функции принадлежности.

При отсутствии специальных требований к показателям качества системы регулирования и виду переходной характеристики, а также для снижения алгоритмической нагрузки на продукционную базу правил зададимся количеством элементов в базовом термножестве на уровне пяти. Базовое термножество определяется следующим набором: $T = \{S, PS, PM, PB, PVB\}$, что интерпретируется как «малое», «положительное малое», «положительное среднее», «положительное большое», «положительное очень большое».

Количественные показатели нечетких переменных можно определить на основании максимальных отклонений при изменении величины заданного параметра. Распределение функций принадлежности термов производится либо в результате обработки мнений экспертов в заданной предметной области, либо на основании безэкспертных методов. [18, 21, 34, 118, 123, 301]. На основании данных имитационной модели изменение сигнала ошибки принято в интервале $[-0,05; 1]$. Описание лингвистической переменной «ошибка» показано на рисунке 1.8.

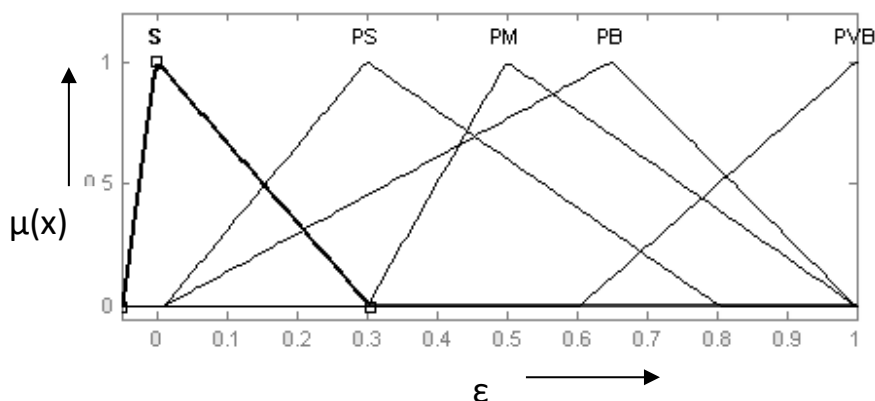


Рисунок 1.8 – Распределение функции принадлежности лингвистической переменной «ошибка системы».

Выходные лингвистические переменные в базовом терм множестве содержат три элемента. Такое терм-множество описывается набором нечетких переменных $TI = \{NS, PS, PB\}$, в следующей нотации: «отрицательно малое», «положительное малое», «положительное большое».

Выхода регулятора формирующего пропорциональную составляющую ПИД-закона регулирования настраивается на интервал $[-4; 16]$.

Наиболее емким компонентом любого механизма нечеткого вывода является база правил [83, 93, 97, 116, 194, 199], формируемая на основе целого набора мнений экспертов в заданной предметной области. Тогда лингвистически, на основе продукционной модели представления знаний перечень управляющих правил реализуется следующей нотацией:

Если сигнал ошибки больше нуля и несущественно растет, то сигнал управления имеет малое положительное значение

Если сигнал ошибки имеет очень большое положительное значение, то сигнал управления будет нарастать с большим положительным значением.

Если сигнал ошибки будет снижаться, то сигнал управления также будет снижаться.

На основании представленных правил продукционная база знаний нечеткого логического регулятора с механизмом вывода Сугено может быть сформирована в следующем виде:

Если «ошибка системы» есть PB , то «сигнал управления» = 6,

Если «ошибка системы» есть PVB , то «сигнал управления» = 14.54,

Если «ошибка системы» есть PM , то «сигнал управления» = -2,

Если «ошибка системы» есть PS , то «сигнал управления» = -2.

Оценим базу знаний нечеткого регулятора по основным показателям [19, 20, 303, 314]. Требование полноты продукционной системы представления знаний определяют по следующему выражению:

$$X = \bigcup_{i=1}^n \text{supp } A_i$$

где $\text{supp } A_i$ - носитель нечеткого множества A_i .

Данную формулу можно проинтерпретировать, как отсутствие нулевых степеней принадлежности для предпосылок каждой нечеткой переменной каждого правила для любого текущего состояния системы управления технологическим процессом.

В нечеткой системе управления представленной на рисунке 1.6 отсутствуют управляющие правила с нулевой антецедентной частью, что говорит о выполнении требования полноты.

Требование непротиворечивости набора подукций может быть определено как отсутствие управляющих правил с одинаковыми антецедентами и взаимоисключающими консеквентами.

На первом этапе оценивается непротиворечивость каждой пары правил по формуле:

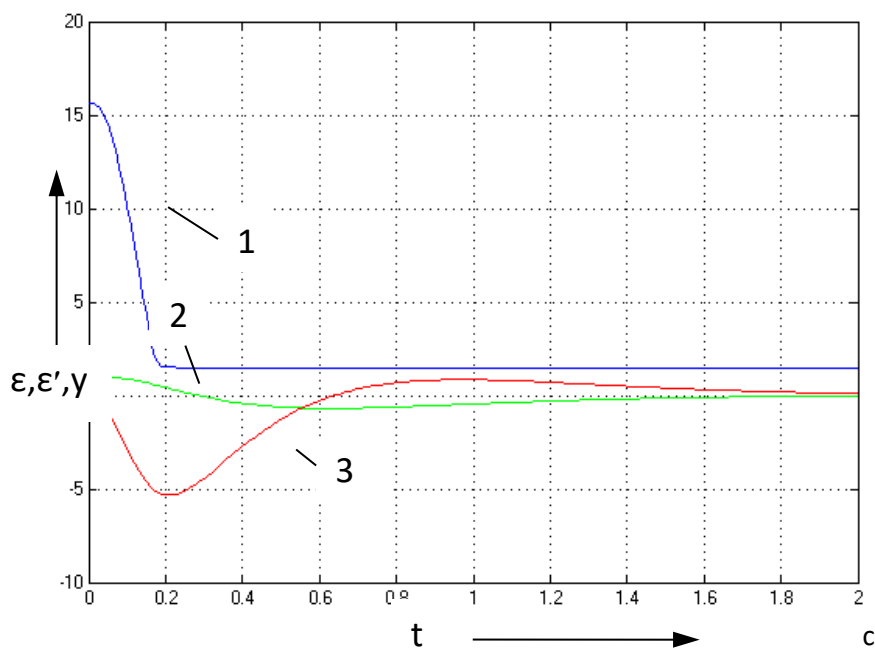
$$C_{jk} = \left| \bigcup_{E_1} (\mu_{A_1^j}(E_1) \wedge \mu_{A_1^k}(E_1)) \right|$$

Вторым этапом выполняется суммирование всех элементов попарного сравнения:

$$C_j = \sum_{k=1}^n C_{jk}$$

Вывод о непротиворечивости набора управляющих правил продукций делается путем сравнения значения суммы с общим количеством элементов базы знаний.

Графики характеристики процессов в системах управления с классическим регулятором и НЛР представлены на рисунке 1.9.



1 – выход регулятора; 2 – ошибка системы; 3 – производная ошибки

Рисунок 1.9 – переходные характеристики в системе с нечетким регулятором.

Правомерность применения нечеткого логического регулятора иллюстрируют графики переходных процессов представленные на рисунке 1.9. Выше приведенный материал наглядно иллюстрирует, что применение нечеткого подхода позволяет реализовать практически любой классический закон управления в системе без потери качества регулирования.

1.7 Устойчивость нечетких систем управления. Проблемы ее оценки.

Одной из важнейших проблем характерных для систем управления в целом является задача определения устойчивости. Дополнительную остроту этой проблеме добавляет расширение классов объектов управления до плохо формализуемых, слабоструктурированных, эволюционирующих в процессе функционирования [6, 15, 41, 147, 171, 179, 185, 220, 279]. Применение интеллектуальных подходов и систем для которых характерны модули повышения доверия и объяснительные компоненты, а также с учетом

прикладного характера задач проверка устойчивости системы управления представляется проблемой особой важности. Как было показано выше интеллектуальные технологии управления применяются для решения задач контроля полетов авиационного транспорта, навигации судов различного назначения и особенно в системах управления и диагностики медицинского оборудования [27-32, 35, 106, 113, 137, 170, 187].

Процедуры управления, реализуемые нечеткими регуляторами и интеллектуальными системами, в целом можно определить как динамически трансформируемые сложные законы регулирования, адаптируемые к ряду детерминированных и недетерминированных воздействий с наличием динамически варьируемой нелинейной структуры. В классической теории автоматического регулирования существует целый арсенал методов как прямой так и косвенной оценки устойчивости систем управления, однако вопросы применимости этих методов для систем с нечеткой логикой остается открытым.

Определение устойчивости системы управления с нечетким логическим регулятором можно показать на простом примере, представляющем собой довольно типичную задачу, где в качестве эталона рассматривается двухконтурная система подчиненного регулирования. Интеллектуальная система управления технологическим процессом выполняет функции регуляторов тока и последовательно на основе двух алгоритмов нечеткого логического вывода Мамдани и Сугено. В ходе анализа систем управления выполняется варьирование параметров основных блоков механизмов выводов, а именно количество и форма нечетких термов лингвистических переменных на входах и выходе интеллектуальных модулей.

Лингвистические переменные определяют понятия двух информационных входов соответствующих «сигналу ошибки по току» и «скорости изменения сигнала ошибки по току». Базовые терм-множества заданных переменных представляют собой набор из пяти нечетких термов

$[MM(--), M(-), Z(0), P(+), PP(++)]$ с функциями принадлежности аппроксимированного вида. Далее при использовании расширенного терм-множества количество нечетких переменных будет увеличено до девяти.

На рисунке 1.10 представлено базовое терм-множество выходной лингвистической переменной нечеткого логического регулятора построенного с использованием алгоритма Мамдани

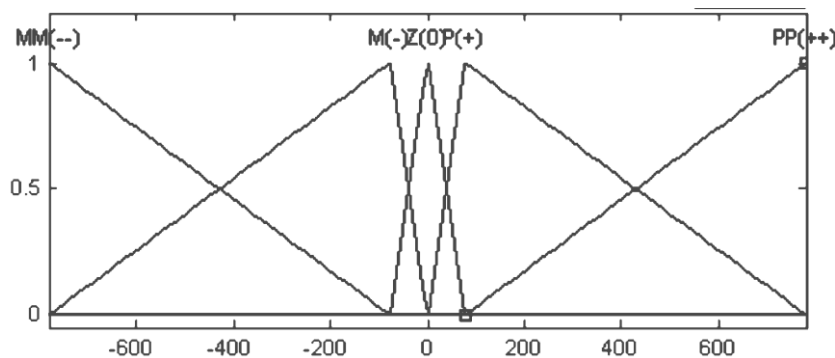


Рисунок 1.10 - Базовое терм-множество выходной лингвистической переменной.

При реализации нечеткого регулятора с алгоритмом вывода Сугено, в частности применения упрощенного алгоритма нечеткого вывода, функции приведения к четкости [302, 308, 311, 313] выполняются с использованием набора постоянных коэффициентов состоящего из пяти элементов в базовом $[MM(--), M(-), Z(0), P(+), PP(++)]$ и девяти в расширенном $[MH(--), MB(--), MM(--), M(-), Z(0), P(+), PP(++), PB(++), PH(++)]$ терм-множествах.

Продукционная база знаний нечеткого логического регулятора с консеквент выводимой структурой содержит пять правил:

Если «ошибка_по_току» есть $MM(--)$ то «сигнал_управления» есть $MM(--)$

Если «ошибка_по_току» есть $M(-)$ то «сигнал_управления» есть $M(-)$

Если «ошибка_по_току» есть $Z(0)$ и «скорость_изменения_ошибки_тока» есть $Z(0)$ то «сигнал_управления» есть $Z(0)$

Если «ошибка_по_току» есть $P(+)$ то «сигнал_управления» есть $P(+)$

Если «ошибка_по_току» есть $PP(++)$ то «сигнал_управления» есть $PP(++)$

Для исследования устойчивости в малом проведем рассмотрим двух контурную интеллектуальную систему управления с подчиненным регулированием представлена на рисунке 1.11.

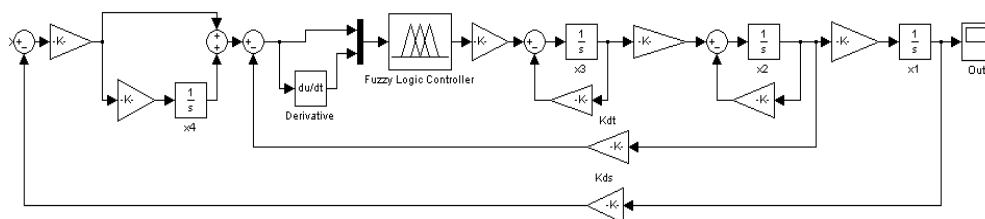
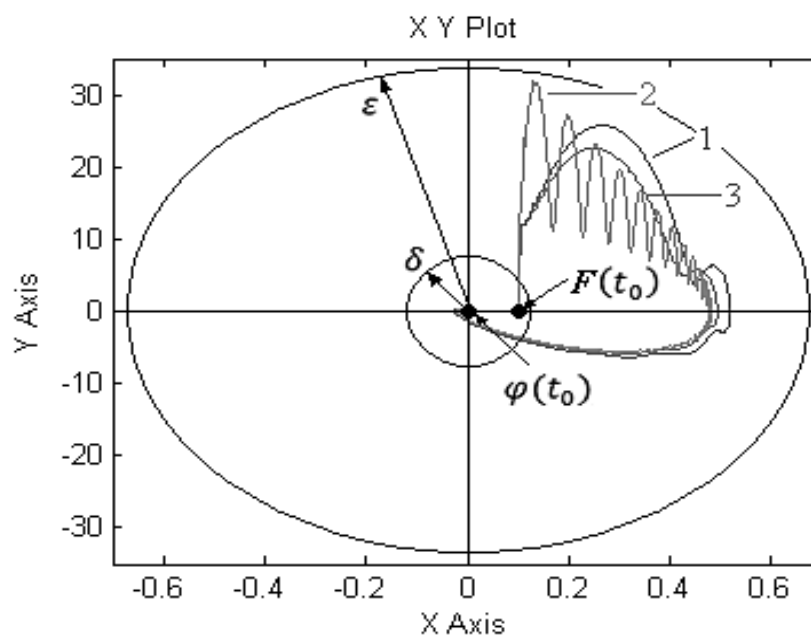


Рисунок 1.11 - Структурная схема интеллектуальной системы управления.

Для определения устойчивости системы по методу Ляпунова проанализируем поведение систем регулирования с классическим регулятором и нечеткими регуляторами построенными с использованием алгоритмов вывода Сугено и Мамдани. Фазовые траектории систем управления представлены на рисунке 1.12.



1 – с классическим регулятором;

2 – регулятор с алгоритмом вывода Мамдани;

3 – регулятор алгоритмом вывода Сугено

Рисунок 1.12 - Фазовые траектории различных систем управления.

Анализ фазовых траекторий рисунка 1.12 показал, что все системы управления, имеют один устойчивый фокус. Кроме того, все точки фазовой плоскости принадлежат ε -окрестности и начинаются в δ -окрестности. Устойчивость в малом можно определить на основании движения фазовой траектории от положения равновесия $\varphi(t_0)=0$ в δ -окрестности и дальнейшем стремлении к нему при условии $t \rightarrow \infty$ (рис. 1.13).

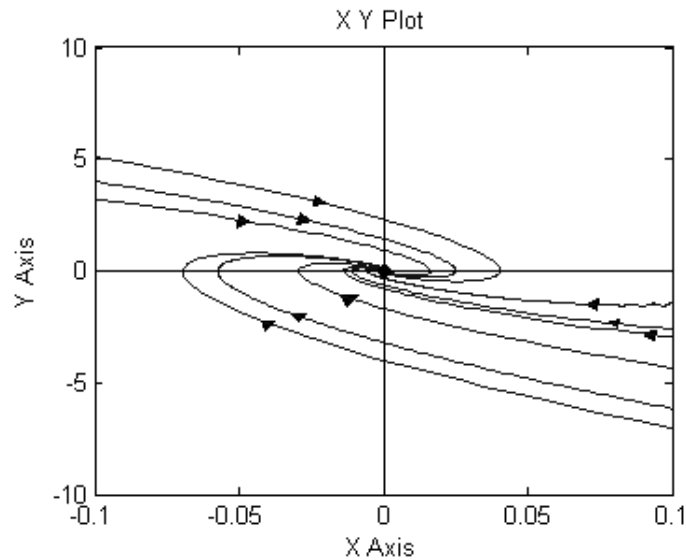
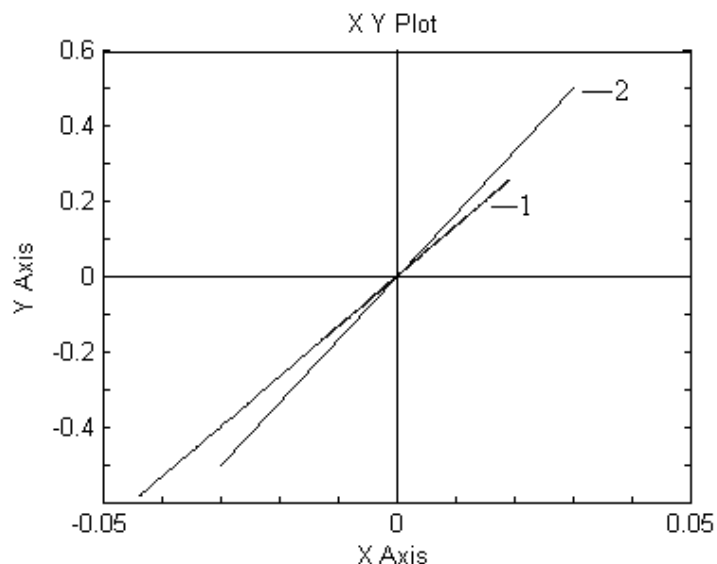


Рисунок 1.13 - Фазовый портрет нечеткой системы с регулятором Мамдани.

Для нелинейных систем, при оценке устойчивости, целесообразно использовать критерий Попова, который позволяет анализировать системы с не дифференцируемыми статическими характеристиками и сложно поддающиеся линеаризации обычными методами. Необходимо отметить, что нечеткий логический регулятор является существенно нелинейным звеном со статической характеристикой, представленной на рисунке 1.14, кривая 1.



1 – исходная; 2 – на границе устойчивости $F(x) = k*x$

Рисунок 1.14 - Статическая характеристика нечеткого логического регулятора.

Анализ графика 1.14 показывает, что при $k = 5/3$ координаты точки амплитудно-фазовой частотной характеристики, через которую будет проходить прямая статической характеристики – $(-0.6; j0)$ (рис. 1.14, кривая 2). Построим амплитудно-фазовую частотную характеристику линейной части системы (рис. 1.15).

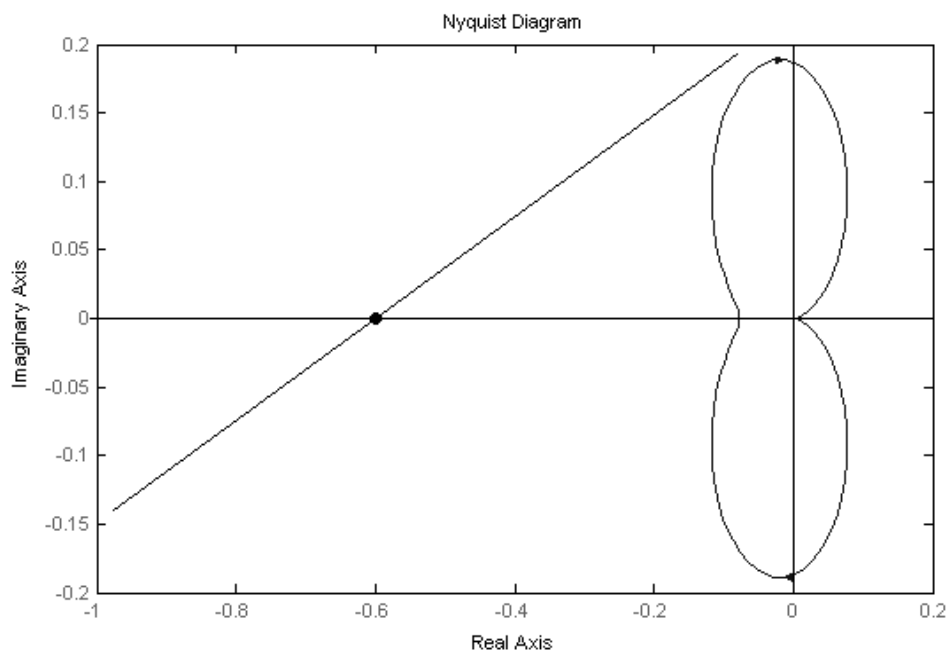


Рисунок 1.15 - АФЧХ линейной части системы.

Согласно определению и опираясь на результаты моделирования, представленные на рисунке 1.15, можно сделать вывод об устойчивости нечеткой системы управления по критерию Попова, поскольку годограф амплитудно-фазовой частотной характеристики расположен полностью правее прямой, проходящей через точку $(-1/k; j0)$, с угловым коэффициентом q [27, 29, 30, 32, 170].

Вместе с тем, критерий устойчивости Попова представляет собой только достаточное условие определения устойчивости и позволяет определять только неустойчивые системы. Необходимым условием устойчивости систем автоматического регулирования является критерий устойчивости Найквиста, но он справедлив для линейных систем. Таким образом, для определения устойчивости нечетких систем управления целесообразно применять совокупность критериев, когда согласно критерию Попова определяется достаточное условие, а условие необходимости будет связано с критерием Найквиста.

Учитывая особенности связанные функционированием нечетких модулей, ни один из предложенных методов не позволяет дать однозначной оценки по устойчивости таких интеллектуальных систем. Однако определение устойчивости с использованием критериев Попова и Найквиста, в отличие от метода Ляпунова, позволяет нам однозначно оценить устойчивость системы в некоторых рамках ограниченных начальными условиями. Вместе с тем необходимо отметить, что такие методы оценки устойчивости неприменимы для целого ряда нелинейных элементов при анализе систем управления построенных по классическим принципам. Некоторая ограниченность классических методов для оценки устойчивости нечетких систем управления связана с тем, что нечеткий регулятор представляет собой нелинейный элемент с динамически изменяемой структурой и характеристиками. В целом предлагаемые подходы к оценке устойчивости систем управления, построенных на базе теории мягких вычислений, основанные на классических методах в силу своей

ограниченности поставленную задачу решают лишь локально, без учета динамики изменения статической характеристики нелинейности нечеткого логического регулятора. Преодоление такой проблемы становится возможным в случае применения подхода основанного на многокаскадном нечетком управлении, при котором возможны интеллектуальные переключения траекторий движения системы и формирование функций принадлежности пространственной формы.

Поэтому для общеизвестных подходов и форм реализации систем управления основанных на теории нечетких множеств не представляется возможным определить алгоритмы и решения, обладающие достаточной степенью универсальности.

1.8 Параметрическая интеллектуальность нечетких систем управления

Зачастую процесс синтеза нечеткой системы с применением общепринятых подходов сопровождается целым рядом настроек проводимых с определенным запасом или без контроля этих настроек на наличие информации, представляющей собой некоторую избыточность [5, 11, 125]. С учетом реализации таких интеллектуальных систем с применением универсальных программируемых, промышленных логических контроллеров такая информационная избыточность может приводить к существенному сокращению быстродействия и применению гораздо более дорогостоящего оборудования. В общем задачи по снижению информационной избыточности нечеткого логического регулятора могут решаться сначала как стандартная задача синтеза нечеткой системы, а затем сокращением и перенастройкой основных блоков регуляторов в сторону упрощения. Решение такой задачи сводится в первую очередь к снижению количества продукций в базе знаний и затем к сокращению количества нечетких термов в блоках фаззификации и

дефаззификации, а также применению аппроксимированных функций принадлежности.

Рассмотрим реализацию вышеприведенных подходов на конкретных примерах. Произведем настройку нечеткого регулятора с алгоритмом вывода Мамдани. При этом в качестве анализируемой системы управления выступает ранее рассмотренная двух контурная система регулирования скорости. Настройка производится следующим образом: оцениваются входные и выходные характеристики рассчитанного классического регулятора, определяются зависимости между ними, диапазоны регулирования. На базе проведенного анализа производится распределение функций принадлежности лингвистических переменных и составляется база знаний нечеткого регулятора [13, 14, 17, 38, 46, 108]. На рисунках 1.16, 1.17, 1.18 представлены результаты моделирования нечеткой системы управления построенной с применением алгоритма вывода Мамдани.

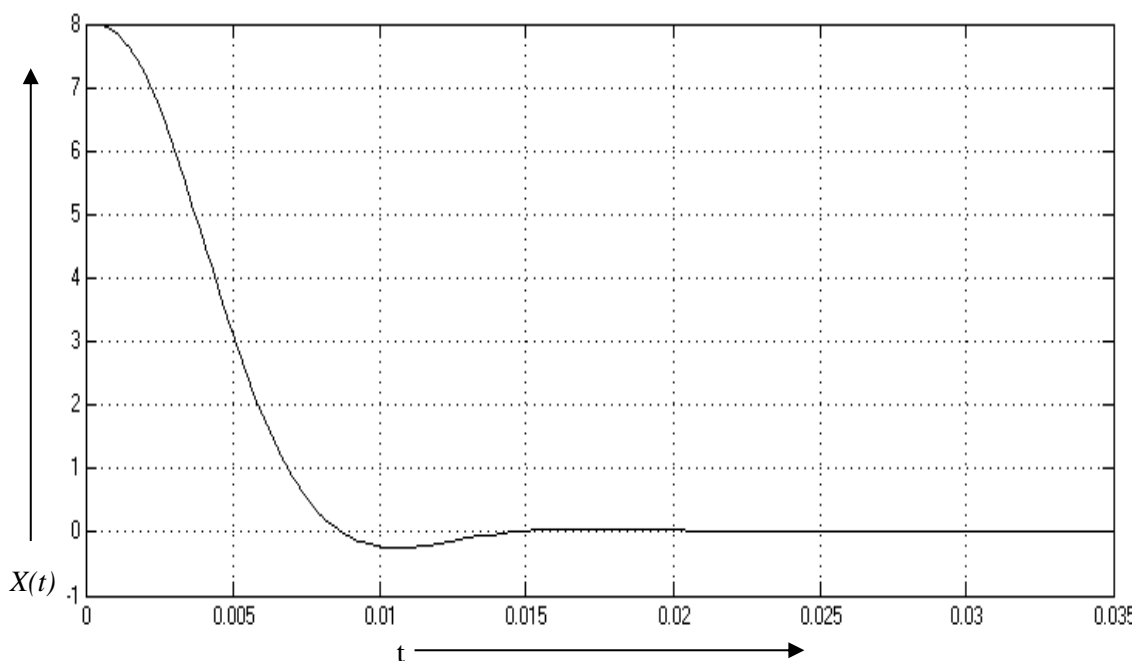


Рисунок 1.16 – Сигнал ошибки системы с «классическим» регулятором $X(t)$.

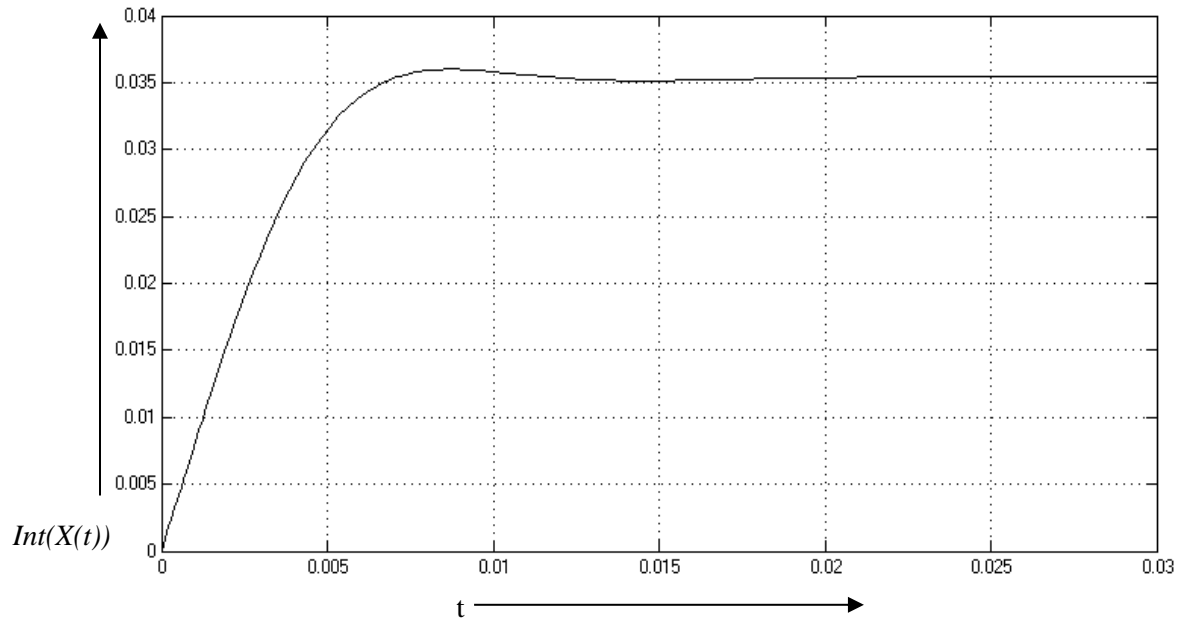


Рисунок 1.17 – Интеграл ошибки системы с «классическим» регулятором $Int(X(t))$.

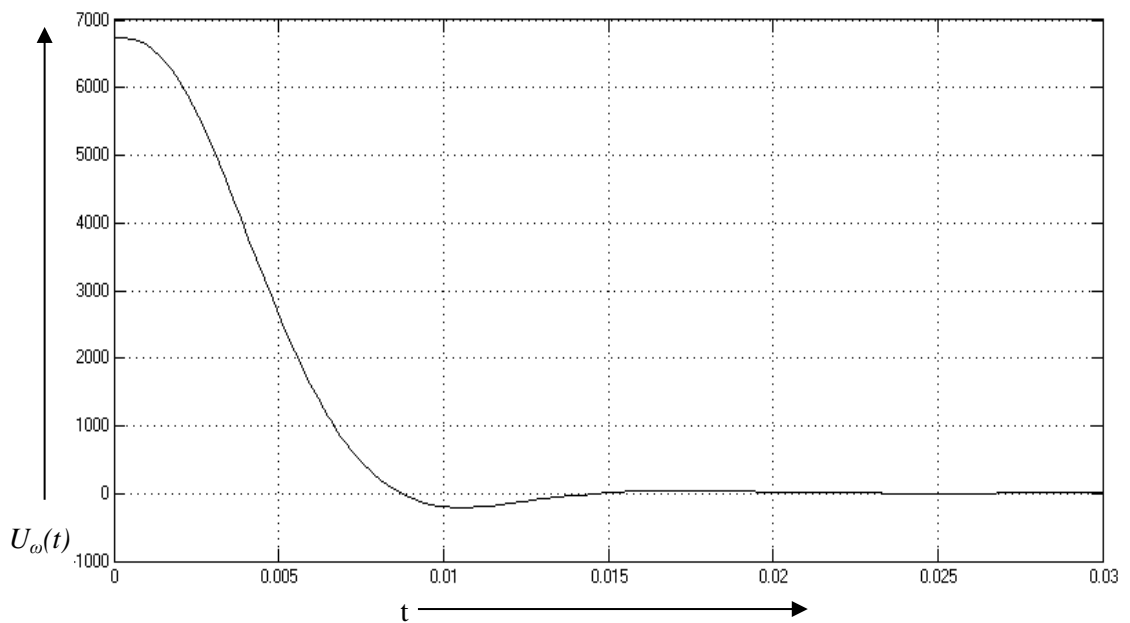


Рисунок 1.18 – Сигнал на выходе «классического» регулятора скорости $U_\omega(t)$.

Произведем распределение функций принадлежности лингвистических переменных и составим базу знаний нечеткого регулятора.

Распределение функций принадлежности производится на симметричных интервалах входных и выходных значений.

Первый вход нечеткого регулятора – лингвистическая переменная «Ошибка управления» с диапазоном регулирования $[-8; 8]$, которая содержит в себе пять нечетких термов треугольной формы (рис. 1.19).

Обозначение терм-множеств лингвистической переменной «Ошибка управления» $X(t)$:

BN – большая отрицательная ошибка управления;

N – отрицательная ошибка управления;

O – ошибка сигнала управления равна нулю;

P – положительная ошибка управления;

BP – большая положительная ошибка управления.

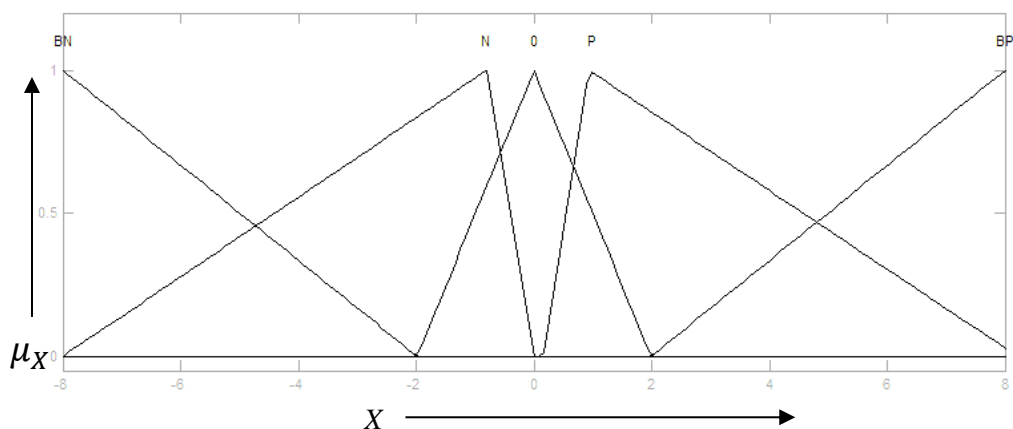


Рисунок 1.19 – Распределение функций принадлежности первого входа нечеткого регулятора $X(t)$.

Второй вход нечеткого регулятора – лингвистическая переменная «Интеграл от ошибки управления» с диапазоном регулирования $[-0,04; 0,04]$, так же содержит пять нечетких термов треугольной формы.

Обозначение терм-множеств лингвистической переменной «Интеграл от ошибки управления» $Int(X(t))$:

$(--)$ – большое отрицательное отклонение интегральной составляющей ошибки управления;

$(-)$ – отрицательное отклонение интегральной составляющей ошибки управления;

(0) – нулевое отклонение интегральной составляющей ошибки управления;

(+) – положительное отклонение интегральной составляющей ошибки управления;

(++) – большое положительное отклонение интегральной составляющей ошибки управления.

Распределение функций принадлежности второго входа нечеткого регулятора изображено на рисунке 1.20.

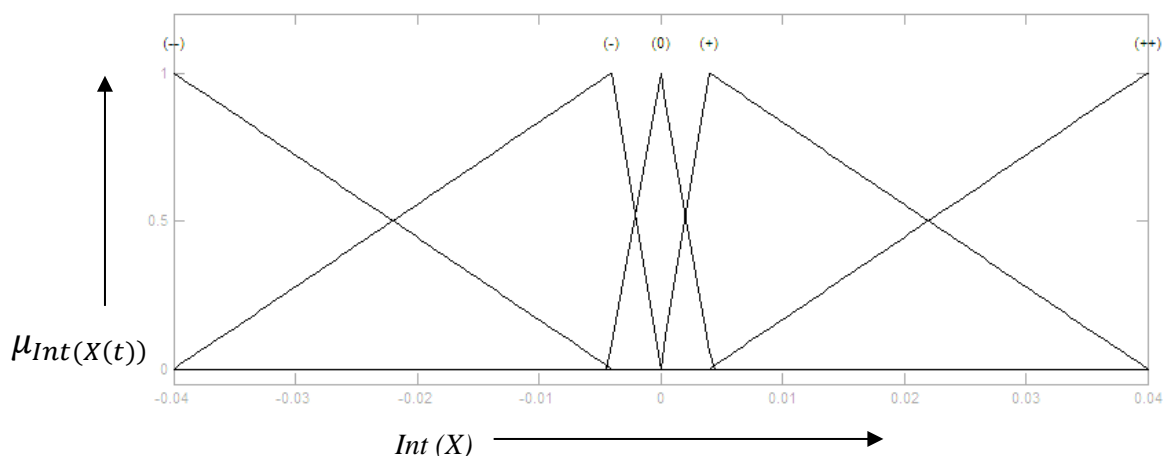


Рисунок 1.20 – Распределение функций принадлежности второго входа нечеткого регулятора $Int(X(t))$.

Выход нечеткого регулятора – лингвистическая переменная «Сигнал управления контуром тока» с диапазоном регулирования $[-7000; 7000]$. Базовое терм-множество переменной состоит из пяти функций принадлежности треугольного вида.

Обозначение нечетких термов переменной «Сигнал управления контуром тока»:

(B-) – большое отрицательное отклонение сигнала управления;

(-) – отрицательное отклонение сигнала управления;

(0) – нулевое отклонение сигнала управления;

(+) – положительное отклонение сигнала управления;

(B+) – большое положительное отклонение сигнала управления.

Распределение функций принадлежности выхода нечеткого регулятора изображено на рисунке 1.21.

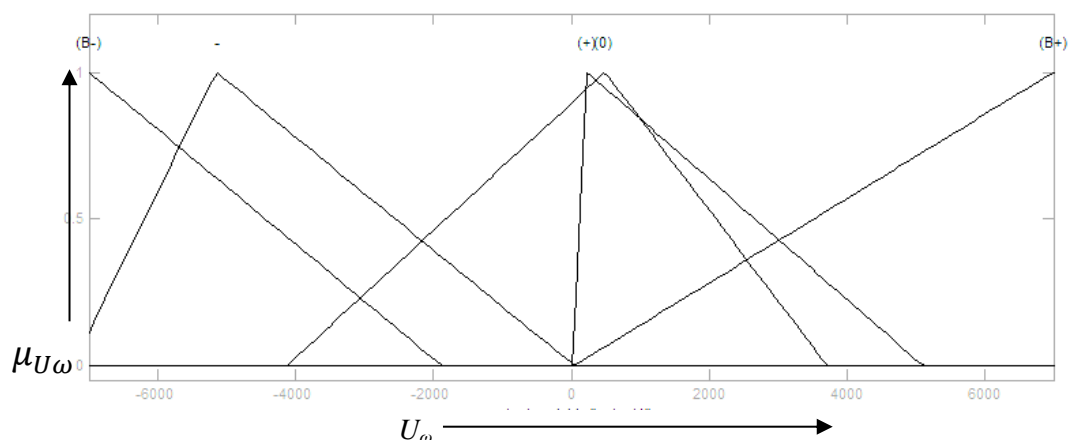


Рисунок 1.21 – Распределение функций принадлежности выхода нечеткого регулятора (Out).

Базовым компонентом механизма нечеткого вывода интеллектуальной системы управления является база продукционных правил. Лингвистически базу знаний нечеткого логического регулятора можно сформулировать следующим образом [230, 231].

Если сигнал ошибки положительный и большой, то управляющий сигнал тоже будет положительным и большим. Если отклонение сигнала ошибки нулевое и отклонение интегральной составляющей сигнала ошибки нулевое, то и отклонение управляющего сигнала будет нулевым. Если интегральная составляющая сигнала ошибки имеет большое положительное отклонение, то отклонение управляющего сигнала будет нулевым. Если сигнал ошибки положительный, то и сигнал управления будет положительным. Если сигнал ошибки отрицательный, а интегральная составляющая положительна, то управляющий сигнал будет отрицательным.

Набор нечетких импликационных правил соответствующих приведенной выше естественно языковой форме будет иметь вид:

Если «Ошибка_управления» есть ВР, то «Сигнал_управления_контуром_тока» есть (В+);

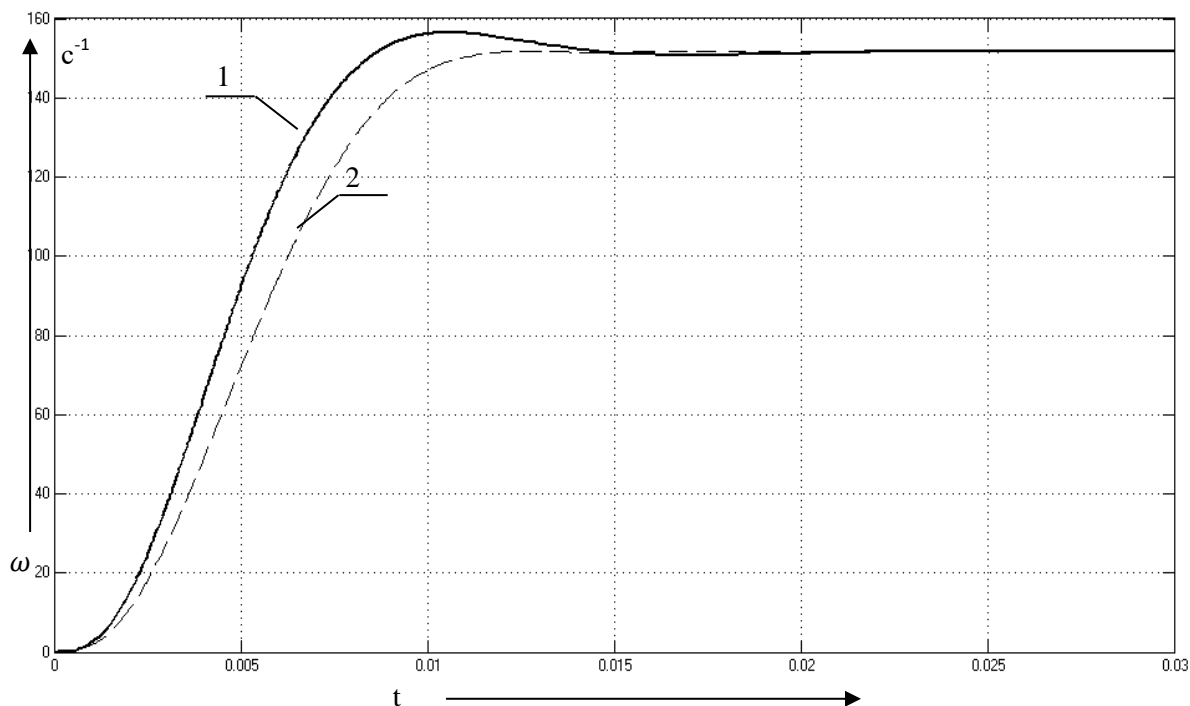
Если «Ошибка_управления» есть 0 и «Интеграл_ошибки_управления» есть (0), то «Сигнал_управления_контуром_тока» есть (0);

Если «Интеграл_ошибки_управления» есть (++) , то «Сигнал_управления_контуром_тока» есть (0);

Если «Ошибка_управления» есть P, то «Сигнал_управления_контуром_тока» есть (+);

Если «Ошибка_управления» есть N и «Интеграл_ошибки_управления» есть (+), то «Сигнал_управления_контуром_тока» есть (-);

Проведем анализ графиков переходных процессов по скорости для системы, построенной с использованием классических методов и интеллектуальной системы управления (рис. 1.22).



1 – система управления с классическим регулятором;

2 – система управления с нечетким регулятором.

Рисунок 1.22 – Переходная характеристика системы по скорости.

Как видно из рисунка 1.22 скорость выходит на номинальное значение $\omega_n=151,84c^{-1}$. Время переходного процесса для системы с нечетким регулятором скорости составляет 0,015с. Это говорит о том, что нечеткий регулятор настроен правильно.

Процесс настройки нечеткого логического регулятора с механизмом вывода Сугено производится подобно регулятору Мамдани, с единственным отличием, обусловленным наличием полиномов в консервантах правил продукций или констант, в случае использования упрощенного алгоритма нечеткого вывода.

Распределение и количество входных нечетких переменных оставим без изменений, они будут аналогичны наборам в базовых терм-множествах регулятора Мамдани (рис. 1.20, 1.21).

Выход нечеткого регулятора – лингвистическая переменная «Сигнал управления контуром тока» будет состоять из пяти нечетких переменных:

(--)= -220 – большое отрицательное отклонение сигнала управления;

(-)= -70 – отрицательное отклонение сигнала управления;

(0)= 0,2 – нулевое отклонение сигнала управления;

(+)= 5,1 – положительно отклонение сигнала управления;

(++)= 220 – большое положительное отклонение сигнала управления.

Составим базу продукционных правил нечеткого регулятора:

Если «Ошибка управления» есть ВР, то «Сигнал управления контуром тока» = (++);

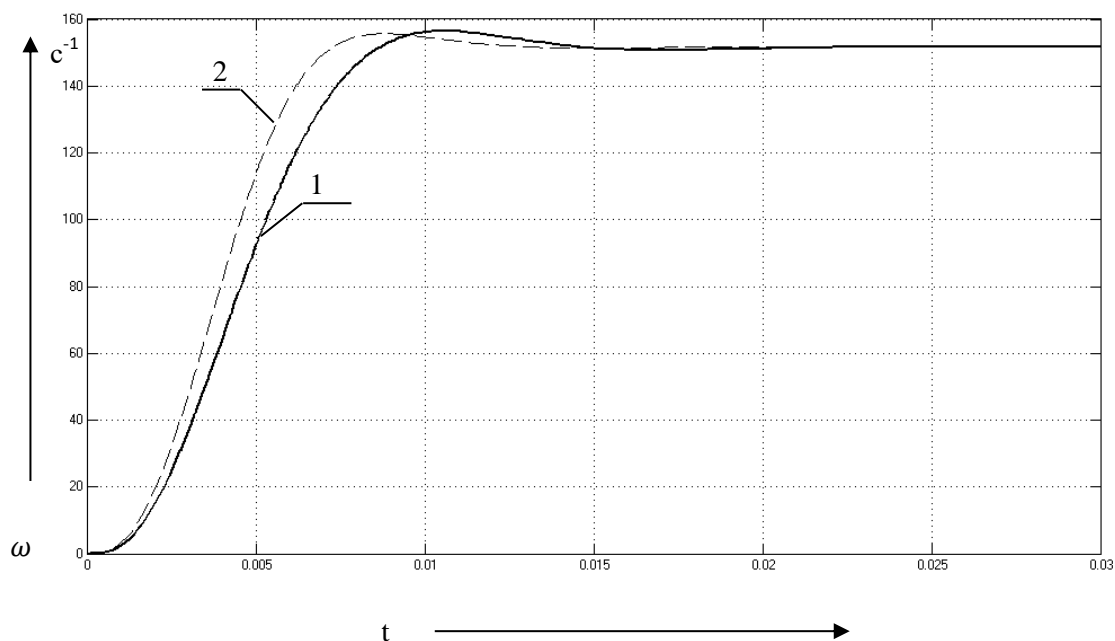
Если «Ошибка управления» есть 0 и «Интеграл от ошибки управления» есть (0), то «Сигнал управления контуром тока» = (0);

Если «Интеграл от ошибки управления» есть (++), то «Сигнал управления контуром тока» = (0);

Если «Ошибка управления» есть Р, то «Сигнал управления контуром тока» = (+);

Если «Ошибка управления» есть N и «Интеграл от ошибки управления» есть (+), то «Сигнал управления контуром тока» = (-);

Для оценки работоспособности нечеткого регулятора рассмотрим график реакции выходного сигнала системы на скачок задающего воздействия (рис. 1.23).



1 – система управления с классическим регулятором;

2 – система управления с нечетким регулятором.

Рисунок 1.23 – Переходная характеристика системы по скорости.

Время переходного процесса составляет 0.018c . За это время скорость выходит на номинальное значение $\omega_n=151,84\text{c}^{-1}$.

Теперь перейдем к оценке возможности снижения информационной избыточности нечеткого регулятора. Рассмотрим регулятор с алгоритмом нечеткого логического вывода Мамдани, который был смоделирован в предыдущем пункте. Анализ основных параметров регулятора с механизмом Мамдани показал, что некоторыми нечеткими переменными в блоках фаззификации и как следствие рядом правил продукций можно пренебречь, без снижения основных показателей регулирования [247, 248, 249, 250, 277, 287, 290]. Например, нечеткие переменные (--), (B-) и BN вообще не учувствуют в процессе регулирования, т.к. они не удовлетворяют требованиям полноты базы знаний нечеткого логического регулятора. Кроме того, можно упростить вход регулятора «ошибка управления», заменив в лингвистической переменной два нечетких терма, отвечающих за положительное отклонение сигнала ошибки, на одно. Отсутствие лингвистической переменной «интеграл от ошибки управления» не отразится

на работе регулятора, следовательно, ей можно пренебречь [148, 189, 197, 211, 213, 216].

Обозначим и распределим функции принадлежности упрощенного нечеткого регулятора с алгоритмом логического вывода Мамдани.

Первый вход (рис. 1.24) – лингвистическая переменная «Ошибка управления» с диапазоном регулирования $[-8; 8]$ будет состоять из трех нечетких термов треугольного вида:

N – отрицательная ошибка управления;

(0) – ошибка сигнала управления равная нулю;

P – положительная ошибка управления.

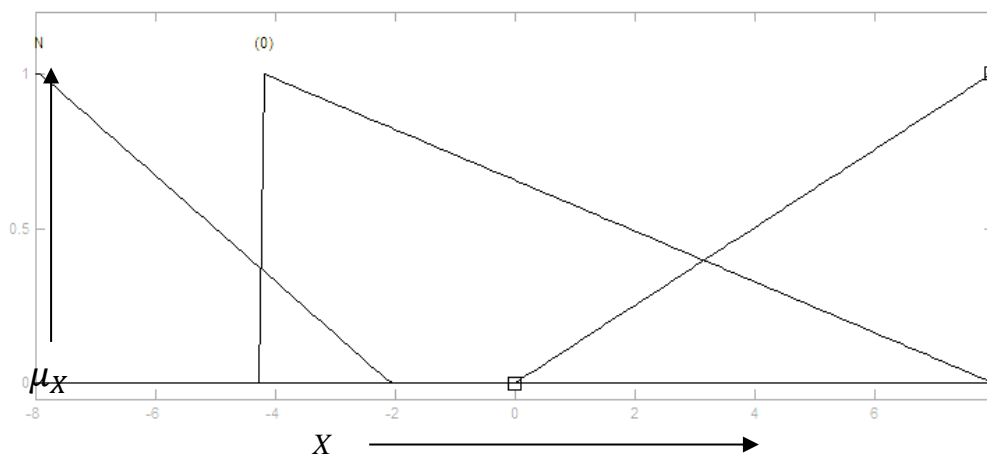


Рисунок 1.24 – Распределение функций принадлежности первого входа упрощенного нечеткого регулятора X .

Выход регулятора (рис. 1.25) – лингвистическая переменная «сигнал управления контуром тока» с диапазоном регулирования $[-7000; 7000]$ содержит в себе два нечетких терма:

(0) – нулевое отклонение сигнала управления;

(P) – положительное отклонение сигнала управления.

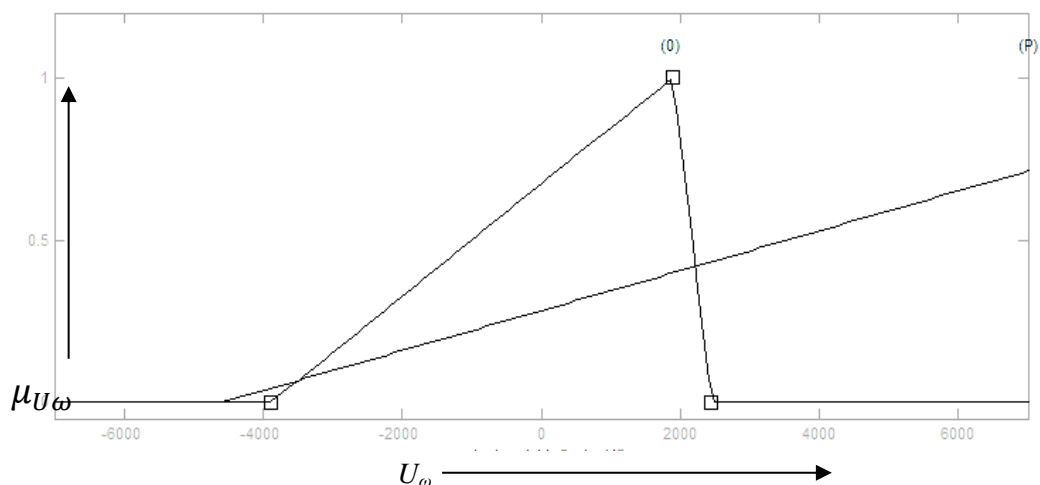


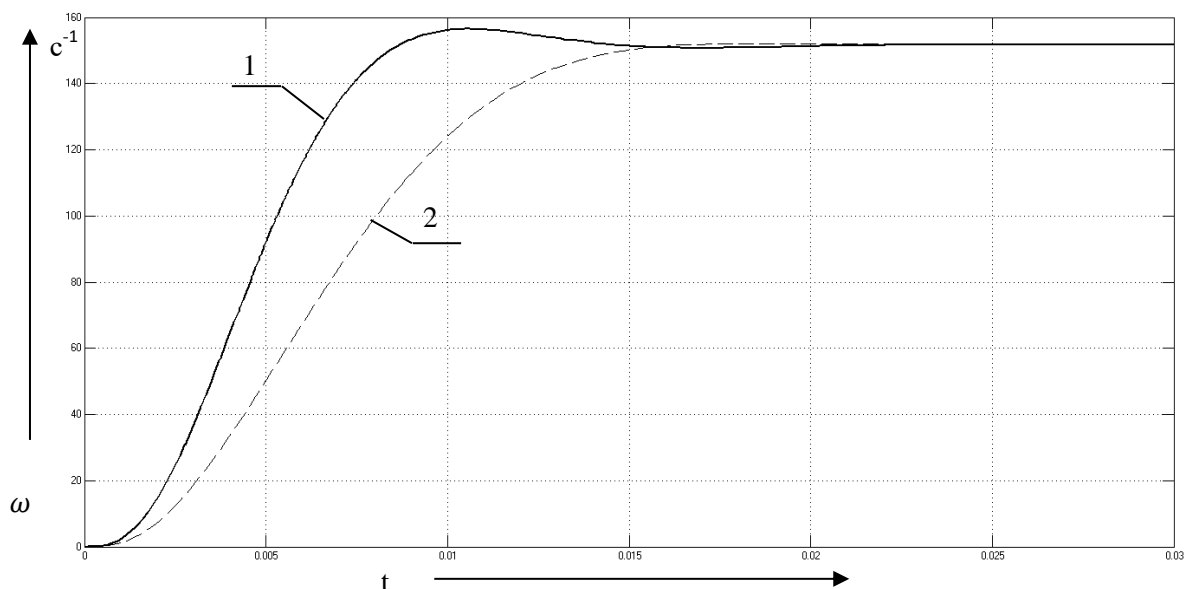
Рисунок 1.25 – Распределение функций принадлежности выхода упрощенного нечеткого регулятора (*Out*).

После операций по перераспределению и перенастройке базовых термножеств основных лингвистических переменных регулятора необходимо трансформировать его базу знаний. После процедур упрощения основных блоков и параметров нечеткой системы для реализации механизма вывода будет достаточно двух импликационных правил:

Если «Ошибка управления» есть (0), то «Сигнал управления контуром тока» есть (0);

Если «Ошибка управления» есть (P), то «Сигнал управления контуром тока» есть (P);

На рисунке 1.26 приведены графики реакции той же системы регулирования скорости для двух случаев: с классическим регулятором и с нечеткой системой управления.



1 – система управления с классическим регулятором;

2 – система управления с нечетким регулятором.

Рисунок 1.26 – Переходная характеристика системы по скорости.

Скорость нечеткой системы достигает номинального значения $\omega_n=151,84c^{-1}$ за время переходного процесса $0,017c$.

После анализа основных показателей регулирования можно сделать вывод о том, что полученный нечеткий регулятор с алгоритмом вывода Сугено можно несколько упростить за счет сокращения ряда нечетких переменных на входе, и как следствие, удаления ряда продукционных правил неудовлетворяющих условию полноты.

Первый вход нечеткого регулятора (рис. 1.27) – лингвистическая переменная «Ошибка управления» с диапазоном регулирования $[-8; 8]$ содержит три нечетких функции принадлежности:

N – отрицательное отклонение сигнала ошибки;

Z – нулевое отклонение сигнала ошибки;

P – положительное отклонение сигнала ошибки.

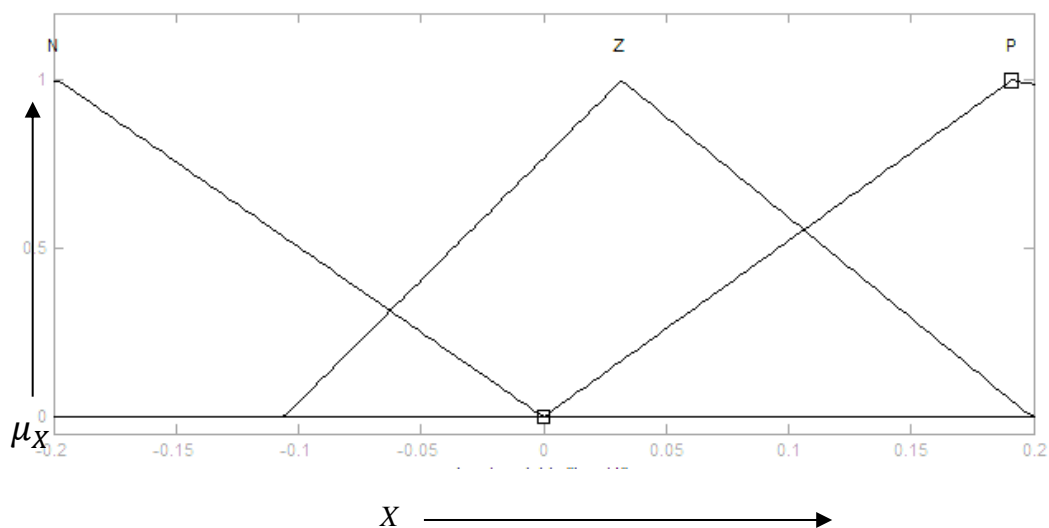


Рисунок 1.27 – Распределение функций принадлежности первого входа упрощенного нечеткого регулятора X.

Вторым входом нечеткого регулятора можно пренебречь, т.к. его отсутствие никак не влияет на работоспособность нечеткой системы.

Выход нечеткого регулятора – лингвистическая переменная «Сигнал управления контуром тока» состоит из трех переменных:

- (-) = -10 – отрицательное отклонение сигнала управления;
- (0) = 0,1 – нулевое отклонение сигнала управления;
- (+) = 150 – положительное отклонение сигнала управления.

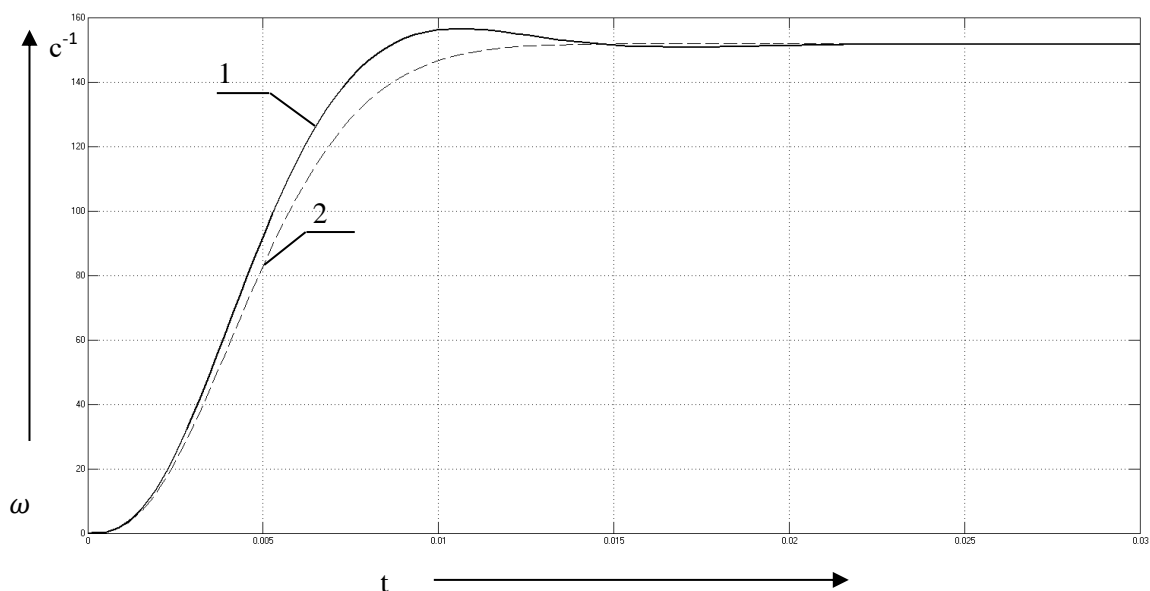
Составим базу знаний для упрощенного нечеткого регулятора. База знаний будет состоять из трех продукционных правил:

Если «ошибка_управления» есть Z, то «сигнал_управления_контуром_тока» = 0;

Если «ошибка_управления» есть P, то «сигнал_управления_контуром_тока» = (+);

Если «ошибка_управления» есть N, то «сигнал_управления_контуром_тока» = 0;

Убедимся в работоспособности системы регулирования, содержащей упрощенный тип регулятора, исследовав графики реакции системы на скачок задающего сигнала для двух случаев (рис. 1.28)



1 – система управления с классическим регулятором;

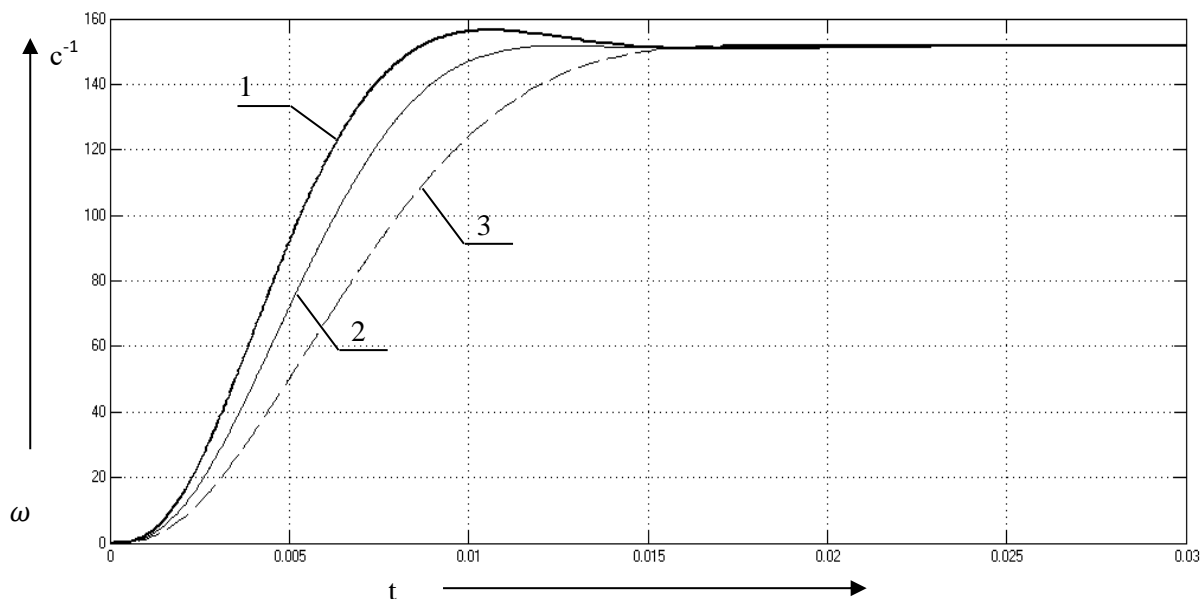
2 – система управления с нечетким регулятором.

Рисунок 1.28 – Переходная характеристика системы по скорости.

Так же как и в предыдущих случаях, нечеткий логический регулятор является работоспособным. Переходный процесс протекает за $0,016c$, после чего скорость выходит в установившееся значение $\omega_n=151,84c^{-1}$.

Сравнение двух нечетких регуляторов – исходного и упрощенного – показало, что ряд параметров являются весьма избыточными. Поэтому в работе была исследована возможность по минимизации управляющей структуры нечеткого регулятора.

Проанализируем динамические характеристики смоделированных систем. На рисунке 1.29 представлены переходные процессы по скорости нечетких систем, построенных при помощи алгоритма нечеткого вывода Мамдани.

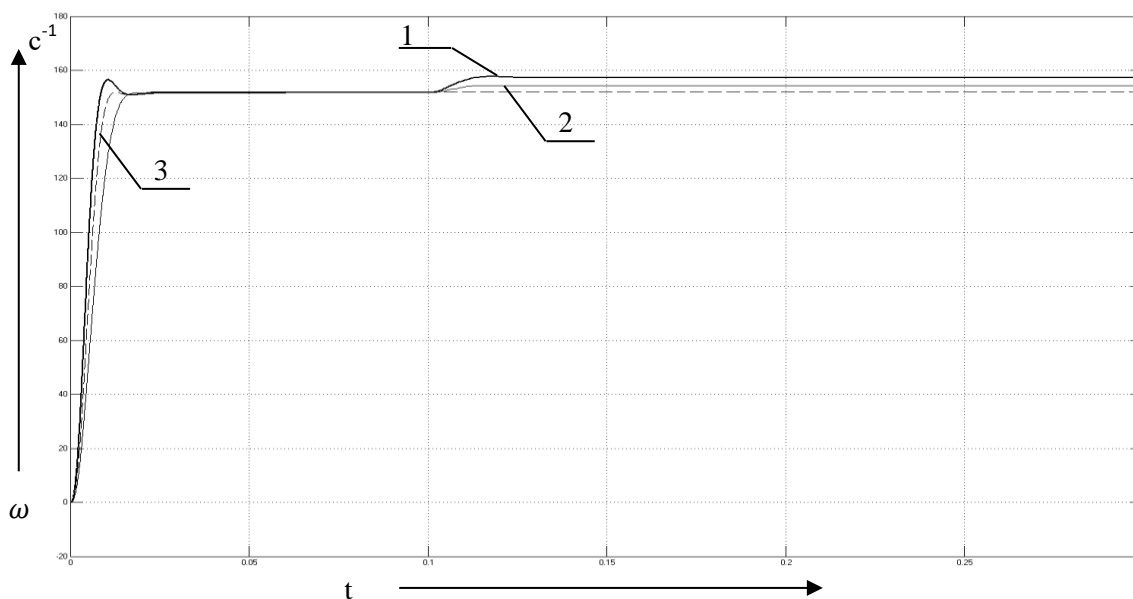


1 – исходной системы с классическим регулятором; 2 – системы с нечетким регулятором Мамдани; 3 – системы с упрощенным нечетким регулятором Мамдани.

Рисунок 1.29 – График переходных процессов по скорости.

Анализ результатов (рис. 1.29) моделирования показывает улучшение динамических показателей переходного процесса системы с нечеткими логическими регуляторами, как в при стандартной настройке, так и в случае его упрощения.

Рассмотрим реакцию систем на подачу возмущения (рис. 1.30). Для наглядности, при задающем сигнале $U_3=8 В$, подадим возмущение $M_c=100 Мн$ в момент времени $t=0,1с$.

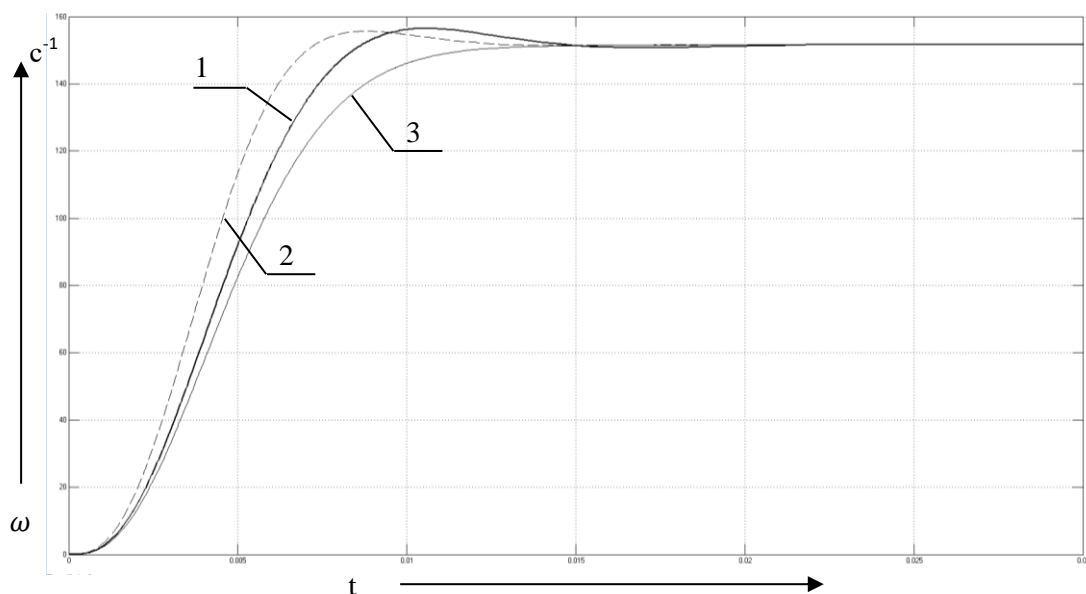


1 – исходной системы с классическим регулятором; 2 – системы с нечетким регулятором Мамдани; 3 – системы с упрощенным нечетким регулятором Мамдани.

Рисунок 1.30 – Графики переходных процессов по скорости при подаче возмущения.

Из графиков видно, что нечеткие регуляторы обрабатывают сигнал возмущения. При этом стоит отметить, что у упрощенного регулятора статическая ошибка меньше чем у исходной системы, а исходный нечеткий регулятор вообще не реагирует на возмущение, делая нечеткую систему астатической.

Рассмотрим переходные процессы по скорости нечетких систем, построенных с использованием регуляторов, с алгоритмом нечеткого вывода Сугено (рис. 1.31). В качестве объекта регулирования используется двухконтурная система подчиненного регулирования, в которой нечеткий регулятор настраивается на реализацию процедур управления в контуре тока и имеет две лингвистические переменные на входе и единственную лингвистическую переменную на выходе, соответственно (рис. 1.11).



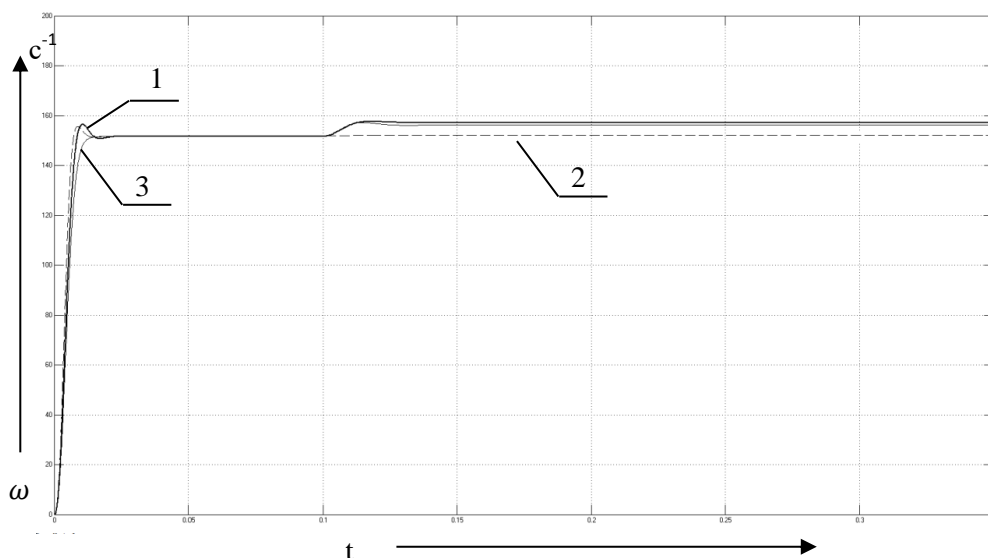
1 – система с классическим регулятором; 2 – система с регулятором Сугено;
3 – система с упрощенным регулятором Сугено.

Рисунок 1.31 – Переходные характеристики системы по скорости.

Из анализа переходных характеристик на рисунках 1.30 и 1.31 можно сделать вывод о некотором увеличении быстродействия в системах, использующих в своей основе нечеткие принципы управления. Кроме того, в случае с системой управления, содержащей упрощенный нечеткий регулятор, можно судить об улучшении динамики.

Рассмотрим реакцию системы, при подаче возмущения $M_c=100 \text{ Мн}$ в момент времени $t=0,1 \text{ с}$ (рис. 1.32).

Подвергнув анализу рисунок 1.32 можно заметить, что система с исходным нечетким регулятором Сугено, делает систему астатической по возмущению, улучшая ее робастные свойства, тогда как для упрощенной нечеткой системы, при отработке возмущения, появляется статическая ошибка, величина которой не выходит за рамки ошибки в классической системе.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор Сугено;
3 – упрощенный регулятор Сугено.

Рисунок 1.32 – Переходные характеристики в системе при подаче возмущающего воздействия.

Таким образом, сокращение информационной избыточности нечеткого регулятора в рамках описанного подхода позволяет обеспечить основные показатели качества регулирования системы на уровне базовых показателей классической системы.

1.9 Анализ влияния параметров объекта управления на структуру и характеристики нечеткого регулятора

Как правило, в классическом подходе структура и сложность регулятора системы управления определяется математическим описанием объекта управления. При высоких порядках полиномов, описывающих объект управления, существует проблема технической реализуемости регулятора с учетом обеспечения требуемых показателей качества. Для разрешения вышеуказанного противоречия используется подход, связанный с дроблением полинома объекта регулирования на простейшие составляющие при условии соблюдения условий изменяемости выходной

координаты каждой из составляющих. Это дает возможность вводить локальный регулятор для каждой координаты, тем самым обеспечивая возможность его физической реализуемости (принцип подчиненного регулирования)

Решение проблем информационной избыточности интеллектуальных систем определяется целым рядом факторов, имеющих ярко выраженный характер, например проверка базы знаний на основные требования, такие как полнота и непротиворечивость. Необходимость решения таких задач диктуется непосредственной аппаратной реализацией нечетких систем, учитывая отказ производителей средств автоматизации от специализированных платформ или недоступность таких контроллеров из-за санкционной политики. Однако существует ряд задач иного характера, зачастую определяемых особенностями влияния самого объекта управления на интеллектуальную нечеткую систему управления [190, 195, 196, 212, 214, 233, 288, 296]. Трансформация самого объекта регулирования, изменение его структуры параметров, наличие наряду с нелинейностями нестационарностей, требует изменять настройки нечетких систем с учетом влияния на них представленных особенностей объектов регулирования [247, 248, 250, 277, 278, 290, 312]. Таким образом, можно выделить целый набор задач связанных с перенастройкой нечетких логических регуляторов в зависимости от особенностей функционирования объекта управления.

Рассмотрим оценку взаимного влияния математического описания объекта управления системы регулирования и реализуемого нечеткого регулятора на частных примерах.

Для синтеза интеллектуальной системы управления с механизмом вывода Сугено, в качестве объекта регулирования принимается стандартная модель электропривода постоянного тока и производится замена классического регулятора (рис. 1.33).

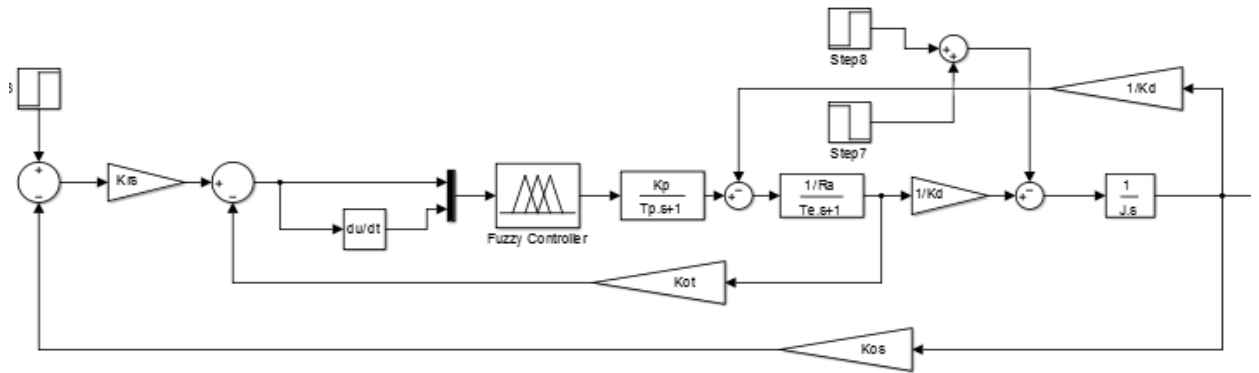


Рисунок 1.33 – Структурная схема нечеткой системы управления.

Нечеткий логический регулятор (НЛР), в его классическом исполнении, представленный на рисунке 1.33, имеет на своем входе две лингвистические переменные, формализующие понятия сигнала ошибки системы и ее производной. Выход регулятора реализован с использованием единственной формирующей на выходе НЛР сигнал управления (рис. 1.34).

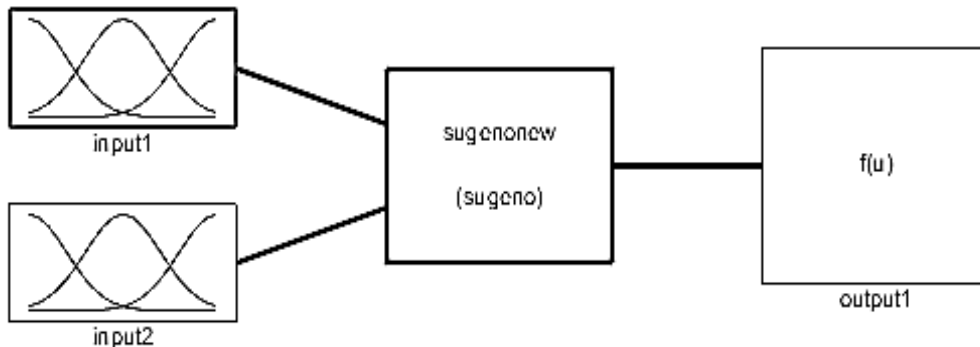
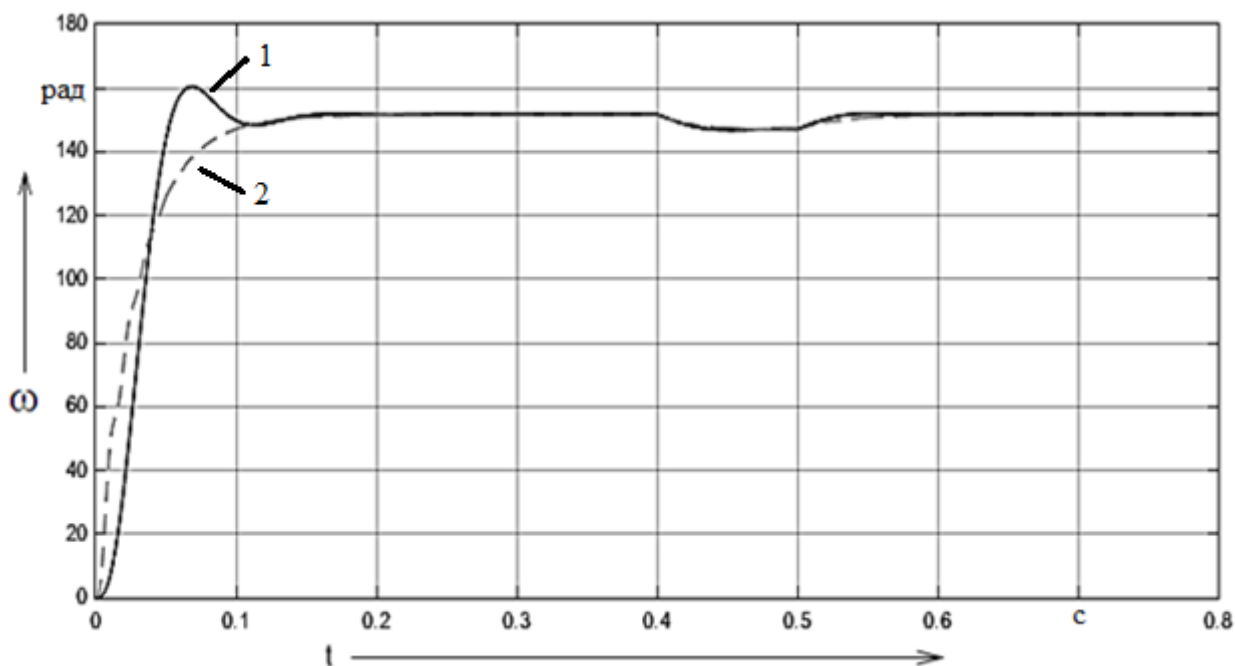


Рисунок 1.34 – Функциональная схема нечеткого логического регулятора с механизмом вывода Сугено.

Динамические характеристики систем управления синтезированных с применением классических методов и методик интеллектуального управления представлен на рисунке 1.35



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором
Рисунок 1.35 – Переходный процесс в системе.

Фаззификация классической переменной соответствующей сигналу ошибки в контуре тока выполняется с использованием лингвистической переменной *input1*. Диапазон изменения переменной выбирается симметричным относительно максимального отклонения координаты в классической системе регулирования (рис. 1.36). Базовое терм-множество, лингвистической переменной, содержит набор из пяти нечетких переменных, определяющих различные состояния сигнала.

Функции принадлежности треугольной формы, соответствующие элементам базового терм множества, распределяются равномерно по заданной области определения (рис. 1.36). Такой выбор формы функций принадлежности нечеткого логического регулятора и их распределения обусловлен простотой программной реализации и максимальным быстродействием.

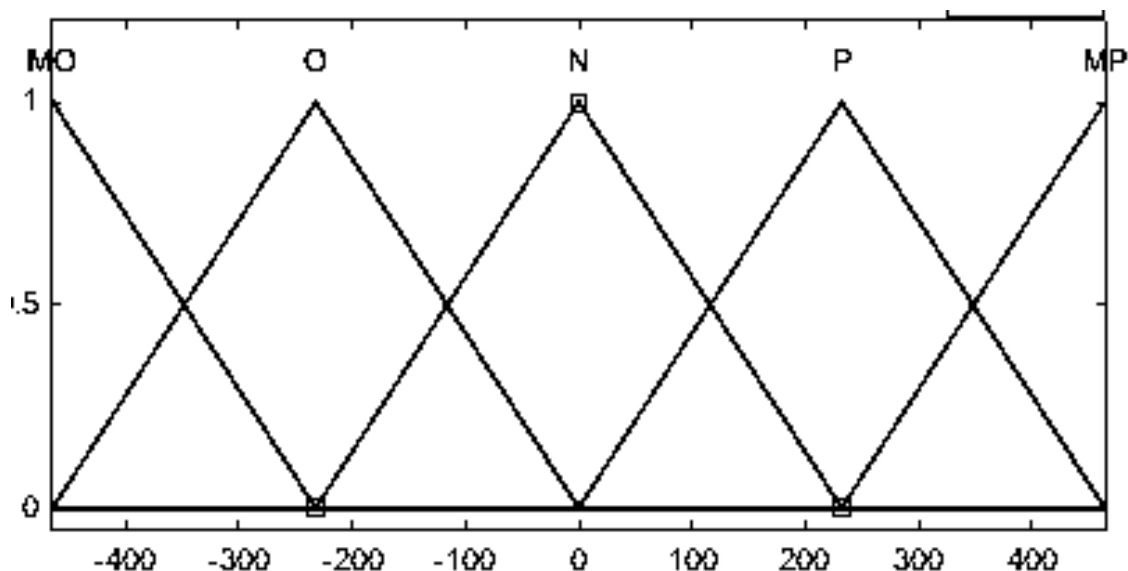


Рисунок 1.36 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по току».

Дополнительный информационный вход нечеткого логического регулятора формализуется понятием «скорость изменения ошибки по току» и реализуется лингвистической переменной *input2*. Диапазон регулирования для дифференциальной составляющей сигнала определяется аналогично сигналу ошибки, распределение и количество нечетких термов показано на рисунке 1.37.

На рисунке 1.37 показано равномерное распределение пяти нечетких термов с функциями принадлежности аппроксимированного вида.

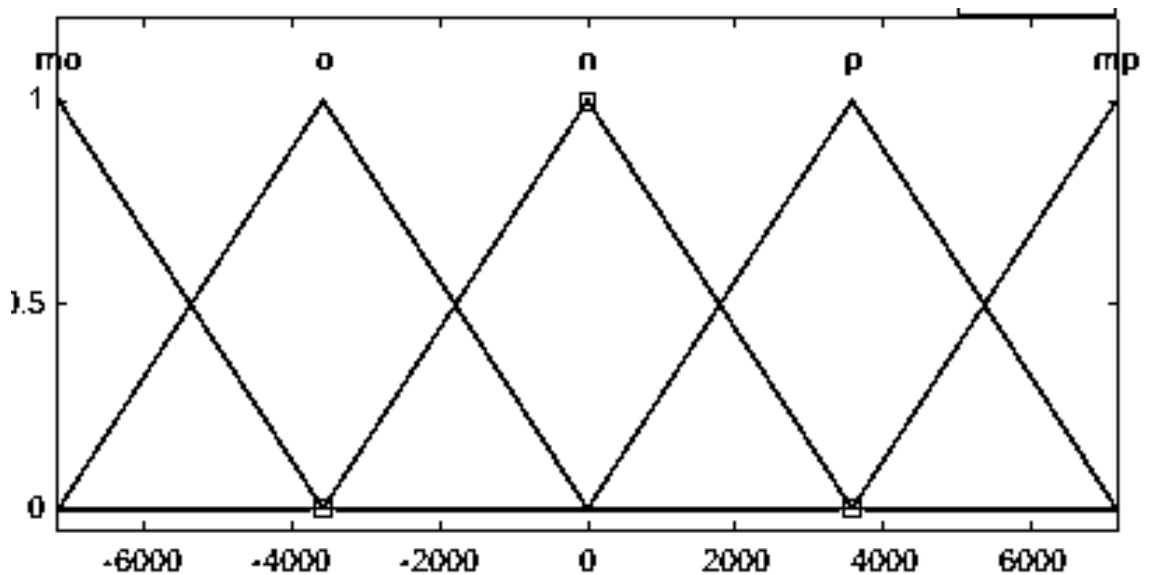


Рисунок 1.37 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «производная ошибки по току».

Выходная лингвистическая переменная формализует понятие «сигнал управления», который определяется на основании входных лингвистических переменных и алгоритма нечеткого вывода Сугено. Базовое терм-множество, с учетом механизма вывода, будет иметь вид $T = \{MO, O, N, P, MP\}$: $MO = -2500$, $O = -2000$, $N = 0$, $P = 2000$, $MP = 2500$.

База знаний нечеткого логического регулятора содержит набор из шести правил продукций, следующего вида:

Если «ошибка_по_току» есть N и «скорость_изменения_ошибки_по_току» есть p, то «сигнал_управления» = 0,

Если «ошибка_по_току» есть N и «скорость_изменения_ошибки_по_току» есть tr, то «сигнал_управления» = 0,

Если «ошибка_по_току» есть MP, то «сигнал_управления» = 2500,

Если «ошибка_по_току» есть P, то «сигнал_управления» = 2000,

Если «ошибка_по_току» есть O, то «сигнал_управления» = -2000,

Если «ошибка_по_току» есть MO, то «сигнал_управления» = -2500.

Аналогично, проведем моделирование нечеткого логического регулятора тока, построенного с применением механизма вывода Мамдани,

для системы управления технологическим процессом показанной на рисунке 1.33.

На функциональной схеме рисунка 1.38 представлен нечеткий логический регулятор с алгоритмом вывода Мамдани, формирующий сигнал управления, посредством единственной лингвистической переменной на выходе и имеющий два информационных входа, формализуемые понятиями: «ошибка по току» и «скорость изменения ошибки по току».

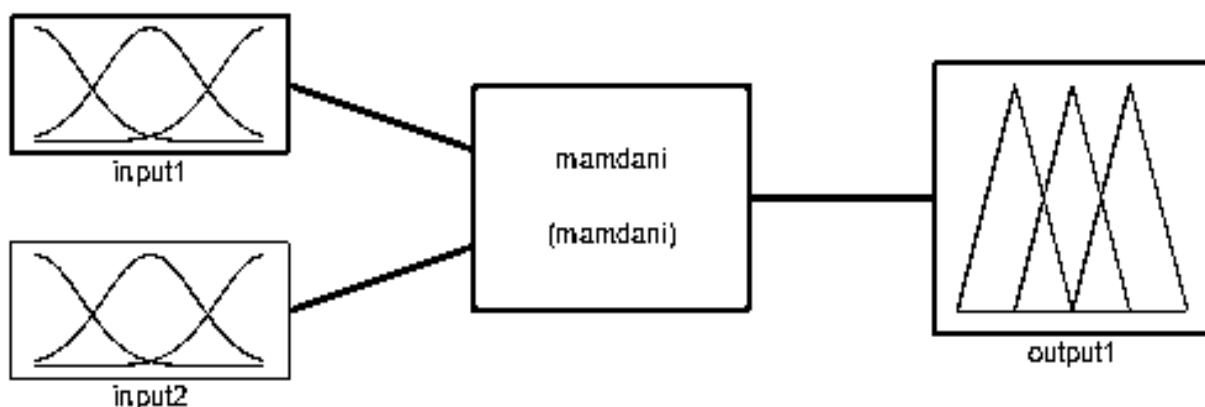


Рисунок 1.38 – Функциональная схема нечеткого логического регулятора с механизмом вывода Мамдани.

На рисунке 1.39 проиллюстрированы динамические характеристики систем с классическим управлением и нечетким регулятором по выходной координате при отработке ступенчатого входного воздействия.

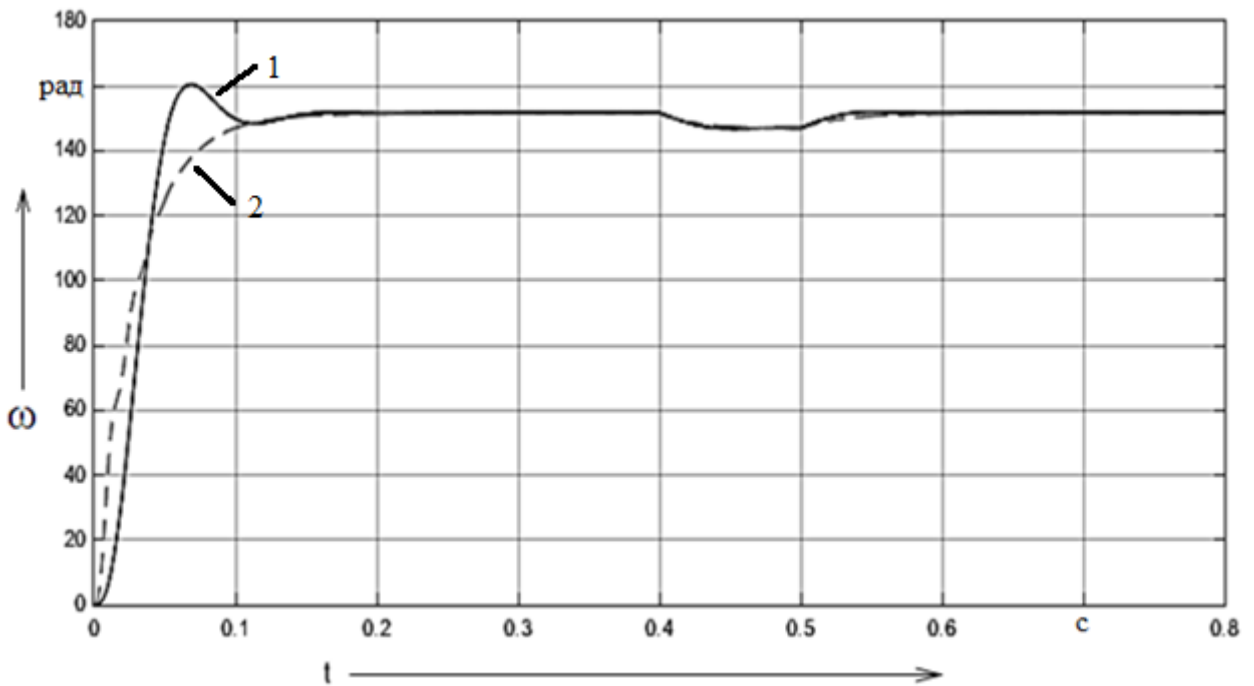


Рисунок 1.39 – Переходные процессы в системах с классическим и нечетким регулятором (1 – система с классическим регулятором, 2 – система с нечетким регулятором).

Фаззификация классической переменной соответствующей сигналу ошибки в контуре тока выполняется с использованием лингвистической переменной $input1$. Диапазон изменения переменной выбирается симметричным относительно максимального отклонения координаты в классической системе регулирования (рис. 1.40). Базовое терм-множество $T = \{MO, O, N, P, MP\}$, лингвистической переменной, содержит набор из пяти нечетких переменных, соответствующих следующим состояниям сигнала ошибки по току: MO – «большое отрицательное значение»; O – «малое отрицательное значение»; N – «нулевое значение»; P – «малое положительное значение»; MP – «большое положительное значение».

Функции принадлежности треугольной формы, соответствующие элементам базового терм множества, распределяются равномерно по заданной области определения (рис. 1.40). Такой выбор формы функций принадлежности нечеткого логического регулятора и их распределения

обусловлен простотой программной реализации и максимальным быстродействием.

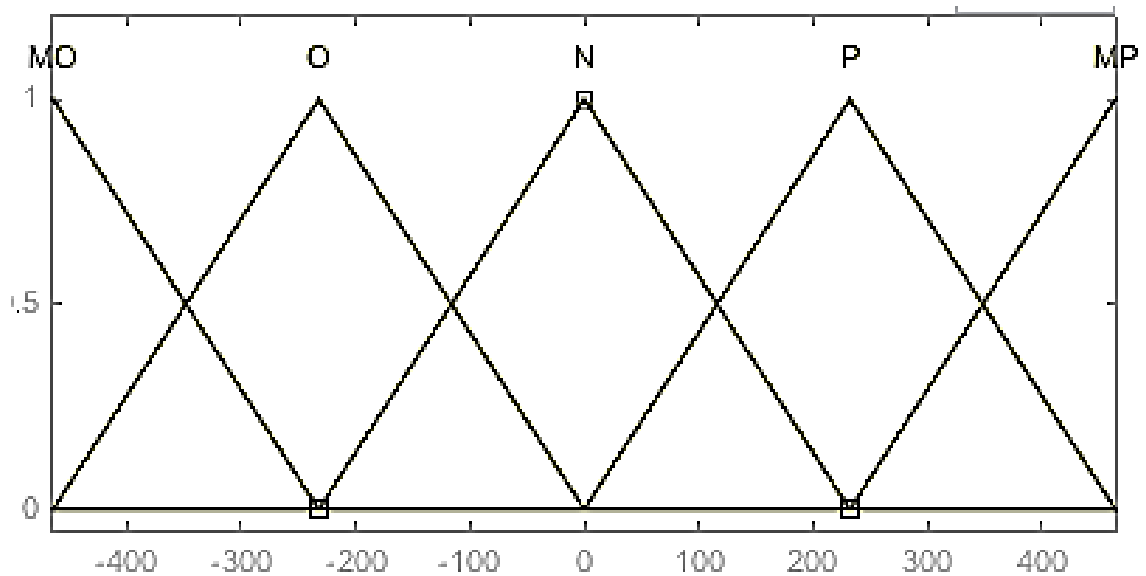


Рисунок 1.40 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по току».

Дополнительный информационный вход нечеткого логического регулятора формализуется понятием «скорость изменения ошибки по току» и реализуется лингвистической переменной *input2*. Диапазон регулирования для дифференциальной составляющей сигнала определяется аналогично сигналу ошибки, распределение и количество нечетких термов показано на рисунке 1.41.

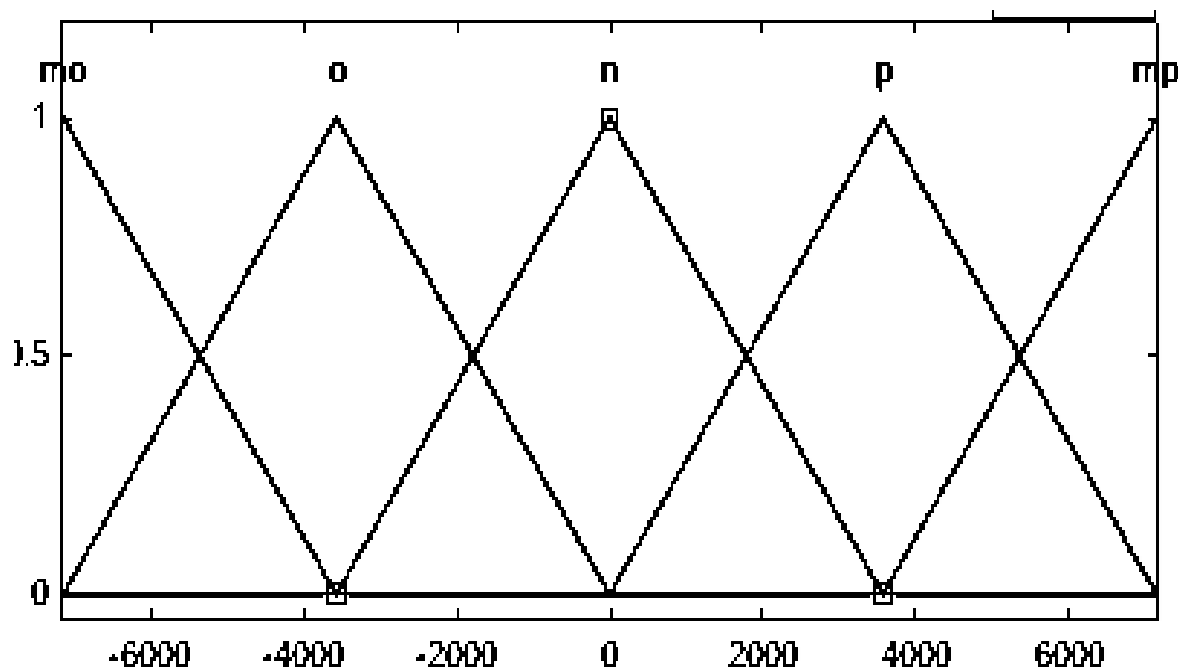


Рисунок 1.41 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «скорость изменения ошибки по току».

Выходная лингвистическая переменная формализует понятие «сигнал управления», который определяется на основании входных лингвистических переменных и алгоритма нечеткого вывода Мамдани. Базовое термножество $T = \{mo, o, n, p, mp\}$, с учетом механизма вывода, будет содержать набор из пяти констант со следующими значениями: mo – «большая отрицательная величина», o – «отрицательная величина», n – «величина равная нулю», p – «положительная величина», mp – «большая положительная величина» (рис. 1.42).

База знаний нечеткого логического регулятора содержит набор из шести правил продукций, следующего вида:

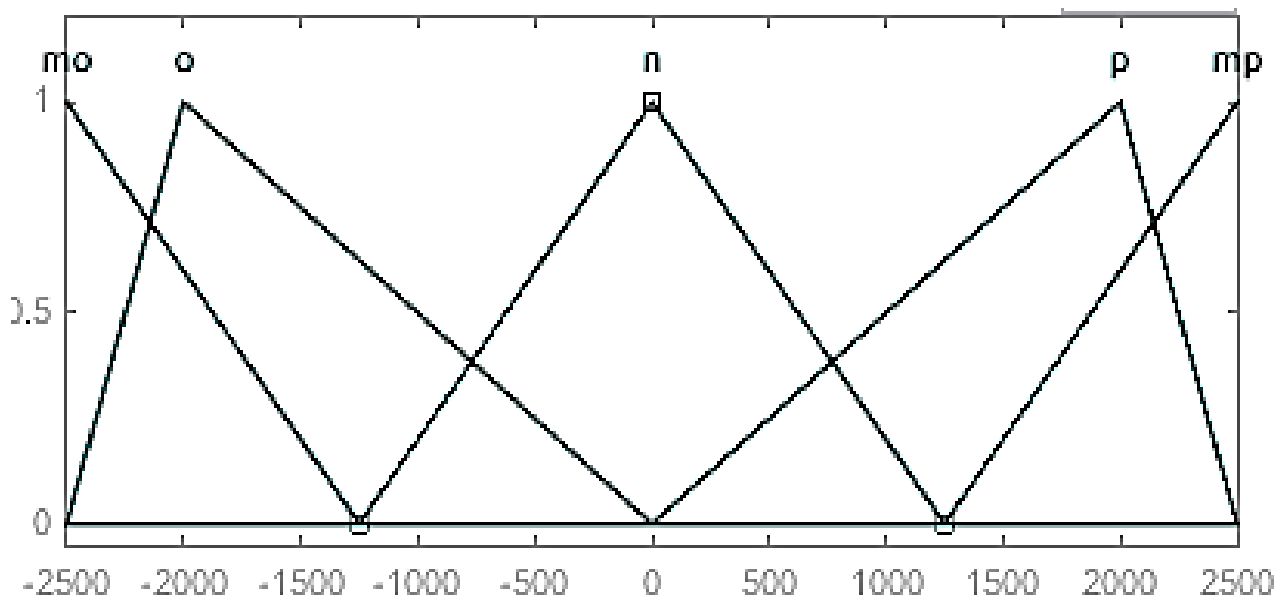


Рисунок 1.42 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «сигнал управления током».

База знаний нечеткого логического регулятора содержит набор из шести правил продукций, следующего вида:

Если «ошибка_по_току» есть N и «скорость_изменения_ошибки_по_току» есть p, то «сигнал_управления» есть N,

Если «ошибка_по_току» есть N и «скорость_изменения_ошибки_по_току» есть tr, то «сигнал_управления» есть n,

Если «ошибка_по_току» есть MP, то «сигнал_управления» есть tr,

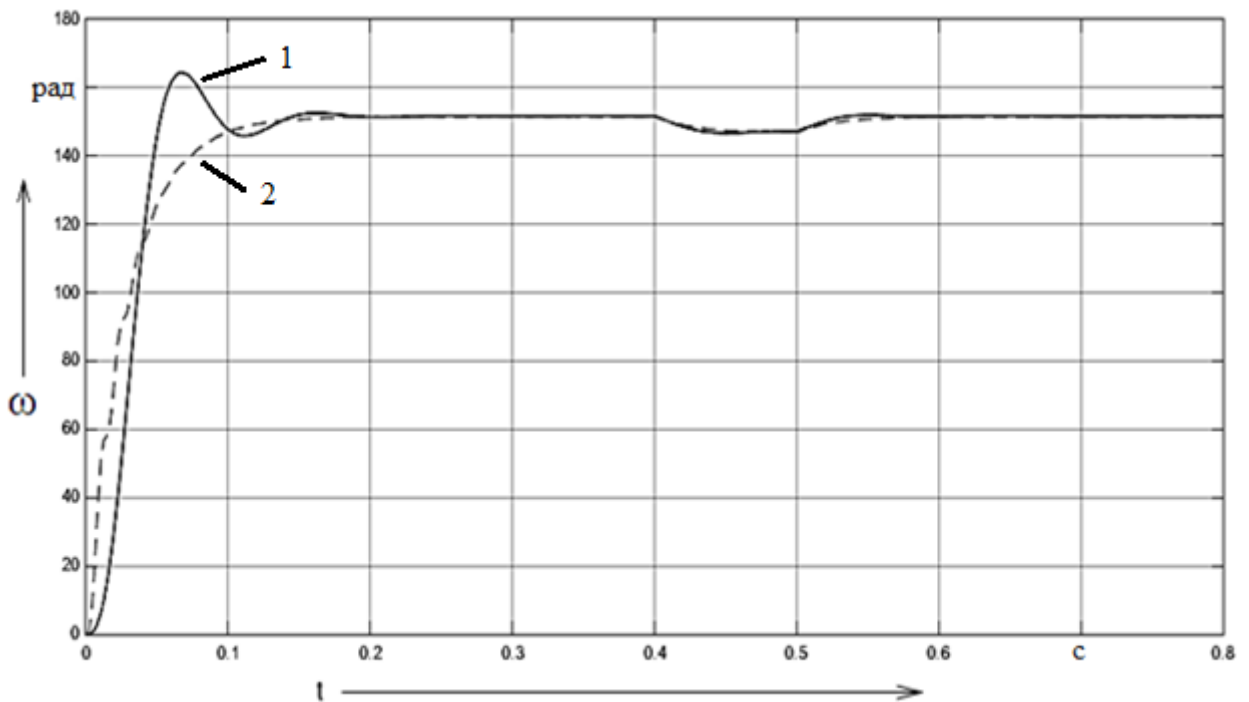
Если «ошибка_по_току» есть P, то «сигнал_управления» есть p,

Если «ошибка_по_току» есть O, то «сигнал_управления» есть o,

Если «ошибка_по_току» есть MO, то «сигнал_управления» есть to.

Проанализируем проведение систем управления при изменении внутренних параметров объекта регулирования, что соответствует проявлению нестационарности этих параметров. Проведем вариацию параметров тиристорного преобразователя в системе управления электроприводом в сторону увеличения коэффициента усиления (K_p) и постоянной времени (T_p) в пределах [20%; 40%]. Задающим сигналом является ступенчатое воздействие величиной $U_n = 8 \text{ В}$. Динамические

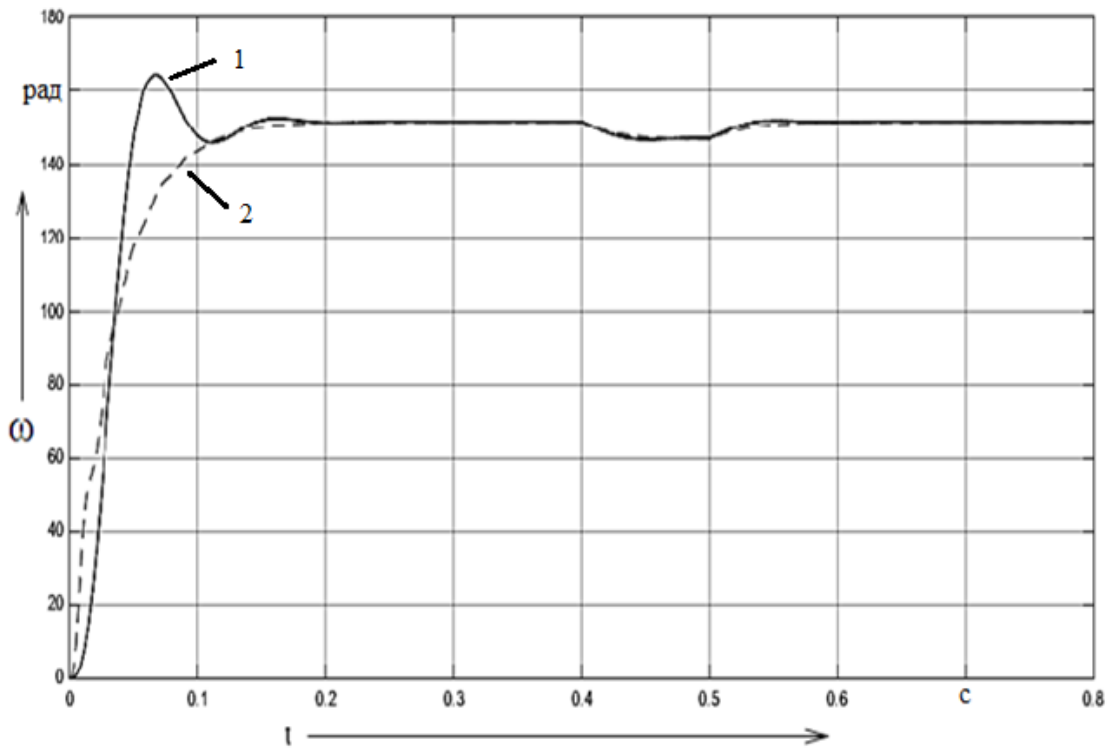
характеристики для классической и интеллектуальной систем управления технологическим процессом показаны на рисунке 1.43.



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором Сугено

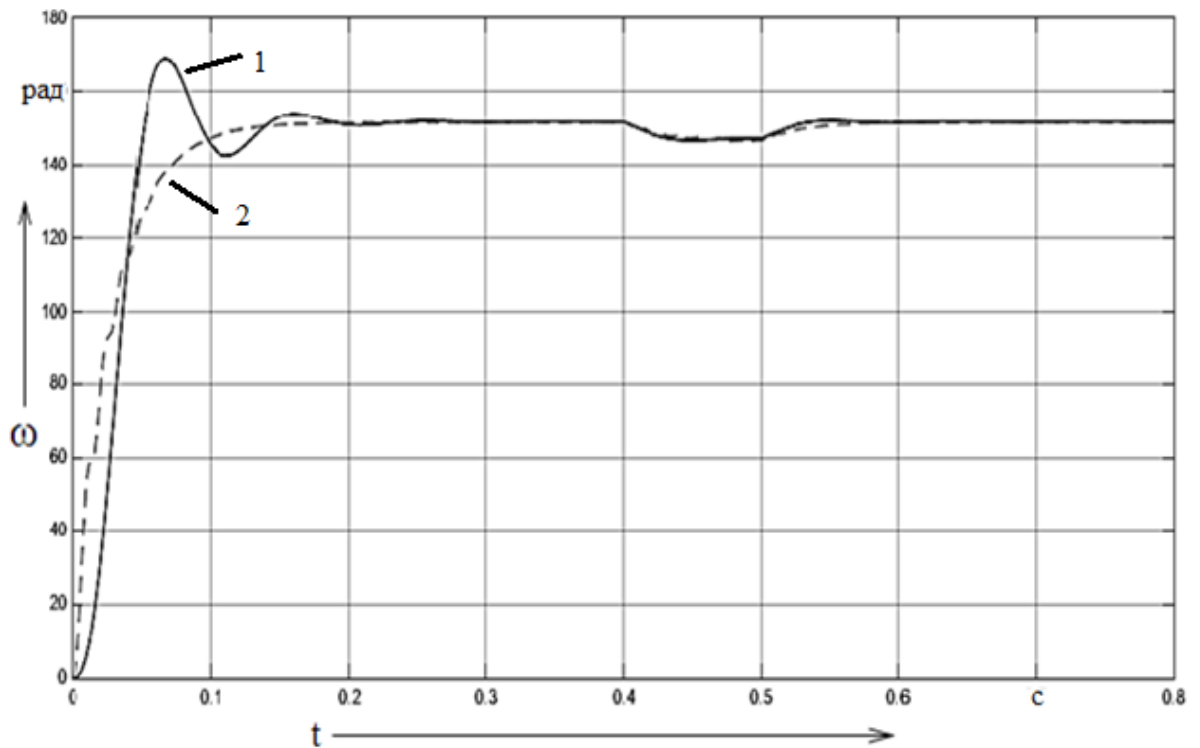
Рисунок 1.43 – Динамические характеристики системы управления при изменении постоянной времени объекта на +20%.

При дрейфе основных параметров тиристорного преобразователя в сторону увеличения на +20% наблюдаются некоторые изменения в основных показателях переходных процессов объекта регулирования технологическим процессом в статическом режиме (рис. 1.43). Анализ основных параметров нечеткого регулятора Сугено показал, что возникновение ошибки в статическом режиме обусловлено распределением функций принадлежности в блоках дефаззификации. Для коррекции этих параметров необходимо провести перераспределение нечетких термов в заданных диапазонах регулирования с их концентрацией в околонулевой зоне. Результат коррекции выходных констант алгоритма Сугено нулевого порядка представлен на рисунках 1.44.



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором

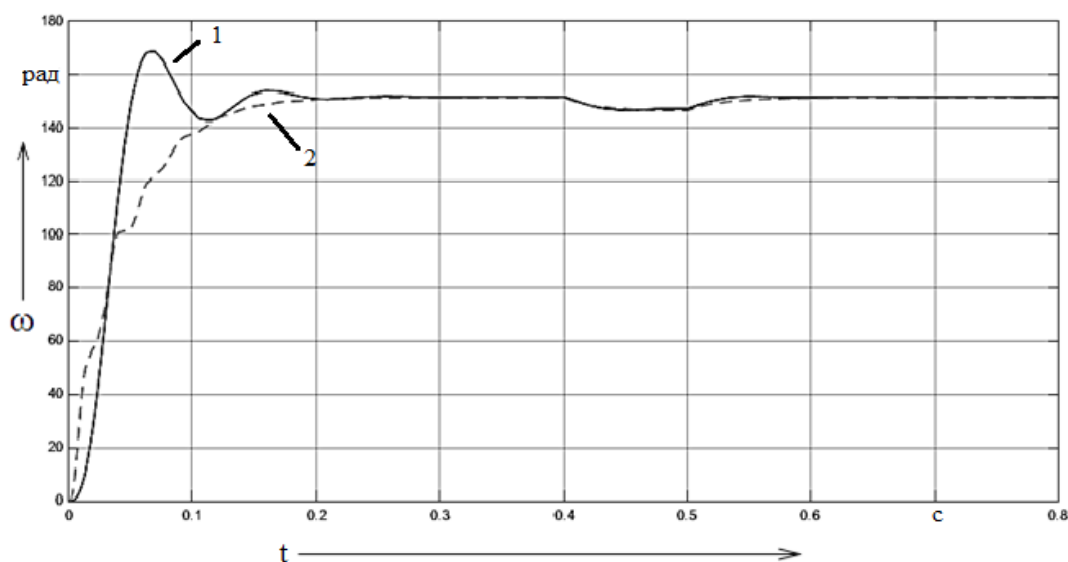
Рисунок 1.44 – Динамические характеристики в системах управления.



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором

Рисунок 1.45 – Переходные процессы в системе управления при изменении постоянной времени объекта на +40%.

При дрейфе основных параметров тиристорного преобразователя в сторону увеличения на +40% наблюдаются некоторые изменения в основных показателях переходных процессов объекта регулирования технологическим процессом в статическом режиме (рис. 1.45). Анализ основных параметров нечеткого регулятора Сугено показал, что возникновение ошибки в статическом режиме обусловлено распределением функций принадлежности в блоках дефаззификации. Для коррекции этих параметров необходимо провести перераспределение нечетких термов в заданных диапазонах регулирования с их концентрацией в околонулевой зоне. Результат коррекции выходных констант алгоритма Сугено нулевого порядка представлен на рисунках 1.46.

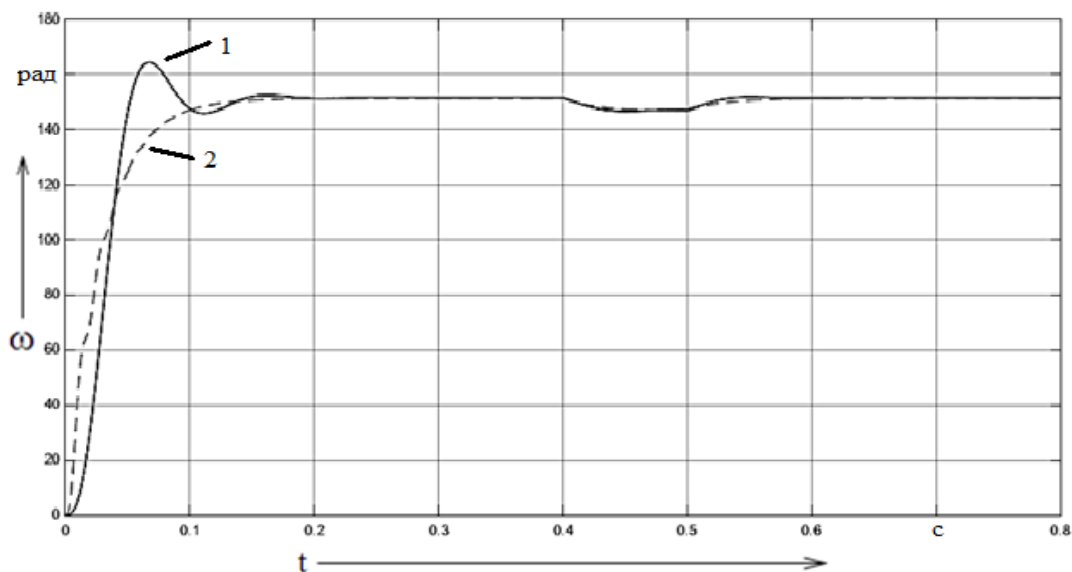


1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором

Рисунок 1.46 – Динамические характеристики в системе управления в результате коррекции.

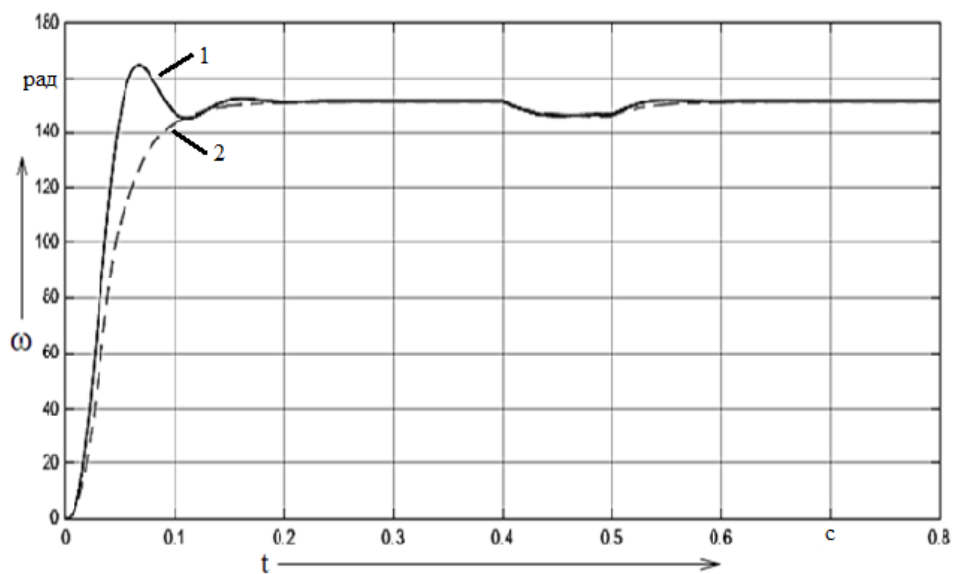
Аналогично проведем анализ нечеткой системы управления с механизмом вывода Мамдани при изменении параметров тиристорного преобразователя в системе управления электроприводом в сторону увеличения коэффициента усиления (K_p) и постоянной времени (T_p) в пределах [20%; 40%]. Задающим сигналом является ступенчатое воздействие

величиной $U_n = 8 \text{ В}$. Динамические характеристики для классической и интеллектуальной систем управления технологическим процессом показаны на рисунках 1.47 и 1.50.



(1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором)

Рисунок 1.47 – Переходный процесс в системе управления при изменении постоянной времени объекта на +20%.



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором

Рисунок 1.48 – Переходный процесс системе управления.

При дрейфе основных параметров тиристорного преобразователя в сторону увеличения на +20% наблюдаются некоторые изменения в основных показателях переходных процессов объекта регулирования технологическим процессом в статическом режиме (рис. 1.47). Анализ основных параметров нечеткого регулятора Мамдани показал, что возникновение ошибки в статическом режиме обусловлено распределением функций принадлежности в блоках дефаззификации. Для коррекции этих параметров необходимо провести перераспределение нечетких термов в заданных диапазонах регулирования с их концентрацией в околонулевой зоне. Результат коррекции выходных нечетких термов алгоритма Мамдани представлен на рисунках 1.48.

Концентрация нечетких термов в околонулевой зоне диапазона распределения блока дефаззификации регулятора, основанного на механизме вывода Мамдани, позволяет снизить значение статической ошибки, и как следствие, влияние параметров тиристорного преобразователя. В результате коррекции распределение нечетких термов будет иметь вид представленный на рисунке 1.49.

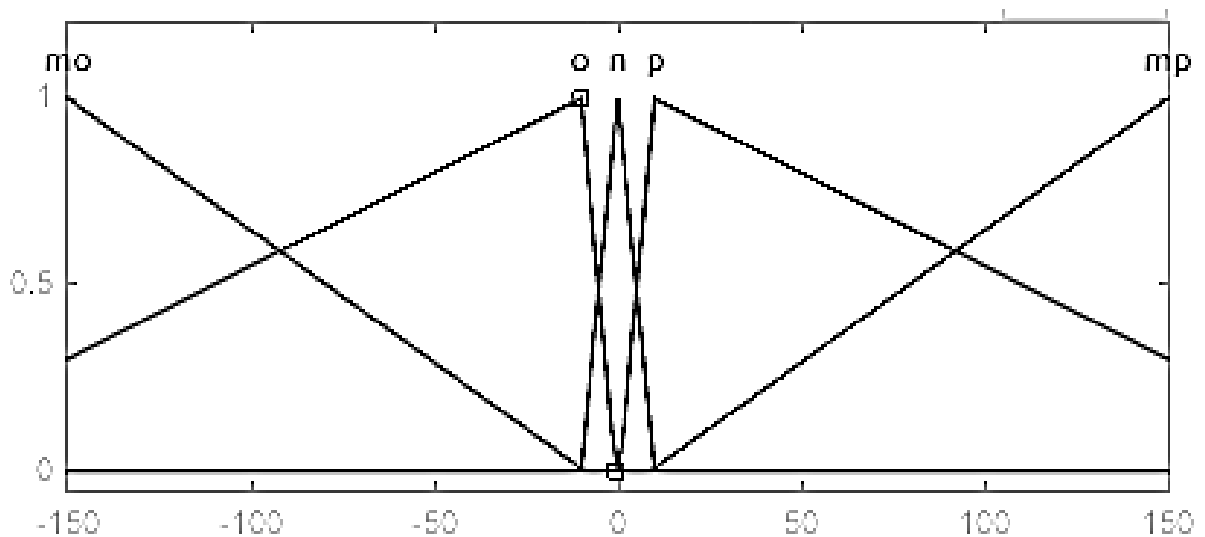
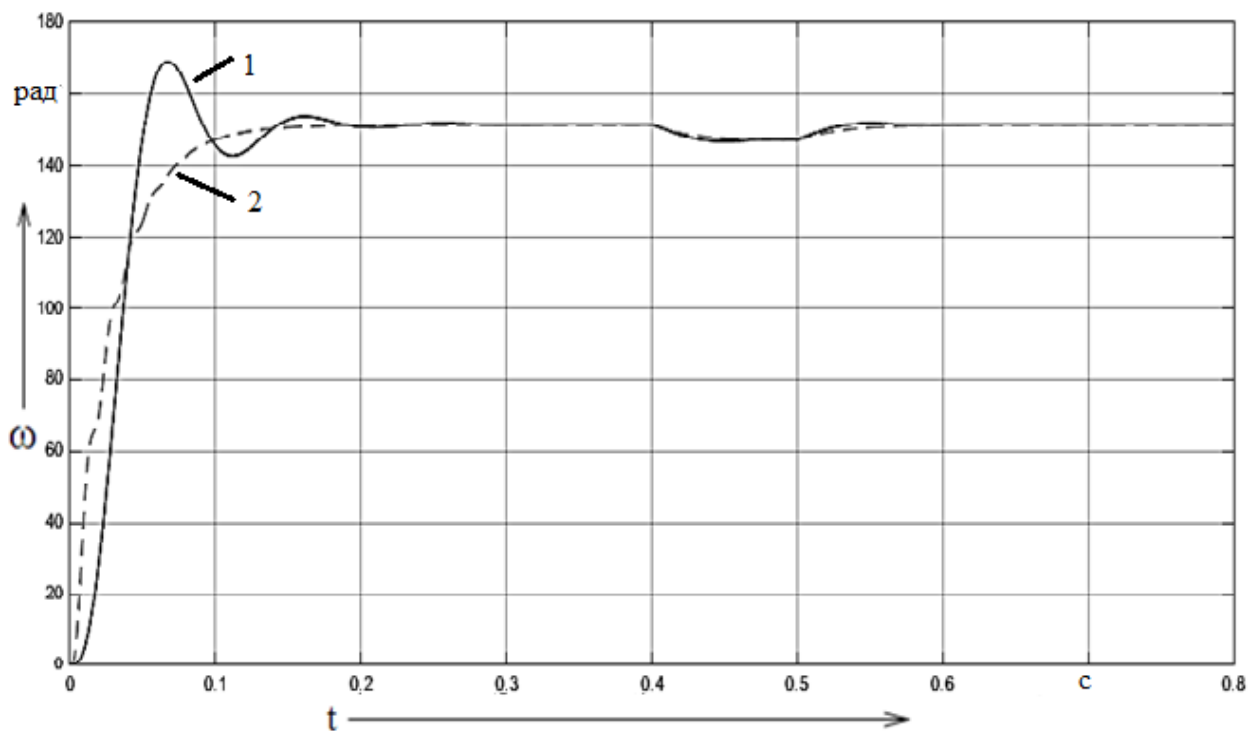


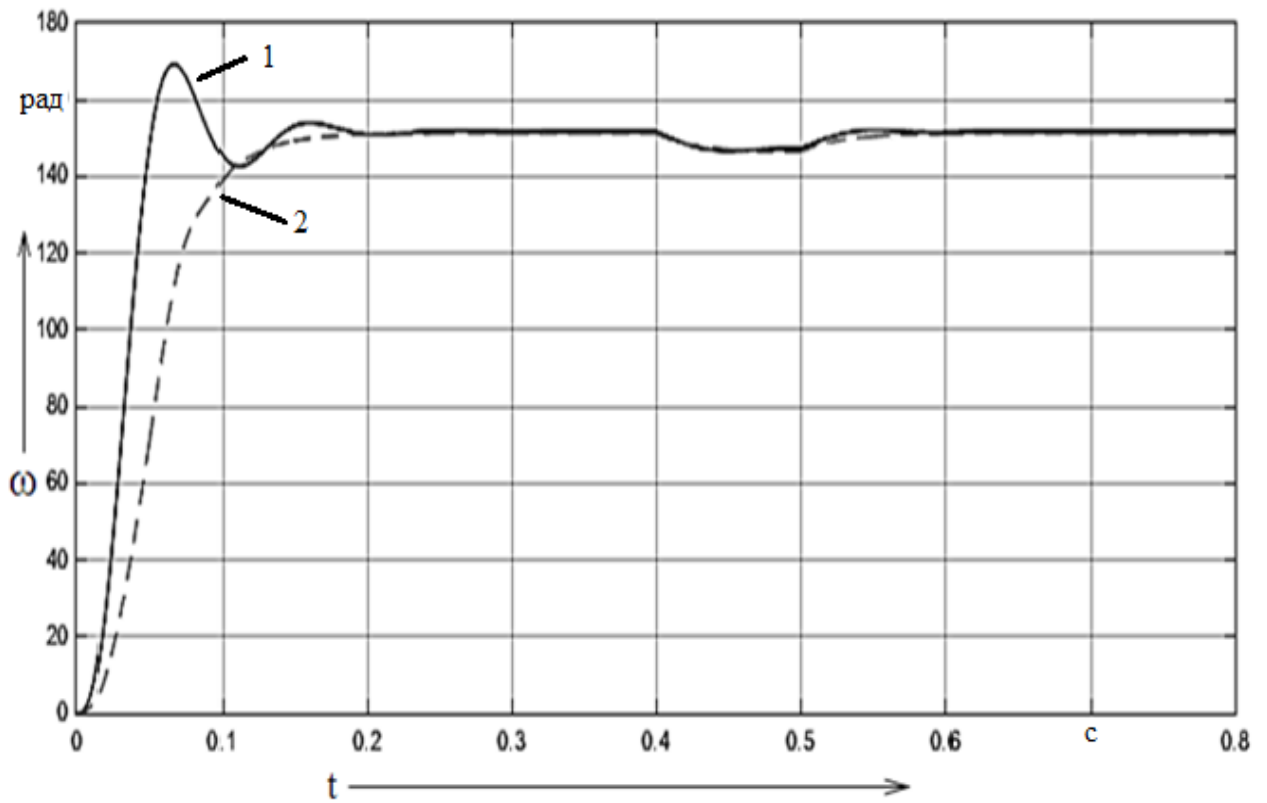
Рисунок 1.49 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «сигнал управления».



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором

Рисунок 1.50 – Переходный процесс в системе управления при изменении постоянной времени объекта на +40%.

При дрейфе основных параметров тиристорного преобразователя в сторону увеличения на +40% наблюдаются некоторые изменения в основных показателях переходных процессов объекта регулирования технологическим процессом в статическом режиме (рис. 1.51). Анализ основных параметров нечеткого регулятора Мамдани показал, что возникновение ошибки в статическом режиме обусловлено распределением функций принадлежности в блоках дефаззификации. Для коррекции этих параметров необходимо провести перераспределение нечетких термов в заданных диапазонах регулирования с их концентрацией в околонулевой зоне. Результат коррекции выходных термов алгоритма Мамдани нулевого порядка представлен на рисунках 1.52.



1 – с классическим регулятором, 2 – с нечетким регулятором

Рисунок 1.51 – Переходный процесс системе управления.

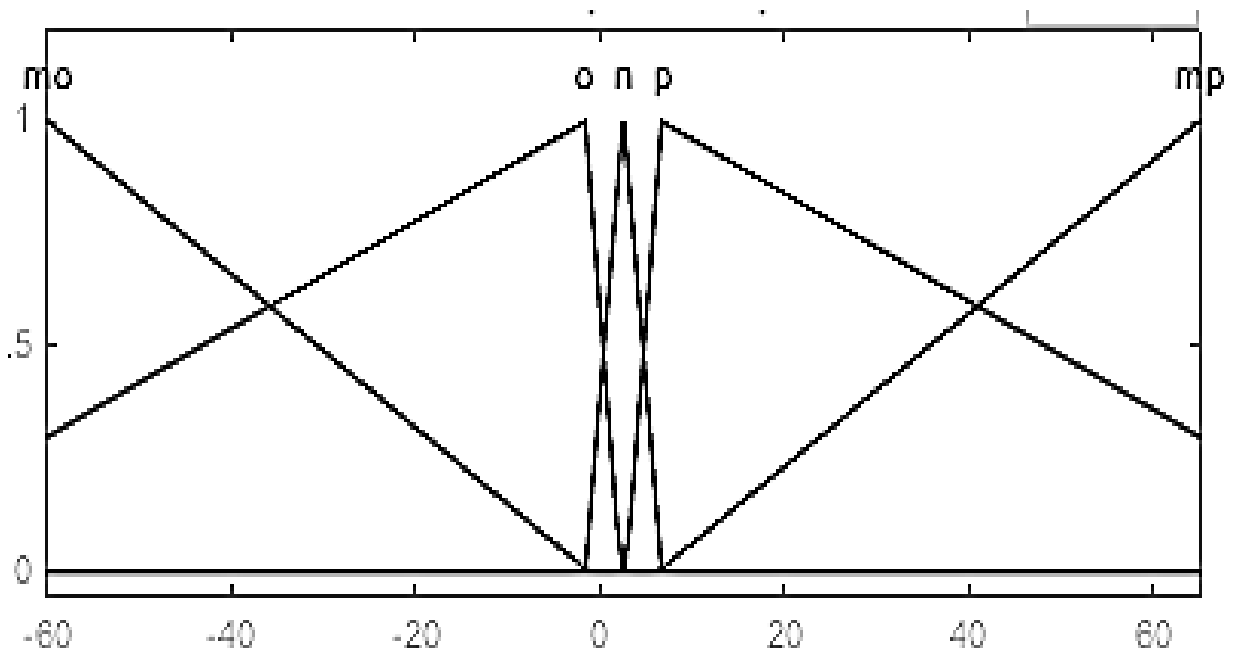


Рисунок 1.52 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «сигнал управления током».

Дополнительная коррекция распределения функций принадлежности с учетом изменения параметров тиристорного преобразователя представлена на рисунке 1.52. Существенное влияние на качество динамических характеристик системы оказывают параметры нечетких регуляторов реализующие механизмы дефаззификации.

Основные параметры, любого переходного процесса при управлении технологическим объектом, как быстродействие и перерегулирование, позволяют определить влияние объектов регулирования даже на настройки систем основанных на принципах искусственного интеллекта.

Отсутствие гибкости присущее регуляторам построенным с применением классических подходов чаще всего сказывается при функционировании систем управления технологическими процессами в условиях нестационарности и недетерминированности внешних и внутренних возмущающих факторов. Одними из важнейших преимуществ интеллектуальных систем основанных на принципах нечеткой логики являются гибкость, адаптивность и робастность в условиях различных не прогнозируемых воздействий, как внешней, так и внутренней среды. Однако наличие некоторых робастных свойств в таких системах управления зачастую сказывается негативно при необходимости регулирования в условиях взаимного влияния координат технологического процесса. Кроме того, ряд робастных свойств нечетких систем проявляются, как сопутствующие и в достаточно узких пределах. С учетом существенной нелинейности нечетких логических регуляторов влияние параметров самого объекта управления технологическим процессом сказывается на ряд параметров косвенно и следовательно выработка инструкций по вариации настроек таких интеллектуальных систем представляет собой некоторую сложность. Однако, влияние объекта управления на параметры настройки блоков дефаззификации достаточно хорошо прослеживается. В таблицах 1.1 и 1.2 показано взаимное влияние параметров объекта регулирования и нечеткого логического регулятора.

Таблица 1.1 – Влияние параметров объекта управления на характеристики функций принадлежности в регуляторе с алгоритмом вывода Сугено.

Параметры объекта регулирования	MP	P	N	O	MO
Номинальные значения ($K_p=33,75$; $T_p=0,007$)	2500	2000	0	-2000	-2500
+20% ($K_p=40,5$; $T_p=0,0084$)	2300	550	5	-2500	-3000
+40% ($K_p=47,25$; $T_p=0,0098$)	2400	280	4	-2500	-2800

Взаимное влияние параметров тиристорного преобразователя в системе управления электроприводом постоянного тока и элементов базового термножества представлены в таблице 1.1. Рост постоянной времени и коэффициента усиления оказывает влияние на выходные константы регулятора Сугено нелинейно, что прослеживается при анализе синглет MP, N и MO.

Анализ результатов моделирования для интеллектуальной системы управления с механизмом вывода Мамдани представлен в таблице 1.2. Аналогично варианту с нечетким регулятором Сугено наблюдается нелинейная зависимость взаимного влияния параметров объекта управления и интеллектуальной системы. Особое влияние параметров тиристорного преобразователя на качество динамических характеристик системы оказывает нечеткая переменная P базового термножества. Возврат системы к заданным показателям качества происходит при существенном снижении размеров площади ее функции принадлежности.

Таблица 1.2 – Влияние параметров объекта управления на характеристики функций принадлежности в регуляторе с алгоритмом вывода Мамдани.

Параметры объекта регулирования	MP	P	N	O	MO
Номинальные значения ($K_p=33,75$; $T_p=0,007$)	[1250;2500;3750]	[0;2000;2500]	[-1250;0;1250]	[-2500;-2000;0]	[-3750;-2500;-1250]
+20% ($K_p=40,5$; $T_p=0,0084$)	[9;150;4800]	[0,6;10;210]	[-10;0;10]	[-210;-10;-0,6]	[-180;-150;-9]
+40% ($K_p=47,25$; $T_p=0,0098$)	[6,25;65;2003]	[2,75;6,67;90]	[-1,67;2,5;6,67]	[-85;-1,67;2,25]	[-72,5;-60;-1,25]

В общем случае влияние параметров объекта регулирования сказывается на величине диапазона регулирования. В случае применения нечетких регуляторов с алгоритмом нечеткого вывода Сугено происходит существенное сужение области определения выходной лингвистической переменной. Анализ взаимного влияния элементов интеллектуальной системы управления использующей механизм Мамдани показал, что особое влияние параметров объекта оказывается на площадь нечетких термов блока дефаззификации.

Выводы по первой главе

Представлена возможная классификация систем управления технологическими процессами с применением аппарата теории нечетких множеств, отличительной особенностью которой является ориентация на расширение функциональных возможностей нечеткого логического регулятора. Что в свою очередь позволяет расширить круг задач, решаемых системами управления с элементами искусственного интеллекта.

Показано взаимодействие различных блоков нечеткого логического регулятора при решении типовых задач интеллектуального управления различными объектами. Проанализировано влияние параметров нечеткого регулятора, реализованного по стандартной структуре на показатели качества регулирования системы управления, и показано каким образом необходимо варьировать компоненты нечеткого регулятора с учетом нестабильности параметров регулируемого объекте.

На основании предложенной классификации проанализированы достоинства и недостатки различных задач решаемых в рамках реализации законов управления нечеткими системами, а также определены направления их возможного развития.

Выявлено, что дальнейшее развитие нечетких систем управления технологическими процессами возможно с учетом двух важных направлений, либо повышение интеллектуальности таких систем, за счет расширения функциональной вложенности структуры НЛР, либо за счет введения дополнительных переменных в параметры функций принадлежности. При этом, повышение интеллектуальной составляющей должно проводится при условии снижения информационной нагрузки с целью обеспечения приемлемых условий по аппаратной реализации таких интеллектуальных систем.

Использование подходов, основанных на применении многокаскадных нечетких регуляторов, позволит ослабить влияние вышеотмеченных факторов и определит возможности для комплексного решения целого ряда описанных выше задач, исключая возможный набор сопутствующих ограничений, накладываемых на систему управления, связанных как с изменением диапазонов регулирования и пределов изменения входных сигналов, так и выработкой компромиссных процедур управления в условиях многокритериальности, многокоординатности и существенной взаимосвязанности координат объекта.

2 Глава. Разработка математического описания нечеткого логического регулятора с развитой структурой

Исследование процессов, протекающих на объектах управления, функционирующих в условиях неопределенности, неполноты информации и слабоструктурированности с применением аппарата нечеткой логики, можно охарактеризовать некоторой двойственностью. С одной стороны, управление объектами регулирования, обладающими достаточно адекватной математической моделью, представляет собой, в общем, задачу типичную, и проблема необходимости применения нечеткого регулятора диктуется дополнительными условиями. С другой стороны, применение такого аппарата в общепринятом смысле для объектов регулирования ориентировано на объекты, которые можно охарактеризовать как многокоординатные и многокритериальные.

Реализация и исследование нечетких систем управления различными технологическими процессами подразумевает использование в своей структуре нечеткого логического регулятора. При этом в традиционном классическом понимании синтез таких интеллектуальных систем сводится к настройке блоков фаззификации и дефаззификации, а также составлению набора нечетких продукционных правил. Методики и алгоритмы синтеза параметров этих блоков достаточно широко освещены в технической литературе [42, 95, 98, 110, 128, 139, 140, 142]. Такой подход в построении нечетких систем управления успешно реализуем, если объект регулирования характеризуется невысокой степенью неполноты информации и для определения процедур управления им достаточно использовать один параметр, представленный в нечетком виде.

Попытки реализации нечетких систем управления технологическими объектами, важнейшей особенностью которых является наличие внутренней взаимосвязи между несколькими параметрами и описание такой взаимосвязи,

представляется весьма сложной аналитической задачей, заставившей пользователей искать новые подходы, связанные с расширением информационных и интеллектуальных возможностей систем управления, реализованных на аппарате мягких вычислений. На сегодняшний день можно указать на три возможных пути повышения интеллектуальных и информативных свойств систем управления, использующих в своей структуре нечеткие регуляторы. Это прямое увеличение количества входных параметров нечеткого модуля, использование нечеткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности и реализация многокаскадной структуры регулятора, основанного на мягких вычислениях [111, 131-133, 293].

Прямое увеличение количества входных параметров нечеткого модуля обуславливает повышение информационной составляющей, но зачастую приводит к существенному росту алгоритмической сложности нечеткого регулятора при распределении функций принадлежности в заданных диапазонах управления и к значительному росту количества продукционных правил. Кроме того, реализация этого подхода для объекта регулирования высокой сложности, характеризуемого неполнотой информации о внутренних связях между целым рядом координат этого объекта, наталкивается на трудности, связанные с выбором состава экспертов и делает выполнение его труднодостижимым.

Одним из возможных путей устранения недостатков нечетких систем, представленных выше, является использование моделей нечетких многокаскадных модулей, представленных на рисунках 2.1 и 2.2.

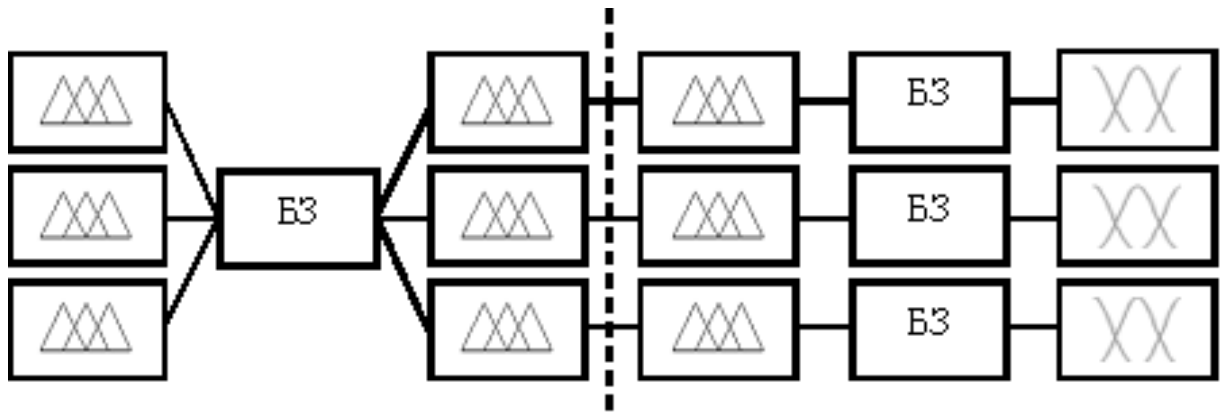


Рисунок 2.1 – Функциональная схема многокаскадного нечеткого регулятора.

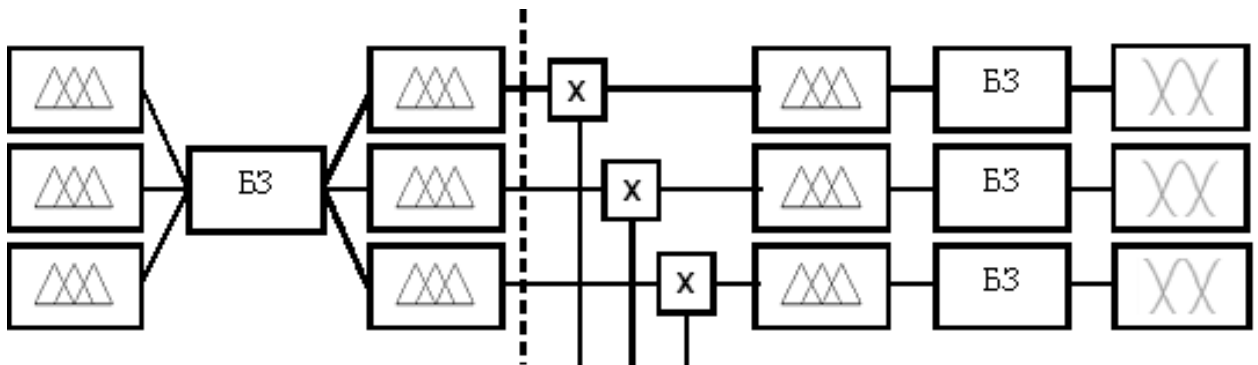


Рисунок 2.2 – Функциональная схема многокаскадного нечеткого регулятора с дополнительными информационными каналами.

Различия в структурах МНЛР, представленных на рисунках 2.1, 2.2, обусловлены сочетаниями алгоритмов нечеткого вывода в каскадах интеллектуальной структуры. Для реализации прогнозирующих модулей или при необходимости использования нечетких результатов выводов в расширенном формате целесообразно использование нечеткого регулятора с алгоритмами нечеткого логического вывода Мамдани-Мамдани. В случае использования алгоритма нечеткого вывода Сугено во внешнем каскаде, зачастую необходимо введение дополнительных координат с объекта управления, что определяет возможность дополнительного повышения информативности системы управления в целом, но вместе с тем приводит к существенному усложнению такого нечеткого регулятора.

Основными проблемами нечетких многокаскадных систем являются трудность при выборе согласования нечетких выводов внутри каскадов, а также их структурная реализация при передаче координат системы через каскады. Вместе с тем технология многокаскадного интеллектуального управления позволяет упростить процедуру построения нечеткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности.

Реализация нечетких систем с пространственными функциями принадлежности нивелирует целый ряд недостатков, связанных с количеством координат объекта и взаимосвязями между ними. Однако возникают значительные сложности при реализации блоков фаззификации и дефаззификации с учетом необходимости выбора разрезающих плоскостей, достаточной дискретизации таких функций принадлежности и распространения представленных функций принадлежности в объеме регулирования [112, 173].

Функционально структура нечеткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности (рисунок 2.3) может быть реализована с применением технологии многокаскадного построения системы. Для реализации такого подхода на регуляторы во внешнем и внутреннем каскадах необходимо наложить ряд дополнительных требований. Второй каскад может быть представлен набором аналогичных нечетких регуляторов, основное отличие которых состоит в необходимом смещении нечетких переменных относительно друг друга. Задача формирования пространственных функций принадлежности, а именно смещения этих регуляторов по временной оси, моделируется в первом каскаде.

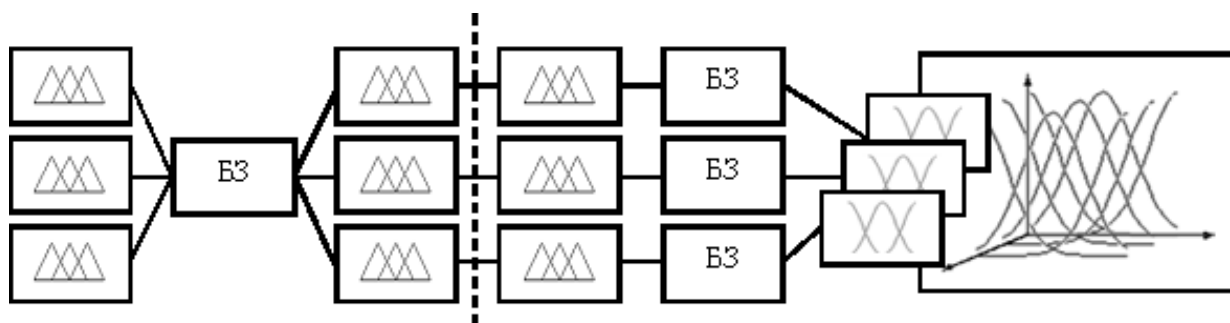


Рисунок 2.3 – Структура нечеткого логического регулятора с пространственными функциями принадлежности.

Примером реализации нечеткого регулятора с пространственными функциями принадлежности по технологии многокаскадного регулирования является модель ПИД-регулятора. В представленной интеллектуальной системе реализован нечеткий регулятор с пространственными функциями принадлежности в блоке дефаззификации.

Функционально многокаскадная нечеткая система регулирования может быть реализована в виде двух каскадов нечетких модулей (рис. 2.4). На первый каскад возлагается задача интеллектуального переключения соответствующих каналов нечеткого ПИД-регулятора с целью реализации в системе гибко изменяющегося закона управления. Второй каскад представлен набором простейших нечетких модулей, отличающихся друг от друга диапазонами формализации составляющих управляющего сигнала.

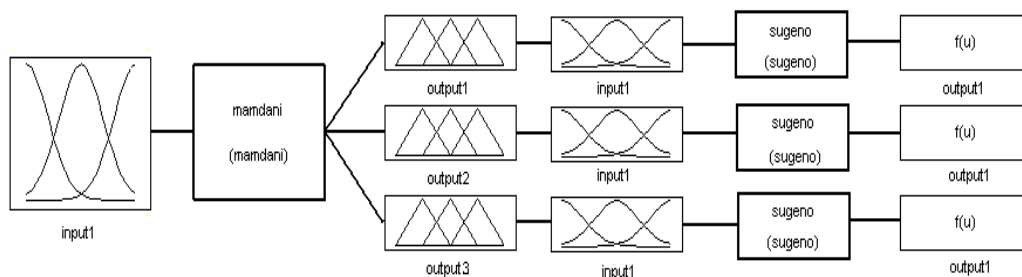


Рисунок 2.4 – Функциональная схема многокаскадного нечеткого логического регулятора.

Структурное построение многокаскадного нечеткого регулятора будет зависеть как от особенностей функционирования объекта управления, так и от выбора алгоритма вывода интеллектуального модуля внешнего каскада.

2.1 Разработка математического описания многокаскадного нечеткого логического регулятора для различных алгоритмов вывода

Обобщенная функциональная схема многокаскадного нечеткого логического регулятора представлена на рисунке 2.5.

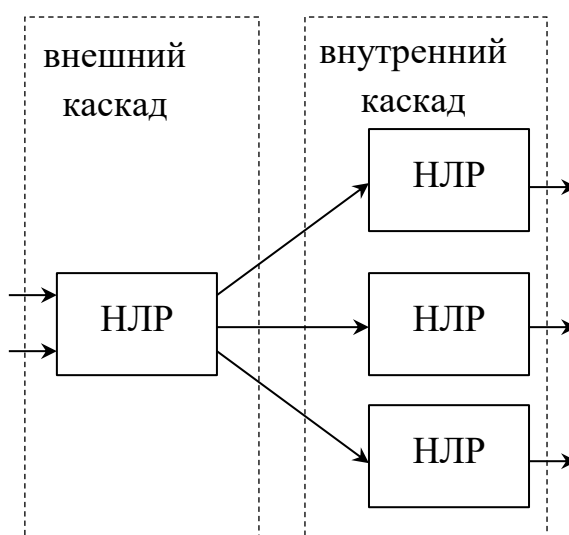


Рисунок 2.5 – Функциональная схема многокаскадного нечеткого регулятора.

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

$$\text{Если } x_1 \text{ есть } A_1^i \text{ и } \dots \text{ и } x_n \text{ есть } A_n^i \text{ то } y_1 \text{ есть } B_1^i \text{ и } \dots \text{ и } y_m \text{ есть } B_m^i, \quad (1)$$

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 формируем итоговую классическую переменную определяющую сигнал управления. Рассмотрим отдельно antecedentную и consequentную 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 consequentной части:

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

Consequentная 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 consequентами 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 (рис. 2.6). 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 упрощенного алгоритма нечеткого вывода или 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.

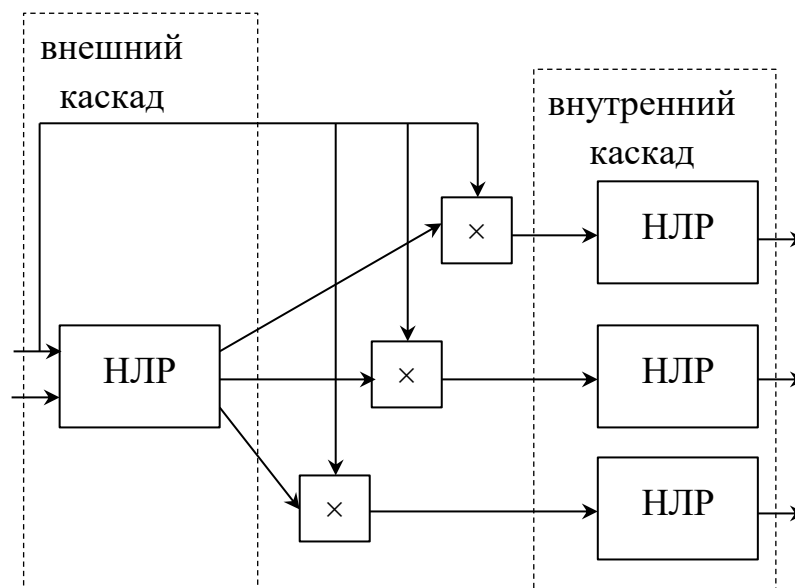


Рисунок 2.6 – Функциональная схема многокаскадного нечеткого регулятора с алгоритмом нечеткого вывода Сугено во внешнем каскаде.

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 применения метода 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.

Предположим для простоты, что каждый элемент вложенного каскада представляет собой нечеткий логический регулятор с единственной входной и выходной лингвистическими переменными. Тогда стандартный набор продукционных правил будет иметь следующий вид:

Если z_0^i есть C^i то s 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:

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

С учетом предложенного подхода развитая интеллектуальная система управления технологическим объектом, реализующая ПИД-закон

регулирования, будет выглядеть следующим образом. Нечеткий регулятор, реализующий функции выбора и классификации каналов регулирования и установленный во внешний каскад, структурно будет представлять собой набор из одной входной и трех выходных лингвистических переменных, вырабатывающих сигналы коррекции, для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих закона регулирования. Формализация входной и выходных лингвистических переменных, рассматриваемого регулятора, может быть представлена аналогичными наборами нечетких переменных $T=\{NS, Z, PS, PB\}$, отличающихся распределением функций принадлежности (рис. 2.7 - 2.10) по соответствующим диапазонам изменения, составляющих закона управления. Каждый вход и выход описываются определенным набором термов.

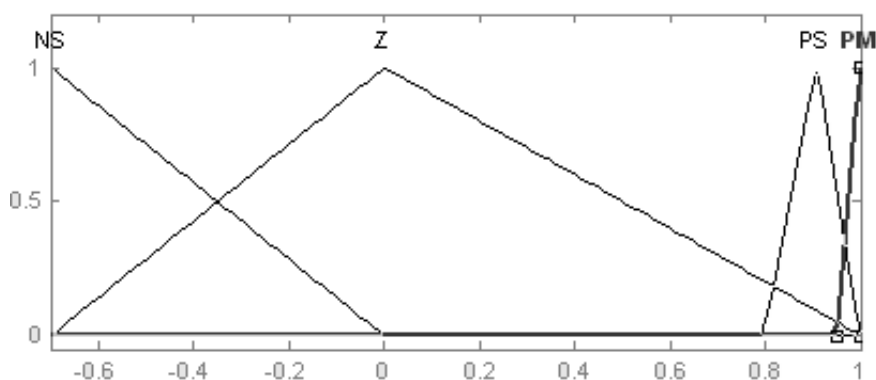


Рисунок 2.7 – Функции принадлежности входной лингвистической переменной.

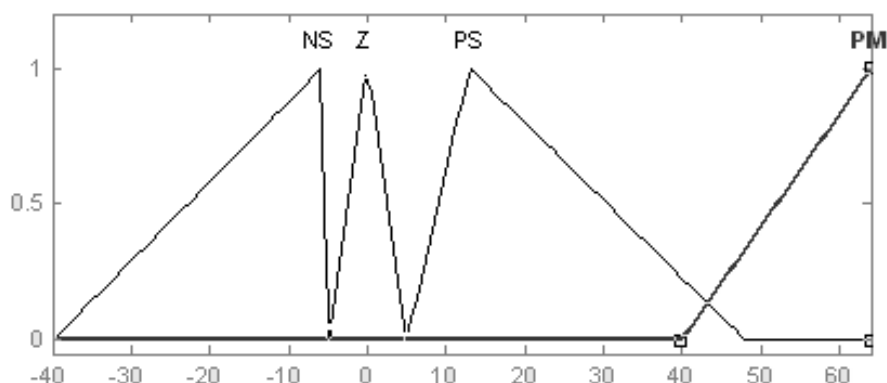


Рисунок 2.8 – Функции принадлежности лингвистической переменной первого выхода.

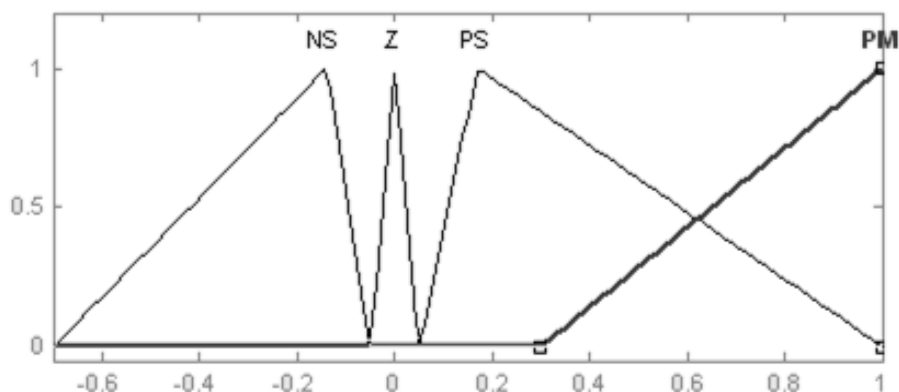


Рисунок 2.9 – Функции принадлежности лингвистической переменной второго выхода.

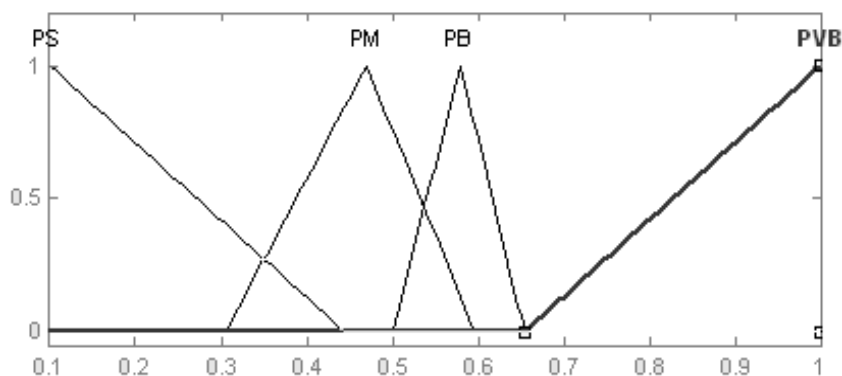


Рисунок 2.10 – Функции принадлежности лингвистической переменной третьего выхода.

База знаний нечеткого регулятора состоит из четырех нечетких правил продукций, связывающих значения информационных составляющих на входе и выходе вида:

Если «ошибка1_системы» есть PB, тогда «сигнал_коррекция1» есть PB, «сигнал_коррекция2» есть PB и «сигнал_коррекция3» есть PVB;

Если «ошибка1_системы» есть PS, тогда «сигнал_коррекция1» есть PS, «сигнал_коррекция2» есть PS и «сигнал_коррекция3» есть PB;

Если «ошибка1_системы» есть Z, тогда «сигнал_коррекция1» есть NS, «сигнал_коррекция2» есть NS и «сигнал_коррекция3» есть PS;

Если «ошибка1_системы» есть NS, тогда «сигнал_коррекция1» есть Z, «сигнал_коррекция2» есть Z и «сигнал_коррекция3» есть PM.

Нечеткий логический регулятор, который размещается во втором каскаде и заменяет каждую из составляющих ПИД-регулятора, состоит из

одной переменной на входе и набора постоянных коэффициентов. Входная лингвистическая переменная описывается терм-множеством $T=\{S, PS, PM, PB, PVB\}$ и функциями принадлежности треугольного типа с параметрами и распределением представленными на рисунке 2.11.

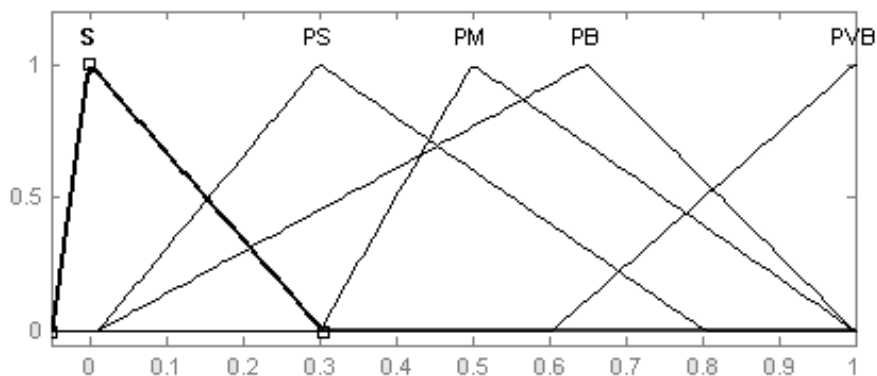


Рисунок 2.11 – Терм-множество лингвистической переменной на входе нечеткого логического регулятора внешнего каскада.

Выходная лингвистическая переменная $T=\{NS, PS, PB\}$, формализуется набором из трех постоянных коэффициентов, что определено выбором алгоритма нечеткого логического вывода, а именно Сугено нулевого порядка. База знаний нечеткого регулятора состоит из четырех нечетких продукционных правил вида:

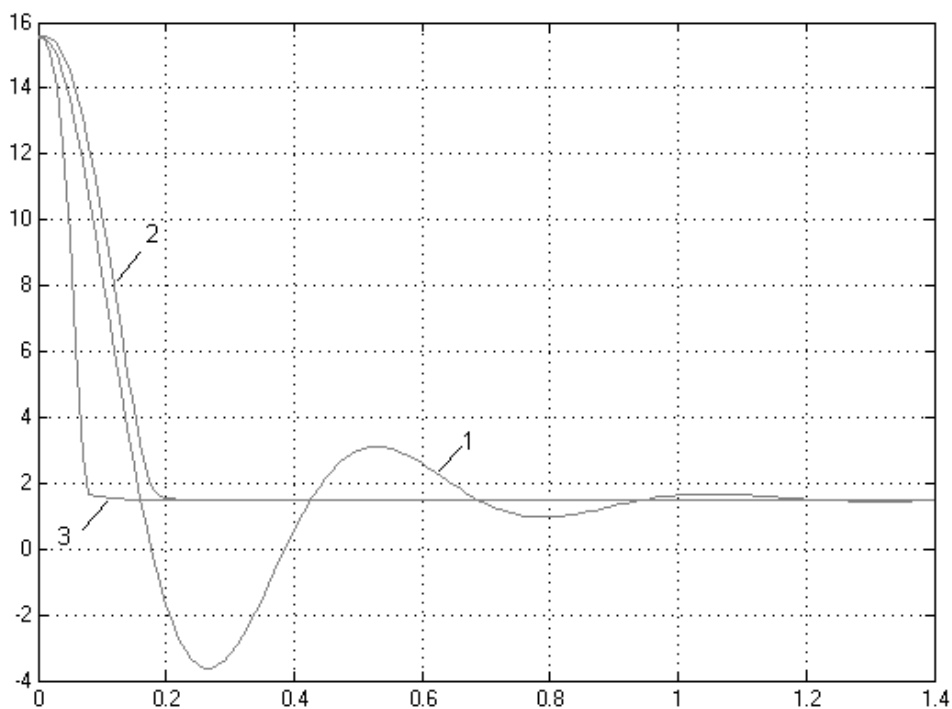
Если «ошибка_системы» есть PB, тогда PS=6;

Если «ошибка_системы» есть PVB, тогда PB=14,54;

Если «ошибка_системы» есть PM, тогда NS=-2;

Если «ошибка_системы» есть PS, тогда NS=-2.

Для подтверждения работоспособности предложенного принципа реализации многокаскадного нечеткого регулятора на рисунке 2.12 приведены кривые моделирования системы управления технологическим процессом, объект регулирования которым описывается полиномом второго порядка. Для сравнения на рисунке приведены три графика переходных процессов системы с ПИД-регулятором, с нечетким регулятором, а также система с многокаскадным нечетким регулятором.



1 - классический ПИД-регулятор; 2 - типовая модель НЛР;
3 - многокаскадная нечеткая система.

Рисунок 2.12 – Графики переходных характеристик исследуемых систем на выходе регуляторов.

Необходимо отметить, что реализация рассматриваемого двухкаскадного нечеткого логического регулятора, аппроксимирующего классический ПИД – закон регулирования, представляла собой структуру, во внешнем каскаде, которой применялся нечеткий переключающий модуль, реализованный по алгоритму нечеткого вывода Сугено. В каждом из трех каналов регулирования, образующих внутренний каскад и формирующих интегральную, дифференциальную и пропорциональную составляющие ПИД-закона управления расположены три одинаковых НЛР (одинаковые НЛР для универсальности). Таким образом, на внешний каскад возлагается задача по гибкой реализации необходимого закона управления от П до ПИД.

Следует подчеркнуть, что рассмотренный выше подход каскадного построения нечеткого логического регулятора по своей структуре позволяет использовать пространственные функции принадлежности не только на

выходе нечеткой системы управления, что характерно в большей степени для прогнозирующих модулей, но и на входе для реализации систем распознавания и систем с большим количеством обрабатываемых координат.

Рассмотренный подход расширения интеллектуальных свойств нечеткой системы за счет использования нечетких многокаскадных модулей позволяет повысить эффективность функционирования системы. Несмотря на некоторое структурное усложнение НЛР, его алгоритмическая сложность практически не возрастает. Кроме того, данный подход позволяет оперировать с пространственными функциями принадлежности, при этом осуществляется гибкость выбора плоскости рассечения функций принадлежности, простота реализации БЗ.

2.2 Разработка структурных решений построения многокаскадного нечеткого логического регулятора

В настоящий момент системы, работающие на принципах нечеткой логики, находят свое применение во многих сферах человеческой деятельности, и области их использования постоянно расширяются. Одно из направлений развития нечетких систем является построение регулятора, использующего многокаскадную систему нечеткого вывода. Применение многокаскадности позволяет существенно увеличить интеллектуальность системы, что далее позволит значительно расширить диапазон применения нечетких систем. В последнее время появляется все больше публикаций по использованию нечетких принципов в системах управления электроприводами как постоянного, так и переменного тока. Это продиктовано, прежде всего, тем, что построение систем управления электроприводами в классическом варианте базируется на введении целого ряда допущений [124, 156, 252, 270, 289].

Для оценки эффективности выше сформулированного подхода рассмотрим синтез многокаскадного нечеткого регулятора в структуре системы управления электроприводом постоянного тока. В данном случае нечеткий блок управления, формирующий необходимый закон управления, будет представлять собой информационную структуру, содержащую классифицирующий модуль внешнего каскада с двумя входами и тремя выходами, а также набор из двух простейших управляемых интеллектуальных элементов внутреннего каскада с одним входом и одним выходом каждый.

На различные каскады в развитой интеллектуальной системе регулирования накладываются различные функции. В общем случае нечеткий многокаскадный регулятор можно рассматривать как экспертную систему, в которой внешний каскад решает задачу классификации входного задающего сигнала и в зависимости от состояния объекта управления выполняет переключение элементарных нечетких модулей вложенного каскада. Задачу формирования различных законов и процедур управления осуществляет набор элементов внутреннего каскада.

Итоговое управляющее воздействие представляет собой выборку, сформированную из совокупности выходов нечеткого многокаскадного регулятора, которая в последствии может быть преобразована в единый сигнал управления путем суммирования, реализуемых всеми элементарными модулями наполняющими вложенный каскада и использующими упрощенный алгоритм нечеткого вывода.

При реализации модели объекта управления как многоконтурной системы целесообразно использовать сигналы ошибок, каждого из контуров как входные воздействия для многокаскадного нечеткого регулятора. Такой выбор информационной составляющей входной выборки для реализации интеллектуальной системы управления представляется наиболее полным и типичным, в частности, для систем подчиненного регулирования. Однако в случае отсутствия возможности оценки такого рода сигналов, при

реализации развитой нечеткой системы, возможно использование любых координат объекта управления в качестве информационных, для которых существует возможность их съема, например при наличии датчиков. Следует отметить, что применение такого подхода позволяет варьировать количество вложенных модулей, применять эти модули полностью или частично в условиях определенной наступившей текущей ситуации. При этом необходимо подчеркнуть, что функции принятия решений о применении того или иного канала регулирования или их сочетания полностью возлагается на регулятор внешнего каскада.

Существует целый ряд структурных решений при построении моделей многокаскадных нечетких регуляторов, форма которых определяется выбором алгоритмов выводов для модуля внешнего каскада. Вначале рассмотрим структуру, реализующую аналог классического ПИД-регулятора (рисунок 2.13), когда в первом каскаде стоит один НР, а во втором – три подчинённых НР на каждую составляющую. Объект управления – система управляемый преобразователь - электродвигатель постоянного тока, в широко используемой форме математического описания. Для выявления наилучших технических решений исследование нечеткой системы управления будем проводить с возможными комбинациями алгоритмов выводов в каскадах регулятора.

Первый вариант. Рассмотрим синтез нечеткой многокаскадной системы с алгоритмом вывода Мамдани в первом и во втором каскаде так, чтобы на вход поступал сигнал ошибки, а выходным являлся сигнал управления.

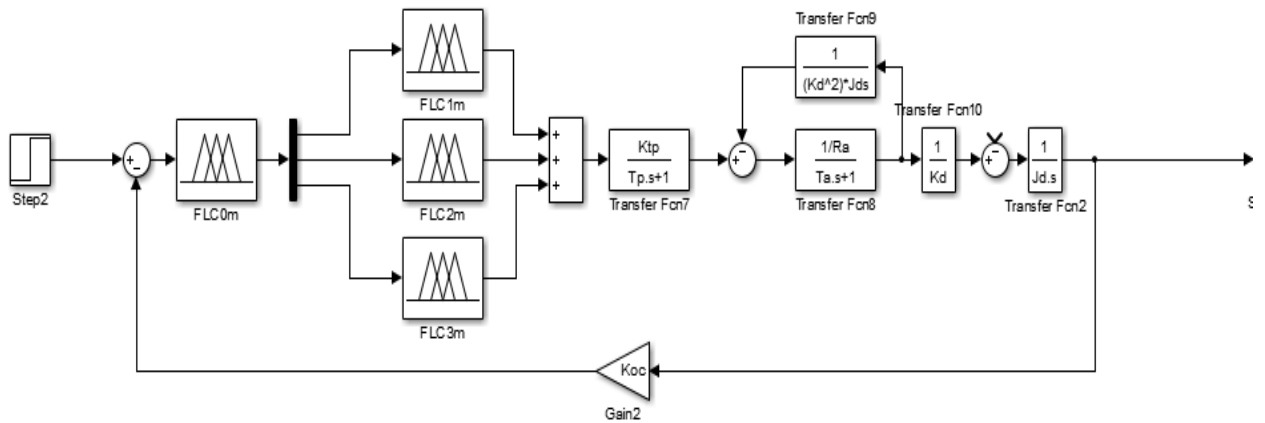


Рисунок 2.13 – Модель интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечетким регулятором.

Управление каскадом и интенсивностью работы задающего устройства осуществляется нечетким контроллером (FLC0m) – аналогом нечеткого ограничителя. Интеллектуальные свойства нечеткого регулятора дают возможность формировать корректирующее воздействие на каждый локальный канал управления. Регулятор формирует корректирующие поправки заменяющие коэффициенты $K1$, $K2$ и $K3$ ПИД – регулятора.

Все выходы нечеткого контроллера приходят на один общий сумматор, формируя сигнал управления.

Данная система должна обеспечить формирование переходных характеристик рассматриваемых каналов близких к полученным в системе с ПИД-регулятором и в системе с НЛР (или улучшить эти характеристики). Функциональная схема такого многокаскадного нечеткого логического регулятора может быть представлена в виде показанном на рисунке 2.14.

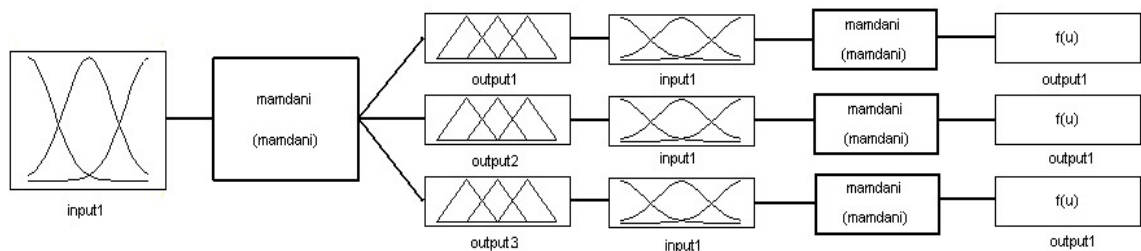


Рисунок 2.14 – Функциональная схема МНЛР.

Основная задача, которая должна решаться нечетким логическим регулятором это реализация корректирующего воздействия в заданном диапазоне изменения динамической ошибки системы управления технологическим процессом. Выбор алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани обусловлен его интуитивностью и простотой формализации качественной информации. Однако, основными направлениями применения такого алгоритма вывода остаются экспертные системы, механизмы решателей и системы принятия решений. Применение алгоритма Мамдани для реализации законов регулирования техническими системами зачастую ограничивается некоторыми сложностями при воспроизведении операции приведения к четкости.

Реализованный в системе нечеткий логический регулятор Мамдани на единственный вход получает информацию о состоянии сигнала ошибки системы. Выход организован тремя каналами регулирования для пропорциональной интегральной и дифференциальной составляющих закона управления.

Функциональная схема НЛР представлена на рисунке 2.15.

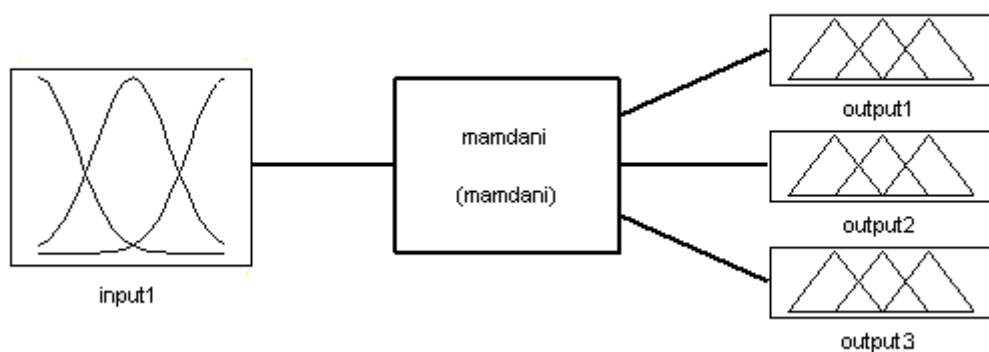


Рисунок 2.15 – Функциональная схема нечеткого логического регулятора

Каждый вход и выход описываются определенным набором термов. Настройка НЛР осуществляется в соответствии с функциональной схемой приведенной на рисунке 2.15.

Введём входную лингвистическую переменную «*ошибка_1*». Для всех внутренних термов входной переменной назначим треугольные функции принадлежности (это продиктовано только наглядностью и упрощением процедуры синтеза).

Учитывая, что к виду переходной характеристики системы не предъявляются специальные требования, для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечеткого контроллера базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне 3-5. Число нечетких переменных в базовом-терм множестве может варьироваться в относительно большом диапазоне, что в итоге приводит к росту объема базы продукционных правил регулятора, но не дает повышения точности системы, как было отмечено в разделе 1.5.

Терм множество – $T2$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T2 = \{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое».

Количественные характеристики функций принадлежности определим в зависимости от диапазона изменения параметра, для которого строятся функции принадлежности его термов. Диапазоны изменения параметров были получены из результатов моделирования ПИД-регулятора. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-2.4; 10]$. Исходя из того, что данная входная переменная имеет 4 терма, получим следующие функции принадлежности, представленные на рисунке 2.16.

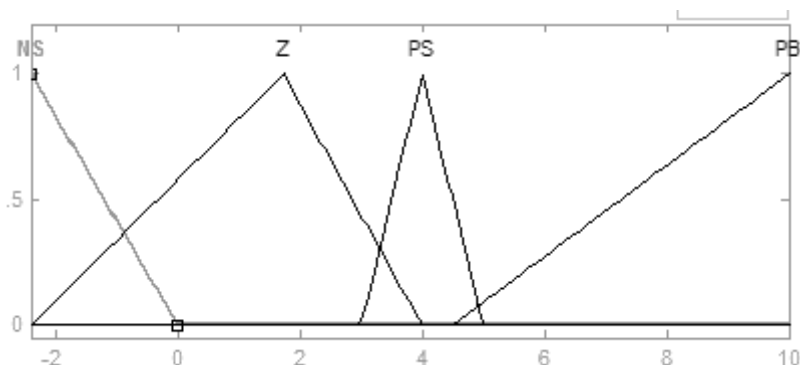


Рисунок 2.16 - Функции принадлежности лингвистической переменной «*ошибка_1*».

Введем выходные лингвистические переменные «коррекция_1», «коррекция_2», «коррекция_3». Для всех внутренних термов выходных переменных, назначим треугольные функции принадлежности.

Диапазон изменения корректирующего воздействия взят с расчётом, чтобы управляющее воздействие действительно могло влиять на систему. Для каждого из трёх выходов он имеет своё значение [124].

Для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечеткого контроллера базовое терм-множество выходных лингвистических переменных ограничим на уровне четырех, также как и для входной лингвистической переменной. Для трёх выходных сигналов зададимся тремя терм-множествами – $T3$, $T4$, $T5$ соответственно.

Рассмотрим первый выход НЛР. Терм-множество $T3$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T3 = \{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон управляющего воздействия для этого выхода принят $[-40; 64]$, а вид функции принадлежности корректирующего сигнала приведены на рисунке 2.17.

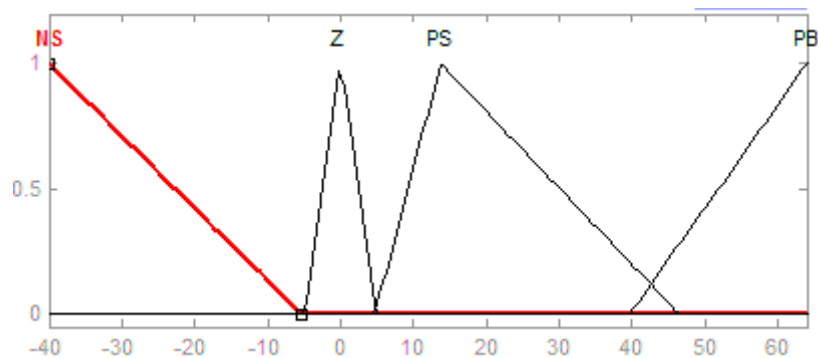


Рисунок 2.17 - Функции принадлежности корректирующего воздействия первого выхода.

Второй выход НЛР. Терм-множество $T4$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T4 = \{NS, Z, PS, PB\}$, означающие соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное

большое». Диапазон управляющего воздействия $[-0.7; 1]$. Вид и распределение функций принадлежности показаны на рисунке 2.18.

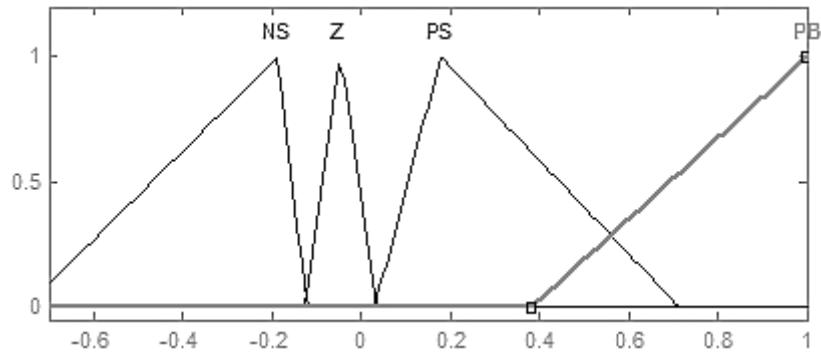


Рисунок 2.18 – Функции принадлежности корректирующего воздействия второго выхода.

Третий выход НЛР. Терм-множество $T5$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T5 = \{PS, PM, PB, PVB\}$ означающие соответственно: «положительное малое», «положительное среднее», «положительное большое», «положительное очень большое». Диапазон управляющего воздействия $[0,1; 1]$. Функции принадлежности приведены на рисунке 2.19.

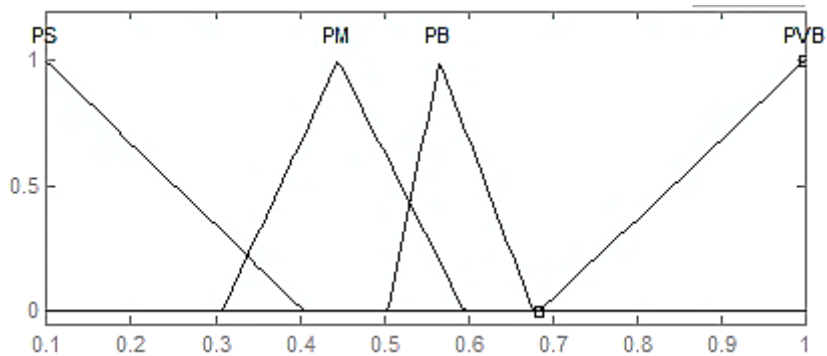


Рисунок 2.19 – Функции принадлежности корректирующего воздействия третьего выхода.

Содержательным компонентом блока нечеткого вывода является база знаний НЛР. Для заполнения первоначально пустой базы знаний, необходимо определить цели управления. Целью НЛР, как уже говорилось ранее, является корректировка сигнала управления. Таким образом, будет

обеспечиваться повышение быстродействия регулирующего воздействия и плавность изменения регулируемой величины.

В естественно-языковой форме управление будет иметь следующий вид:

Если сигнал ошибки положительный и возрастает, то корректирующий сигнал у первого и второго выходов регулятора будет – положительный большой, а у третьего – положительный очень большой. Если положительный сигнал ошибки уменьшается, то корректирующий сигнал для всех выходов также будет уменьшаться, оставаясь положительным. Если сигнал ошибки нулевой, то корректирующий сигнал – отрицательный или положительный малый (третий выход). Если отрицательный сигнал ошибки уменьшается по абсолютной величине, то корректирующий сигнал – нулевой или положительно средний (третий выход).

Базу знаний нечеткого регулятора целесообразно формировать в виде продукций. Получим множество управляющих правил, связывающих лингвистические значения входных и выходных переменных вида:

Если «сигнал_ошибки» есть PB, то «сигнал_коррекция1» есть PB, «сигнал_коррекция2» есть PB и «сигнал_коррекция3» есть PVB;

Если «сигнал_ошибки» есть PS, то «сигнал_коррекция1» есть PS, «сигнал_коррекция2» есть PS и «сигнал_коррекция3» есть PB;

Если «сигнал_ошибки» есть Z, то «сигнал_коррекция1» есть NS, «сигнал_коррекция2» есть NS и «сигнал_коррекция3» есть PS;

Если «сигнал_ошибки» есть NS, то «сигнал_коррекция1» есть Z, «сигнал_коррекция2» есть Z и «сигнал_коррекция3» есть PM.

Оценим базу знаний нечеткого регулятора на оптимальность. Наиболее часто требование полноты для системы продукций сводится к виду:

$$X = \bigcup_{i=1}^n \text{supp } A_i$$

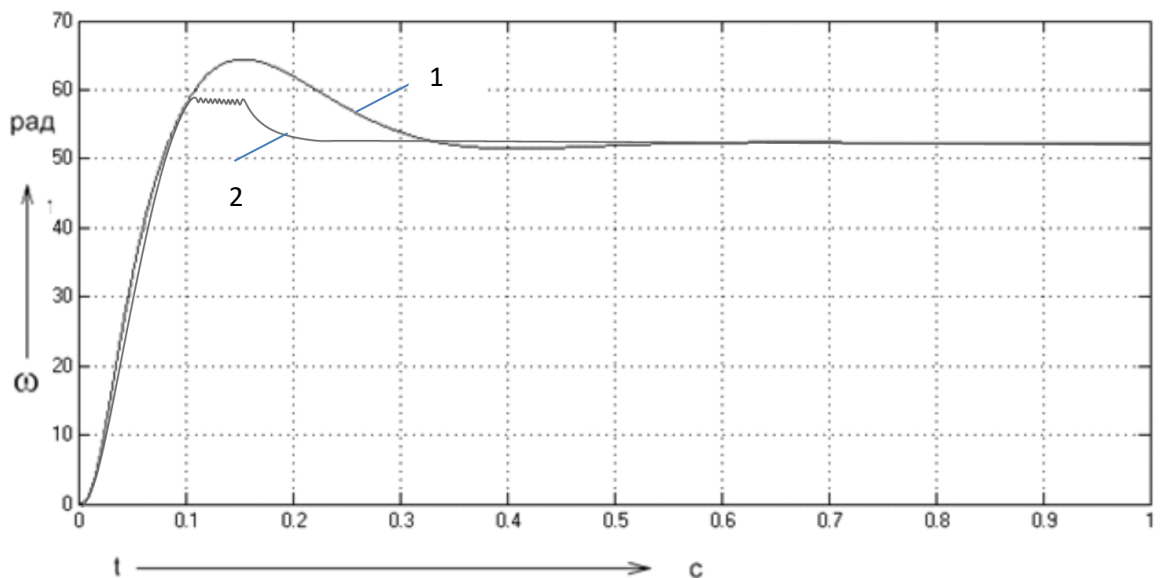
где $\text{Supp } A_i$ - носитель нечеткого множества A_i .

Это означает, что для каждого текущего состояния x процесса существует хотя бы одно управляющее правило, посылка которого имеет ненулевую степень принадлежности для x .

Для рассматриваемой системы отсутствуют правила, содержащие антецедент с нулевой степенью принадлежности, следовательно, можно сделать вывод о полноте правил управления.

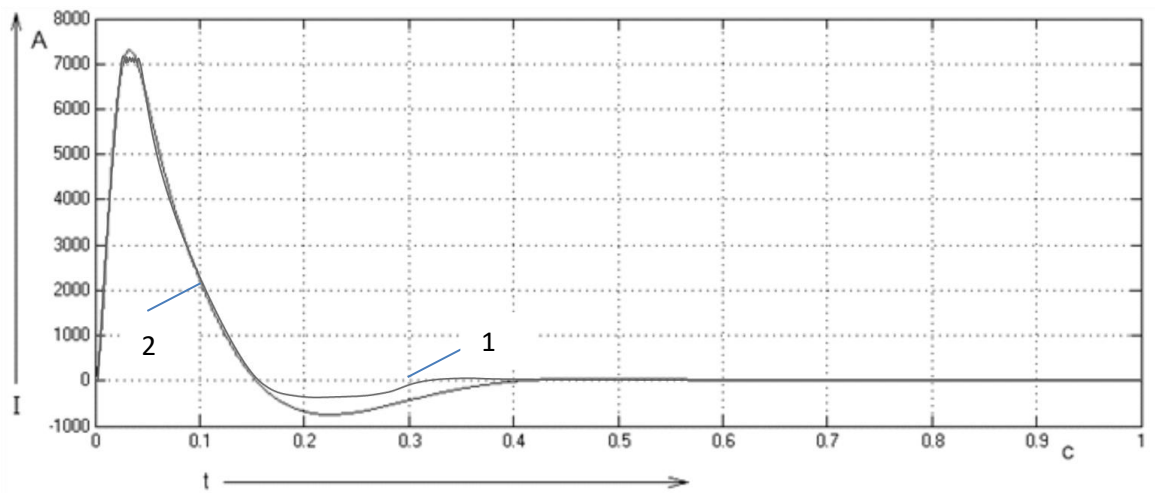
Непротиворечивость системы управляющих правил обычно трактуется как отсутствие правил, имеющих сходные посылки и различные или взаимоисключающие следствия. Следовательно, можно судить о непротиворечивости системы управляющих правил.

Графики переходных процессов выходной координаты системы при отработке скачка входного воздействия представлены на рисунках 2.20 и 2.21.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.20 – Переходный процесс скорости двигателя.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНКР.

Рисунок 2.21 – Переходный процесс тока якоря.

Из графика (рис. 2.20 и 2.21) видно уменьшение времени переходного процесса в системе с многокаскадным нечетким регулятором, по сравнению с классической системой, практически исчезло перерегулирование. Использование многокаскадности в управлении позволило получить качественный переходный процесс без использования громоздких вычислительных процедур, необходимых для улучшения динамических характеристик как в классическом методе управления так и в нечеткой системе управления.

Второй вариант. База правил и функции принадлежности нечеткого контроллера FLC0m будут такими же, как и для нечеткого контроллера, полученного при моделировании СУ электроприводом постоянного тока с алгоритмом вывода Мамдани-Сугено [10, 280]. Контроллеры FLC1s, FLC2s и FLC3s настроим на алгоритм вывода Сугено (рис. 2.13).

Функциональная схема многокаскадного нечеткого логического регулятора приведена на рисунке 2.22.

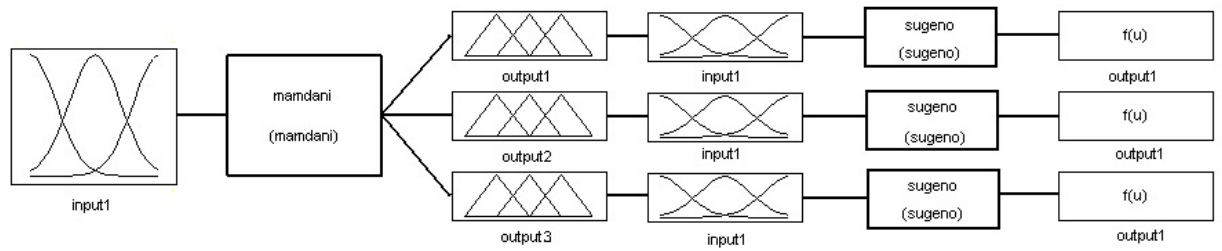


Рисунок 2.22 – Функциональная схема МНЛР.

Нечеткие контроллеры вложенного каскада реализуются аналогично выше рассмотренным на 1 вход и 1 выход.

В качестве положительного аспекта данного варианта построения нечеткого логического регулятора можно отметить использование логического вывода Сугено. Для алгоритма нечеткого логического вывода Сугено характерно высокое быстродействие в вычислительном отношении, кроме того, такой алгоритм показывает существенную эффективность при решении задач по управлению линейными объектами (ПИД-закон управления), и как следствие он хорошо поддается анализу классическими математическими методами.

Для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечеткого контроллер базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне 4, по аналогии с информационной составляющей формализующей выходную переменную.

Зададим основные параметры лингвистических переменных, формализующих понятия входных и выходных сигналов, для реализации интеллектуальной системы, формирующей процедуры управления, соответствующие ПИД-закону регулирования.

Область определения входной переменной для нечеткого регулятора FLC1s будет задана на интервале $[-10; 10]$ с пятью аппроксимированными функциями принадлежности. Для выхода регулятора диапазон изменения параметров управляющего воздействия определяется интервалом $[-4; 16]$, а функции принадлежности управляющего воздействия представляют собой

набор постоянных величин, соответствующих особенностям реализации упрощенного алгоритма вывода.

Приведем базу знаний для нечеткого контроллера. В естественной языковой форме она будет иметь вид:

Если сигнал на входе положительный и возрастает, то сигнал управления положительный большой. Если сигнал на входе положительный и убывает, то сигнал управления убывает. Если сигнал на входе нулевой, то корректирующий сигнал также нулевой. Если сигнал на входе уменьшается по абсолютной величине, то корректирующий сигнал – отрицательный маленький.

Для выхода FLC2s область определения задается интервалом $[0\ 150]$, базовое терм-множество может содержать четыре нечеткие переменные, значения которых с учетом особенностей выбранного алгоритма нечеткого логического вывода будут иметь следующий вид $PVB=147; PB=98,6; PS=30; Z=0$.

База нечетких продукционных правил для нечеткого контроллера. В естественной языковой форме она будет иметь вид:

Если сигнал на входе положительный и возрастает, то сигнал управления положительный большой. Если сигнал на входе положительный и убывает, то сигнал управления убывает. Если сигнал на входе нулевой, то корректирующий сигнал – также нулевой. Если сигнал на входе уменьшается по абсолютной величине, то корректирующий сигнал – будет нулевым.

Для контроллера FLC3s диапазон будет таким же, как и для первых двух контроллеров каскада, но функции принадлежности будут иметь иной вид.

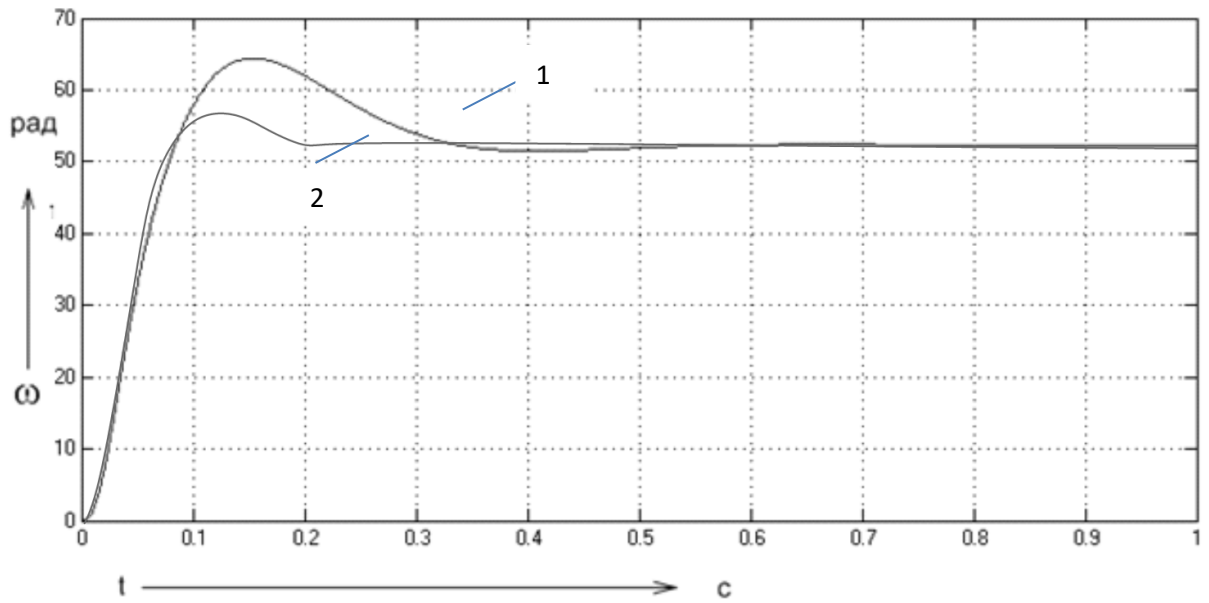
Для выхода регулятора диапазон изменения параметров управляющего воздействия принят $[-50; 14]$. Для формирования управляющего воздействия с применением упрощенного алгоритма нечеткого логического вывода был использован следующий набор постоянных величин: $PS=13,87; Z=0; NS=-14; NB=-48$

Если сигнал на входе положительный и возрастает, то сигнал управления малый положительный. Если сигнал на входе положительный и убывает, то сигнал управления нулевой. Если сигнал на входе нулевой, то корректирующий сигнал – также нулевой. Если сигнал на входе положительный малый, то корректирующий сигнал – отрицательный большой. Если сигнал на входе уменьшается, то сигнал на выходе – небольшой отрицательный.

Для рассматриваемой системы отсутствуют правила, содержащие антецедент с нулевой степенью принадлежности, следовательно, можно сделать вывод о полноте правил, составляющих базу знаний нечеткого регулятора.

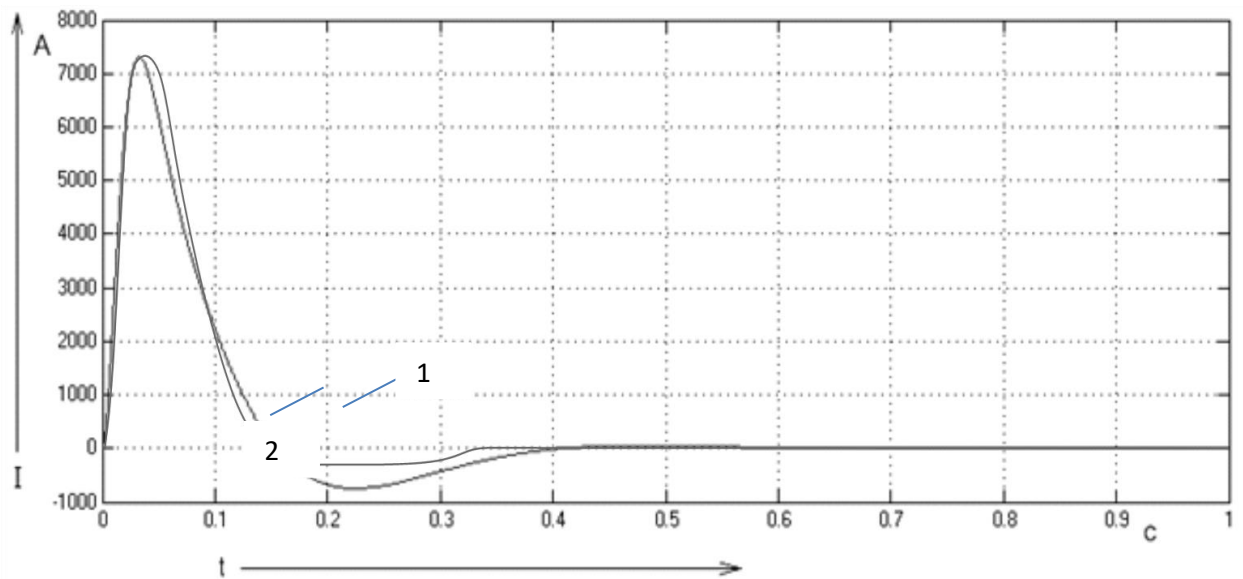
Другим важнейшим требованием, предъявляемым к базам знаний нечетких регуляторов, является непротиворечивость набора управляющих правил, который обычно трактуется, как отсутствие правил, имеющих сходные посылки и различные либо взаимоисключающие следствия. Таким образом, требование о непротиворечивости механизма выводов заложенного в основу модели нечеткого логического регулятора также является выполненным.

Графики переходных процессов выходной координаты системы при отработке скачка входного воздействия представлены на рисунках 2.23 и 2.24.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.23 – Переходный процесс скорости двигателя.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.24 – Переходный процесс тока якоря.

Вариант 3. Настроим нечеткий контроллер FLC0s на алгоритм вывода Сугено [173, 293], а во втором каскаде подставим нечеткие модули, настроенные на алгоритм вывода Мамдани, смоделированные ранее (рис. 2.13).

Нечеткий контроллер FLC0s имеет один вход и три выхода. Функциональная схема многокаскадного нечеткого логического регулятора приведена на рисунке 2.25.

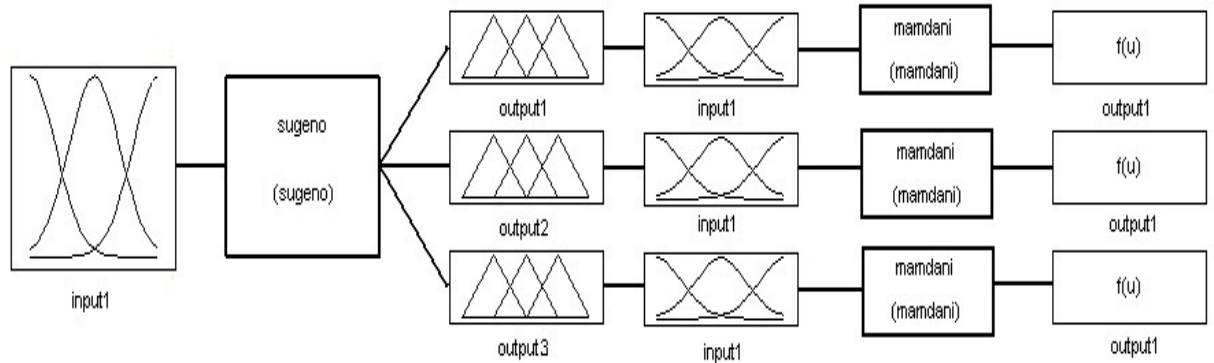


Рисунок 2.25 – Функциональная схема с МНЛР.

На нечеткое корректирующее звено возлагается задача выработки корректирующего воздействия в диапазоне изменения динамической ошибки системы стабилизации.

Введем входную лингвистическую переменную «ошибка1» ($\varepsilon 1$). Для всех внутренних термов входной переменной, назначим треугольные функции принадлежности.

Учитывая, что к виду переходной характеристики системы не предъявляются специальные требования, для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечеткого контроллера базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне 3-5.

Число нечетких переменных в базовом-терм множестве может варьироваться в относительно большом диапазоне, что в итоге приводит к росту объема базы продукционных правил регулятора, но не дает повышения точности системы, как было отмечено в разделе 1.5.

Базовое терм-множество лингвистической переменной описывается $T2 = \{NS, Z, PS, PB\}$, где NS – «отрицательное малое», Z – «нулевое», PS – «положительное малое», PB – «положительное большое».

Диапазоны изменения входных лингвистических переменных определялись по результатам моделирования пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих ПИД-регулятора. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-2,4; 10]$. Исходя из того, что данная входная переменная имеет 4 термина, получим следующие функции принадлежности, представленные на рисунке 2.26.

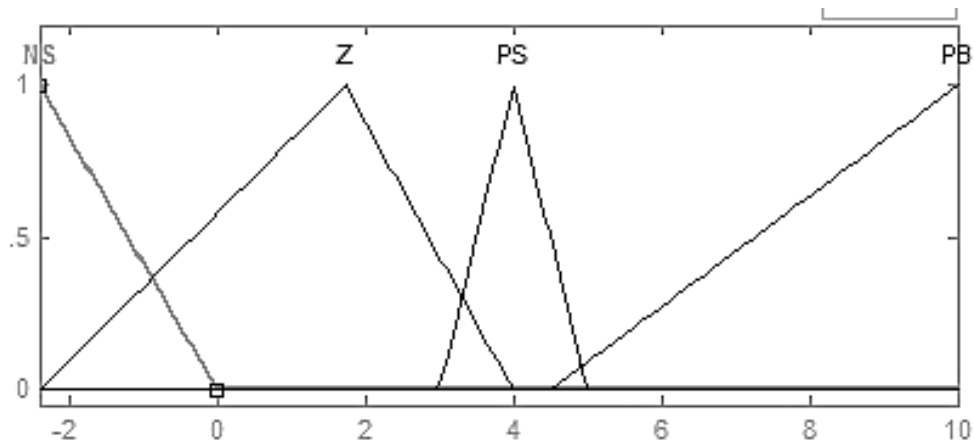


Рисунок 2.26 - ФП лингвистической переменной ошибка системы.

Введем следующие выходные лингвистические переменные, которые соответствуют модулям вложенного каскада: «коррекция1» (y_1), «коррекция2» (y_2), «коррекция3» (y_3). Для всех внутренних термов выходных переменных, назначим треугольные функции принадлежности.

Диапазон изменения корректирующего воздействия взят с расчётом, чтобы управляющее воздействие действительно могло влиять на систему. Для каждого из трёх выходов он имеет своё значение.

Учитывая, что к виду переходной характеристики системы не предъявляются специальные требования, для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечёткого контроллера базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне четырёх. Некоторый произвол при выборе количества термов обусловлен тем, что при возрастании количества термов возрастает объем базы правил, а существенного выигрыша в точности не наблюдается.

Терм множество – $T2$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T2 = \{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое».

Количественные характеристики функций принадлежности определим в зависимости от диапазона изменения параметра, для которого строятся функции принадлежности его термов. Диапазоны изменения параметров были получены из результатов моделирования ПИД-регулятора [111]. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-2,4; 10]$. Исходя из того, что данная входная переменная имеет 4 терма, получим следующие функции принадлежности, представленные на рисунке 2.27.

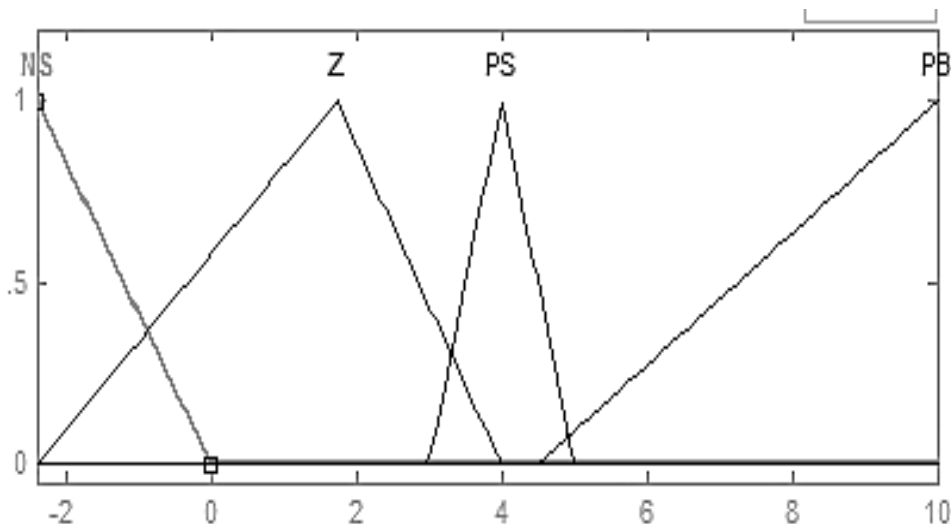


Рисунок 2.27 - Функции принадлежности лингвистической переменной «ошибка1».

Введем выходные лингвистические переменные «коррекция1» ($y1$), «коррекция2» ($y2$), «коррекция3» ($y3$). Для всех внутренних термов выходных переменных назначим треугольные функции принадлежности.

Диапазон изменения корректирующего воздействия взят с расчётом, чтобы управляющее воздействие действительно могло влиять на систему. Для каждого из трёх выходов он имеет своё значение.

Для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечёткого контроллера базовое терм-множество выходных лингвистических переменных ограничим на уровне четырёх, также как и для входной лингвистической переменной. Для трёх выходных сигналов зададимся тремя терм множествами – $T3$, $T4$, $T5$ соответственно.

Рассмотрим первый выход НЛР. Терм-множество $T3$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T3=\{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон изменения постоянных величин управляющего воздействия для этого выхода принят в рамках диапазона $[-40, 64]$.

Второй выход НЛР. Терм-множество $T4$ лингвистических переменных имеет название термов: $T4=\{NS, Z, PS, PB\}$, означающие соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон изменения констант управляющего воздействия задается на интервале $[-0,7; 1]$.

Третий выход НЛР. Терм-множество $T5$ лингвистических переменных имеет название термов: $T5=\{PS, PM, PB, PVB\}$, означающие соответственно: «положительное малое», «положительное среднее», «положительное большое», «положительное очень большое». Диапазон управляющего воздействия соответственно $[0,1; 1]$.

С учетом заданных терм-множеств и заданных диапазонов изменения постоянных величин на каждом из информационных входов получим базу правил следующего содержания:

Если «ошибка1» есть PB, то «коррекция1»= 59, «коррекция2»= 1 и «коррекция3»= 1;

Если «ошибка1» есть PS, то «коррекция1»= 15, «коррекция2»= 0,2 и «коррекция3»= 0,6;

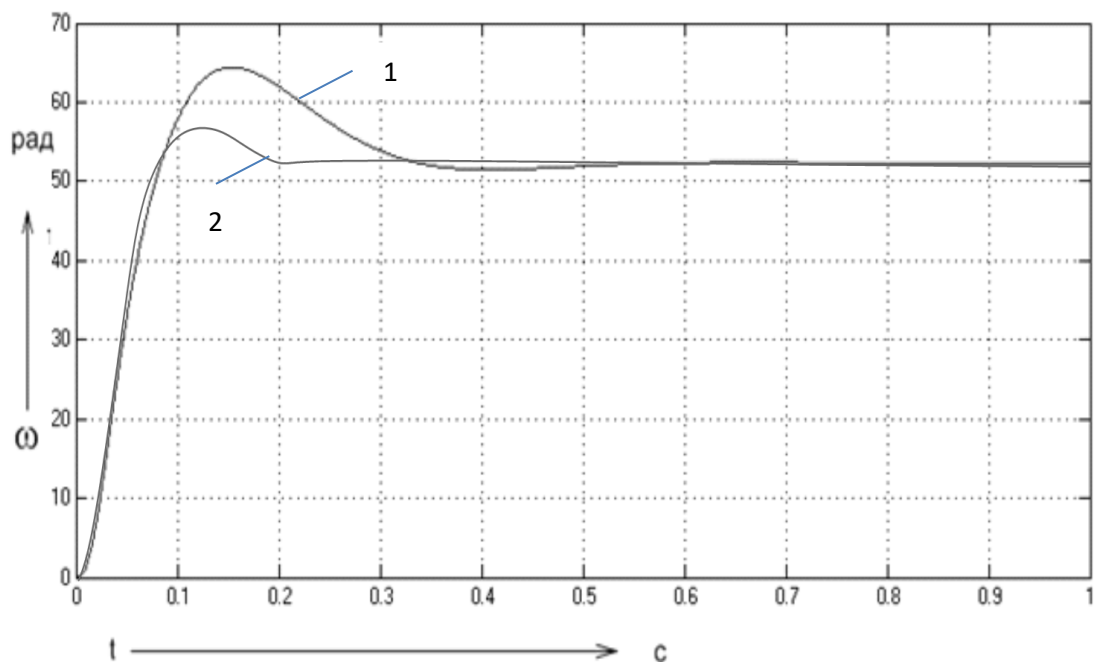
Если «ошибка1» есть Z, то «коррекция1»=-32,65, «коррекция2»= -0,2 и «коррекция3»= 0,1;

Если «ошибка1» есть NS , то «коррекция1» = 0, «коррекция2» = 0 и «коррекция3» = 0,4.

Для рассматриваемой системы отсутствуют правила, содержащие антецедент с нулевой степенью принадлежности, следовательно, можно сделать вывод о полноте правил управления.

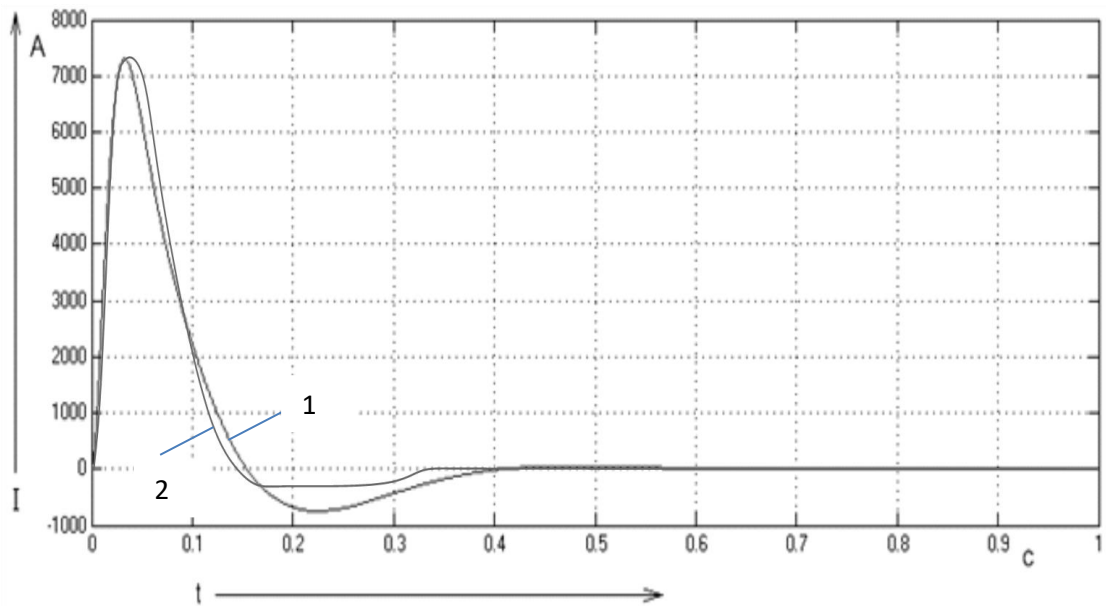
Непротиворечивость системы управляющих правил обычно трактуется как отсутствие правил, имеющих сходные посылки и различные или взаимоисключающие следствия. Следовательно, можно судить о непротиворечивости системы управляющих правил.

Графики переходных процессов выходной координаты системы при отработке скачка входного воздействия представлены на рисунках 2.28 и 2.29.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.28 – Переходный процесс скорости двигателя.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.29 – Переходный процесс тока якоря.

Вариант 4. Моделирование нечеткой многокаскадной системы управления электроприводом постоянного тока с алгоритмом вывода Сугено-Сугено с целью анализа качества регулирования такой интеллектуальной системой по основным характеристикам. На основе спроектированных ранее нечетких регуляторов и смоделированных каскадов управления спроектируем многокаскадную систему управления электроприводом постоянного тока, настроив оба каскада на алгоритм вывода Сугено (рис. 2.30). При этом функции принадлежности и базы знаний для контроллеров FLC0s, FLC1s, FLC2s и FLC3 будут аналогичны уже описанным выше.

Функциональная схема многокаскадного нечеткого логического регулятора, построенного с использованием сочетания алгоритмов Сугено-Сугено, приведена на рисунке 2.30.

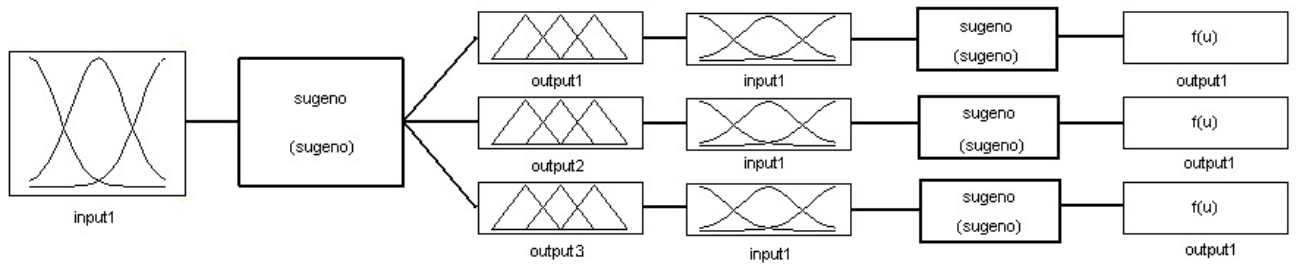
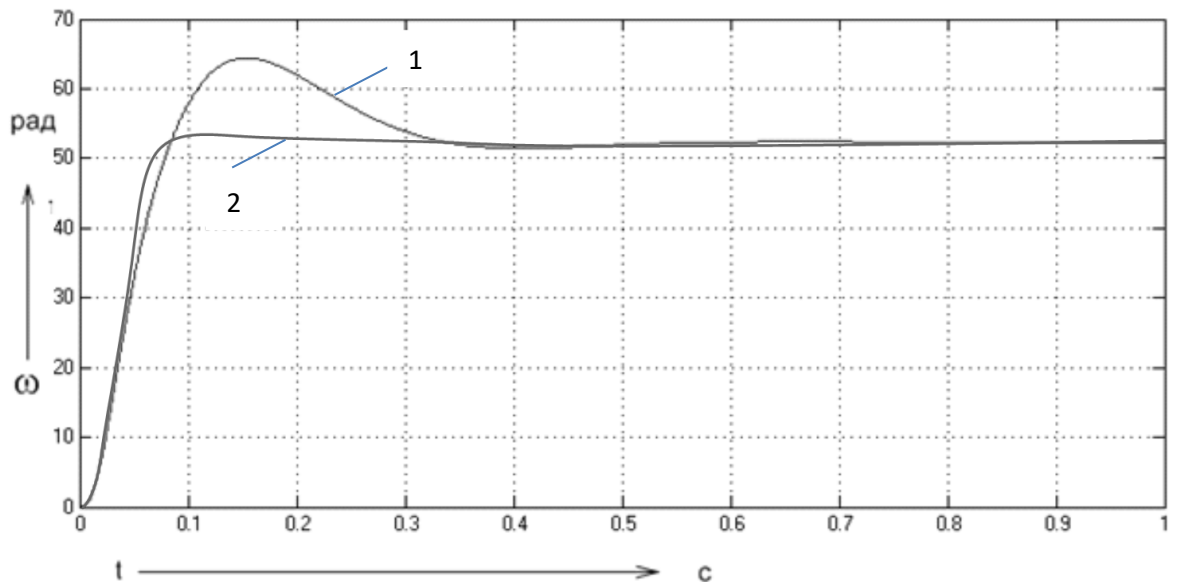


Рисунок 2.30 – Функциональная схема с многокаскадным нечетким логическим регулятором.

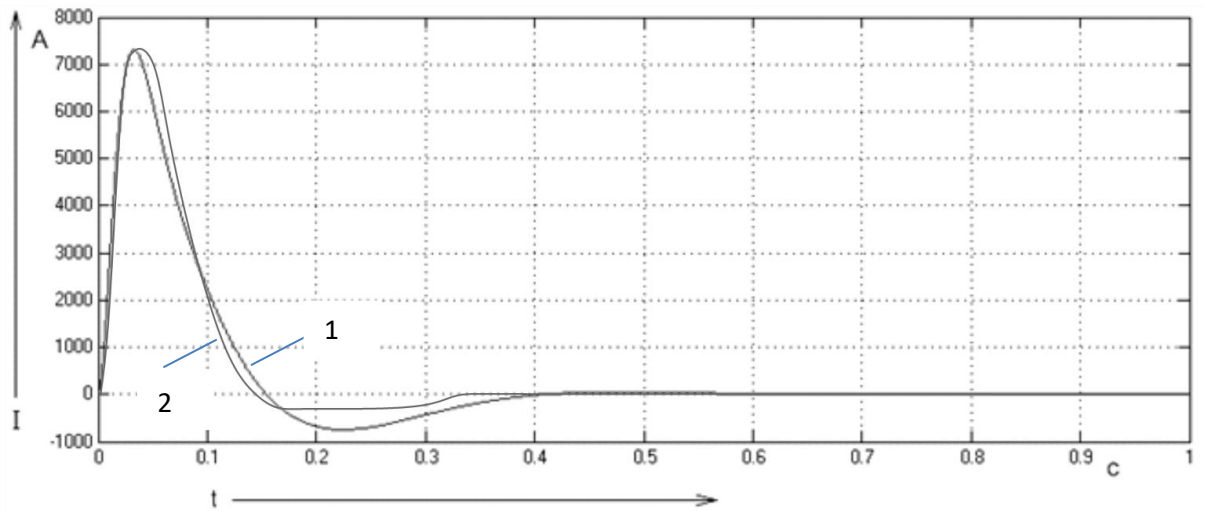
Система регулирования с многокаскадным нечетким логическим регулятором направлена на формирование переходных процессов в пропорциональном, интегральном и дифференциальном каналах, близких к полученным в системе с ПИД-регулятором и в системе с НЛР (или улучшить эти характеристики).

Переходные характеристики процессов выходной координаты системы при обработке скачка входного воздействия представлены на рисунках 2.31, 2.32.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.31 – Переходный процесс скорости двигателя.



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – система с МНЛР.

Рисунок 2.32 – Переходный процесс тока якоря.

Помимо МНЛР прямого действия, то есть установленного непосредственно в канал управления, существует структурное решение, позволяющее реализовать законы регулирования с использованием параллельных каналов [186, 251, 257, 295, 330]. Особенностью реализации такой модели МНЛР, показанной на рисунке 2.33, является наличие блоков умножения, интегрированных в структуру интеллектуальной системы с целью введения дополнительных информационных каналов управления с ошибками по току и скорости.

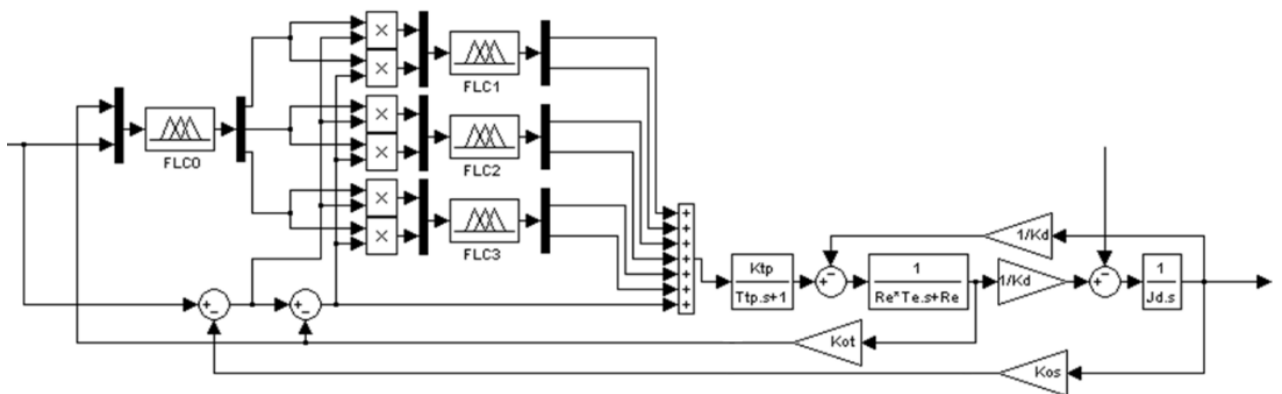


Рисунок 2.33 – Структурная схема системы управления с многокаскадным нечетким регулятором.

Синтез нечеткой многокаскадной системы проведем в два этапа. На первом этапе проведем моделирование нечетких регуляторов внутреннего каскада, которые реализуются аналогично и имеют по 2 входные и 2 выходные лингвистические переменные. На первый вход такого нечеткого модуля поступает сигнал с датчика скорости, на второй – с датчика тока. Внешнее управление внутренним каскадом осуществляется внешним нечетким контроллером через блоки произведения. Основным отличием внутренних модулей является их настройка на различные диапазоны регулирования, связанные с различными уставками задающего сигнала.

Модель нечеткого контроллера реализующего внешний управляющий каскад представлена на рисунке 2.34. FLC0. Входными информационными входами для такого интеллектуального модуля будут переменные соответствующие сигналу задания и сигналу с датчика тока.

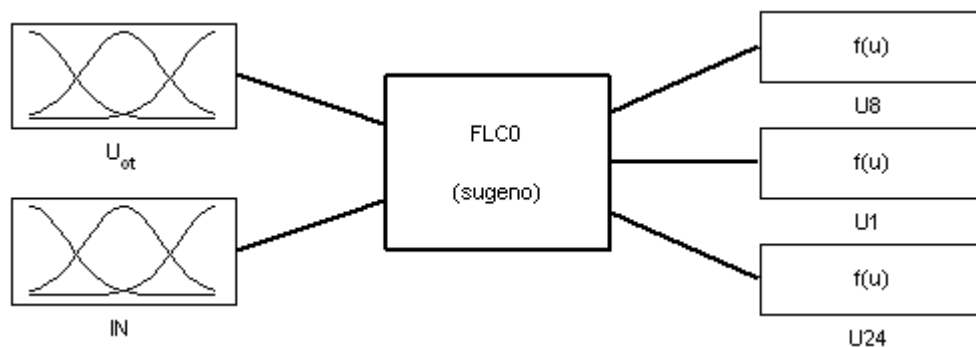


Рисунок 2.34 – Функциональная схема нечеткого логического контроллера.

Параметры функций принадлежности определяются стандартно, в зависимости от характеристик входных сигналов.

Первый вход нечеткого контроллера изменяется в диапазоне $[0; 50]$, соответственно требуемому ограничению тока якоря, имеет две функции принадлежности Z-образного вида, терм-множество – T лингвистической переменной – имеет название термов: $T = \{Low, High\}$, формализующее соответственно понятия низкого и высокого тока якоря. Вид термов для лингвистической переменной «ток якоря» представлены на рисунке 3.32.

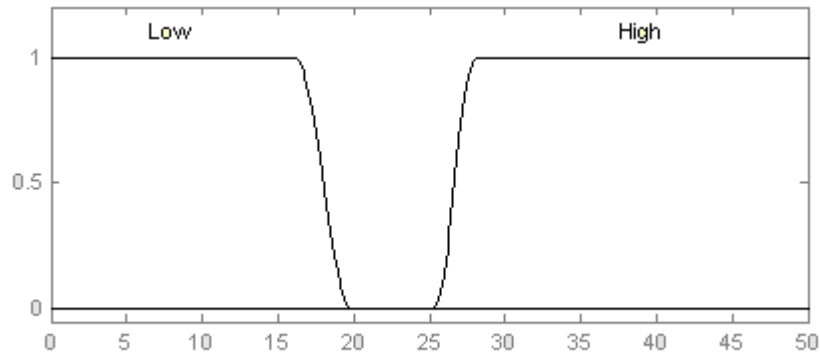


Рисунок 2.35 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ток якоря» - U_{ot} .

Второй вход нечеткого контроллера изменяется в диапазоне $[0; 25]$ и содержит три функции принадлежности треугольного вида. Базовое термножество лингвистической переменной имеет вид $T_1 = \{IN1, IN8, IN24\}$ и содержит нечеткие переменные соответствующие различным уровням задающего сигнала (рис. 3.33).

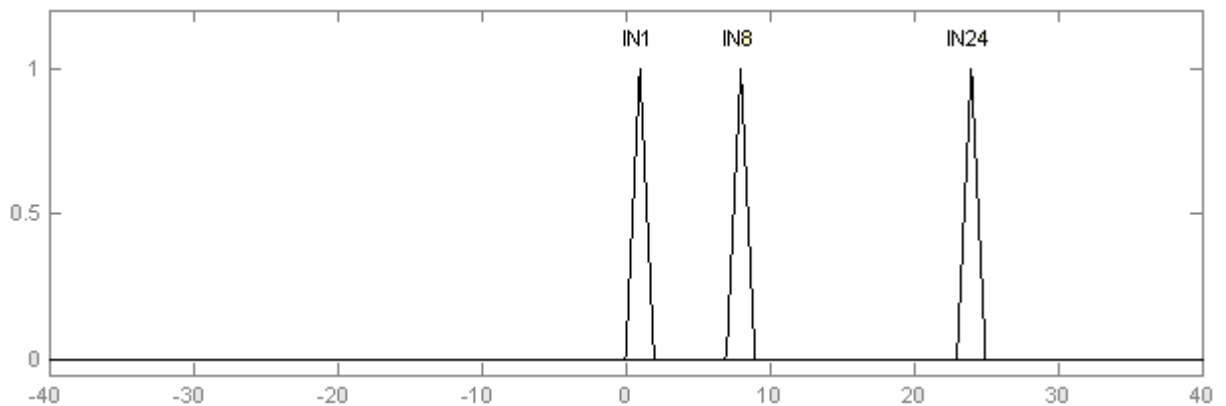


Рисунок 2.36 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «Сигнал задания».

Все выходы нечеткого контроллера формируются лингвистической переменной с базовым термножеством $T = \{On, Off, Inv\}$, которое содержит набор из трех констант: $On = 1$ - разрешение поступающих на каскад сигналов ошибок по току и скорости, $Off = 0$ - запрет поступающих на каскад сигналов ошибок по току и скорости, $Inv = -1$ - инверсия поступающих на каскад сигналов ошибок по току и скорости.

Базу знаний нечеткого контроллера целесообразно формировать в виде управляющих правил продукции, связывающих значения входной и выходной лингвистических переменных:

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть Low и «сигнал задания» (IN) есть IN1 ,то «сигналы управления» (U1) есть On, (U8) есть Off, (U24) есть Off;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть High и «сигнал задания» (IN) есть IN1 ,то «сигналы управления» (U1) есть Inv, (U8) есть Off, (U24) есть Off;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть notLow и «сигнал задания» (IN) есть IN1, то «сигналы управления» (U1) есть On, (U8) есть Off, (U24) есть Off;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть Low и «сигнал задания» (IN) есть IN8 ,то «сигналы управления» (U1) есть Off, (U8) есть On, (U24) есть Off;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть High и «сигнал задания» (IN) есть IN8, то «сигналы управления» (U1) есть Off, (U8) есть Inv,(U24) есть Off;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть notLow и «сигнал задания» (IN) есть IN8, то «сигналы управления» (U1) есть Off, (U8) есть Off,(U24) есть Off;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть Low и «сигнал задания» (IN) есть IN24, то «сигналы управления» (U1) есть Off, (U8) есть Off,(U24) есть On;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть High и «сигнал задания» (IN) есть IN24, то «сигналы управления» (U1) есть Off, (U8) есть Inv,(U24) есть Inv;

Если «ток якоря» (U_{ot}) есть notLow и «сигнал задания» (IN) есть IN24, то «сигналы управления» (U1) есть Off, (U8) есть Off,(U24) есть Off;

Результат моделирования можно наглядно представить при пуске двигателя, последовательно подавая заданные уставки (рис. 2.37, 2.38).

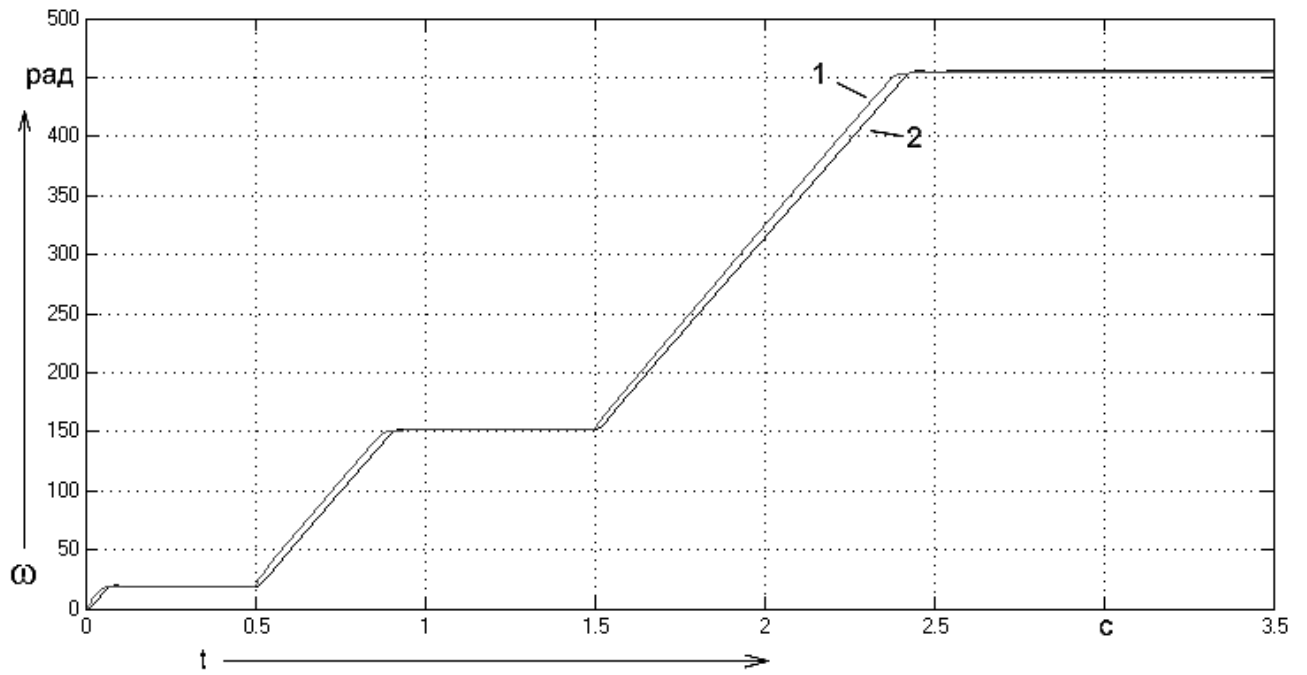


Рисунок 2.37 – Переходный процесс скорости нечеткой многокаскадной системы управления электроприводом с ограничением тока якоря посредством компенсации нелинейности нечеткой системой управления.

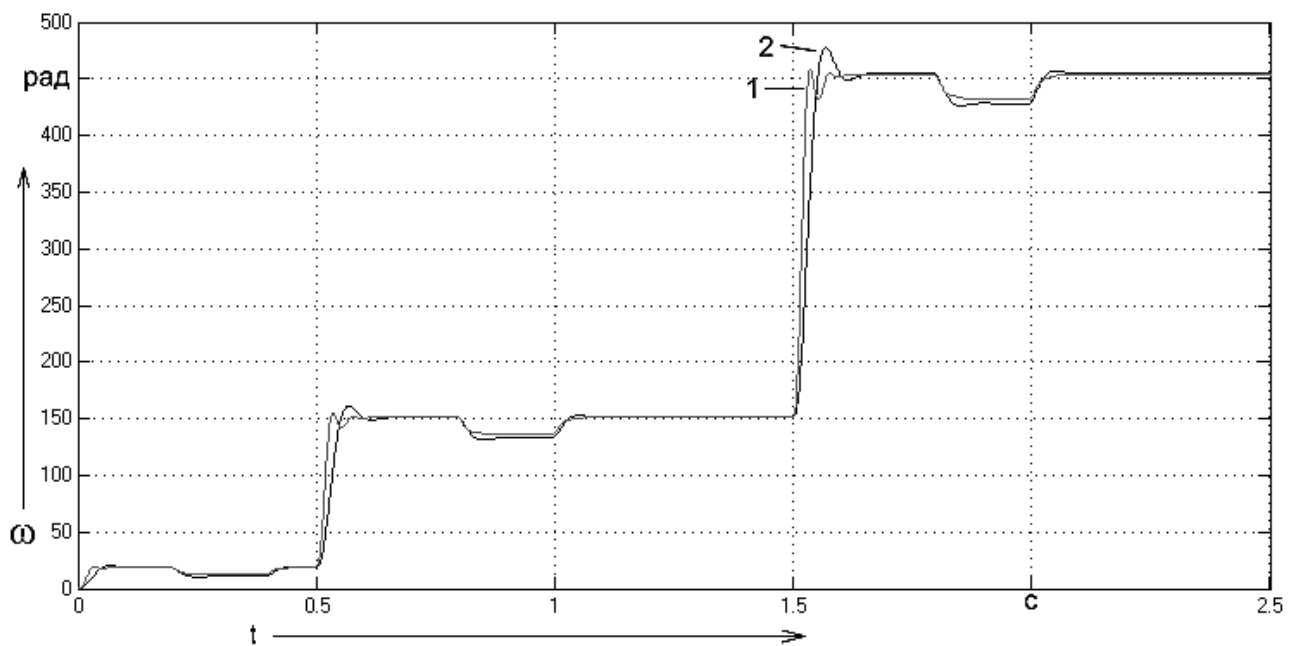


Рисунок 2.38 – Переходный процесс скорости нечеткой многокаскадной системы управления электроприводом под действием возмущающего воздействия.

Анализируя график переходного процесса (рис 3.35, 3.36) нечеткой многокаскадной системы управления, необходимо отметить, что она обладает всеми преимуществами, обусловленными классическим подходом при реализации закона управления. Необходимо отметить что, возможность применения нечеткой многокаскадной системы управления электроприводом постоянного тока наглядно демонстрируют полученные результаты моделирования. Главной положительной чертой применения методов нечеткого управления является возможность реализации процедур регулирования с высокими показателями переходных характеристик технологического объекта без применения громоздких алгоритмов, заложенных в основу классических методов.

Из анализа проведённых исследований можно сделать вывод о том, что система с многокаскадным нечетким регулятором, расположенным в прямом канале, представляет собой наиболее эффективное структурное решение. При этом, наиболее эффективным будет использование сочетания алгоритмов вывода Сугено-Мамдани, для первого и второго каскада соответственно. Применение структуры с параллельными каналами в большинстве случаев будет не целесообразно, т.к. усложняет систему и вносит в канал управления нелинейные элементы.

Выводы по второй главе

Предложенное автором построение нечеткого регулятора по многокаскадному принципу даже при упрощенном подходе использования функций принадлежности входных и выходных лингвистических переменных и относительно произвольном их распределении по диапазону регулирования соответствующей координаты технического объекта, обеспечивает получение показателей качества выходного параметра системы на уровне систем с классической структурой построения регуляторов. При этом быстродействие систем регулирования с нечеткими регуляторами остается практически таким же как и у классических систем, а величина перерегулирования заметно снижается.

Расширение функциональных возможностей нечетких систем управления технологическими процессами за счет каскадного построения корректирующего устройства позволит расширить диапазон их применения, распространяя его не на отдельные объекты регулирования, а на их классы, снизить объем и сложность базы нечетких продукционных правил за счет модульного построения, а также ускорить процесс перенастройки системы путем внедрения элементарных модулей во внутренний каскад.

Впервые предложенное, многокаскадное построение нечеткого логического регулятора реализует многовариантность технических решений формирования управляющего (корректирующего) воздействия на технологический объект. Структурные решения, связанные с сочетаниями алгоритмов нечеткого логического вывода позволяют гибко адаптировать предложенный подход под особенности решаемой задачи по управлению, придавая системе управления некоторые свойства универсальности.

Применение алгоритма Сугено во внешнем каскаде добавляет в структуру многокаскадного нечеткого регулятора ряд дополнительных

каналов, что обусловлено особенностями функционирования самого алгоритма, особенно при использовании вывода нулевого порядка. Использование алгоритма Мамдани во внешнем каскаде позволяет обойтись без дополнительных структурных решений, используя в качестве входных сигналов регулятора сигналы непосредственно с объекта регулирования. Вместе с тем, при построении элементарных нечетких модулей внутреннего каскада целесообразнее применять именно Сугено из-за его простоты и минимальной нагрузки на вычислительную мощность аппаратной части системы управления технологическим процессом.

Глава 3 Структурный и параметрический синтез многокаскадного нечеткого регулятора систем управления технологическими процессами

Сложность и разнообразие существующих систем управления технологическими процессами, в первую очередь, определяется структурой и математическим описанием объекта управления. Большинство сложных объектов управления характеризуются такими свойствами, как уникальность, динамичность, неполнота описания, отсутствие оптимальности и т.п., что в конечном счете определяет их функционирование в условиях «субъективизма». Несмотря на широкое многообразие технологических процессов, практически всегда, можно выделить целый ряд общих для них характерных свойств и особенностей, которые связаны с физикой их существования, например, наличием различного рода нелинейных элементов. Зачастую именно наличие естественных и искусственных нелинейностей определяет необходимость применения различных математических методов и технических решений, главной целью которых является, либо компенсация нелинейности за счет введения в контур регулирования нелинейности обратного типа, либо ослабления негативного влияния нелинейности на систему управления технологическим процессом (как правило, средствами управления) [126, 127], или избавление от таких элементов в контурах регулирования.

С другой стороны, если рассматривать систему управления в целом, то можно указать, что для целого класса систем управления технологическими процессами в основу их функционирования положен принцип слежения (например, системы управления нажимными устройствами прокатных станов, системы локации, системы самонаведения, системы управления движением судна и т.п.) [70, 90, 145]. Все многообразие следящих систем управления в зависимости от назначения, специфики объекта управления,

принципа построения можно охарактеризовать с помощью нижеприведенной классификации (рис. 3.1)



Рисунок 3.1 – Классификация следящих систем.

В качестве третьего аспекта, очень часто проявляющегося и оказывающего влияние на качество процесса управления, следует выделить нестационарность параметров технологических объектов.

Рассмотрим применение вышеразработанного подхода при синтезе систем управления технологическими процессами, в которых один из отмеченных показателей выступает в качестве ограничительного фактора. При этом в процессе синтеза будем использовать универсализм подхода, проявляющегося в возможности реализации нечеткого управляющего устройства на основе комбинированного или гибридного принципов.

3.1 Синтез многокаскадного нечеткого логического компенсатора нелинейностей

Как известно, наличие в структуре технологического объекта управления одной или целого ряда нелинейностей сказывается на снижении качества управления. Это проявляется в росте погрешности управления,

увеличении времени протекания переходного процесса, потере системой устойчивости, возможности возникновения автоколебательных режимов. В связи с этим для улучшения качества регулирования системой, стремятся свести к нулю негативное влияние нелинейных элементов. В работе рассматривается применение системы компенсирующих формирующих устройств, осуществляющих введение дополнительного (компенсирующего) сигнала управления по отклонению [12]. При этом уклон сделан в сторону реализации интеллектуальной системы управления, позволяющей уменьшить ошибку регулирования посредством применения нечетких логических компенсаторов. Представлена многокаскадная система управления и способы компенсации нелинейных элементов систем автоматического управления.

Основными классическими методами компенсации нелинейностей в классической теории автоматического управления являются методы основанные на структурном подходе. При таких методиках устранение негативного влияния нелинейностей различного рода производится структурно, установкой компенсирующего звена в прямой канал последовательно, в прямой канал параллельно или в каналы обратных связей. При этом необходимо отметить, что задача выбора метода компенсации целиком зависит от идентификации самого нелинейного элемента и не всегда подходит для тех случаев, когда в объекте присутствует целый набор различных нелинейностей или саму нелинейность невозможно определить (или классифицировать). Подход основанный на применении многокаскадного нечеткого управления позволяет решить подобного рода задачи комплексно, при этом модули внутреннего каскада могут быть настроены на три классических метода компенсации, а нечеткий контроллер формирующий внешний каскад решает задачу классификации.

Чтобы улучшить качество регулирования различными технологическими объектами [22, 79] в контурах которых присутствуют различного рода нелинейные элементы [99, 100, 177] проведем моделирование развитой интеллектуальной системы управления,

построенной на основе предложенной концепции каскадного построения нечетких систему управления. Основной задачей многокаскадного нечеткого логического регулятора [293, 294] будет компенсация негативного влияния нелинейностей с использованием совокупности способов устранения нелинейных элементов в условиях неполноты информации о объекте управления [274, 325].

Внутренний каскад развитой нечеткой системы управления будет содержать модули, реализующие методы компенсации в их классической постановке [82, 126, 127]. С учетом простоты элементов вложенного каскада их настройка может быть проведена на основе различных безэкспертных методик [22, 325], которые позволяют определить параметры таких нечетких модулей с учетом любого из трех возможных способов компенсации.

В зависимости от типа статической характеристики нелинейного элемента и типа объекта управления процедуры компенсации обладают различными компенсационными свойствами, и их совместное использование позволяет существенно повысить точность коррекции и придать развитой интеллектуальной системе некоторые универсальные свойства.

Предложенная методика, основанная на нечетком многокаскадном управлении [173, 292, 293], позволит реализовать интеллектуальную систему компенсации нелинейных элементов на основе совокупности известных методов снижения негативного влияния таких элементов САУ. Ниже описывается система регулирования, которая позволяет использовать нечеткий подход [154, 156, 166, 252, 270, 298] в условиях неполноты информации об объекте [126, 127] для определения параметров нелинейного элемента и автоматического выбора необходимого метода компенсации, таких нелинейных элементов в системах автоматического управления в динамике.

Общая модель многокаскадной системы управления представлена на рисунке 3.1. Используемые способы компенсации нелинейных элементов образуют внутренний каскад коррекции существенно-нелинейных элементов

САУ. При этом приведенным на рисунке обозначениям соответствуют следующие функциональные элементы: ($x(t)$ – входной сигнал, $y(t)$ – выходная переменная, НЛР – нечеткий логический регулятор внешнего каскада, NE – нелинейный элемент), а конкретные FLC внутреннего каскада предназначены для компенсации существенных нелинейностей путем:

- введения компенсирующей прямой связи с нечетким логическим регулятором с подачей сигнала коррекции на вход нелинейного элемента;
- введения компенсирующей обратной связи с нечетким логическим регулятором с подачей сигнала коррекции на вход нелинейности;
- введения компенсирующей прямой связи с нечетким логическим регулятором с подачей сигнала коррекции на выход нелинейности.

В зависимости от вида статической характеристики нелинейного элемента и вида объекта управления, данные способы компенсации обладают различными компенсирующими свойствами в различные моменты времени. Поэтому задачу выбора наилучшего, с точки зрения обеспечения требуемых показателей качества управления, способа компенсации существенно-нелинейных свойств элементов системы целесообразно возложить на внешний контур регулирования.

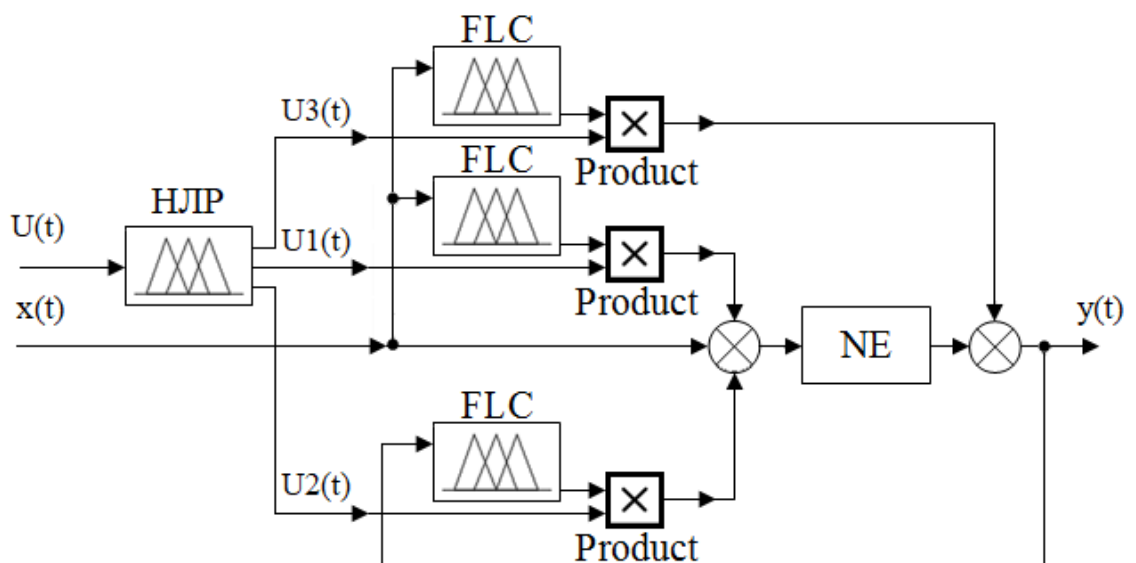


Рисунок 3.1– Общий вид многокаскадной системы управления.

В данном случае имитационную модель предлагаемой интеллектуальной системы управления с использованием технологии многокаскадного нечеткого управления можно представить в виде, приведенном на рисунке 3.2 [292]. Такой принцип построения интеллектуальной системы управления позволяет реализовать комбинацию методов и приемов компенсации нелинейных элементов системы управления. [127].

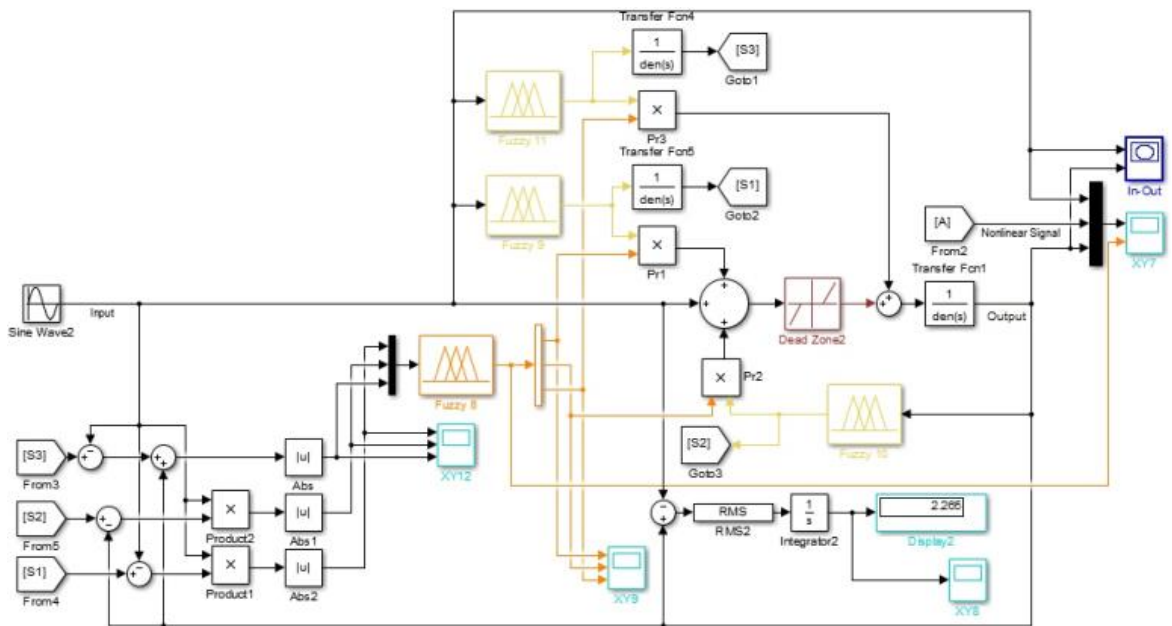


Рисунок 3.2 – Математическая модель многокаскадной системы управления.

Для подтверждения работоспособности и эффективности предлагаемого решения исследование вышеописанной системы управления представим на примере интеллектуальной системы с тремя простейшими нечеткими модулями во внутреннем каскаде под управлением внешнего контроллера.

При этом в качестве существенной нелинейности была использована нелинейность вида зона нечувствительности, компенсация которой

анализировалась с использованием введения в систему нечеткого компенсатора [99, 100].

В качестве нечетких внутренних контуров компенсации в системе использовались компенсаторы, реализующие нечеткие способы компенсации, приведенные в [126, 127, 292].

При исследовании в качестве задающего использовался синусоидальный сигнал с амплитудой 25 рад , частотой $\pi/2 \text{ рад/с}$ и сдвигом фазы $\pi/2$, аналогично сигналу, который применялся в сравниваемом варианте. Ниже на рисунках 3.3 – 3.7 приведены результаты исследования.

На рис 3.3 приведены кривые, отображающие реакцию сравниваемого варианта системы на отработку синусоидального входного воздействия, где кривым соответствуют: 1 – задающий сигнал, 2 – некомпенсированный сигнал, 3 – сигнал с компенсацией нелинейности в прямом канале, 4 – сигнал с компенсирующей обратной связью, 5 – при подаче корректирующего сигнала на выход нелинейного элемента.

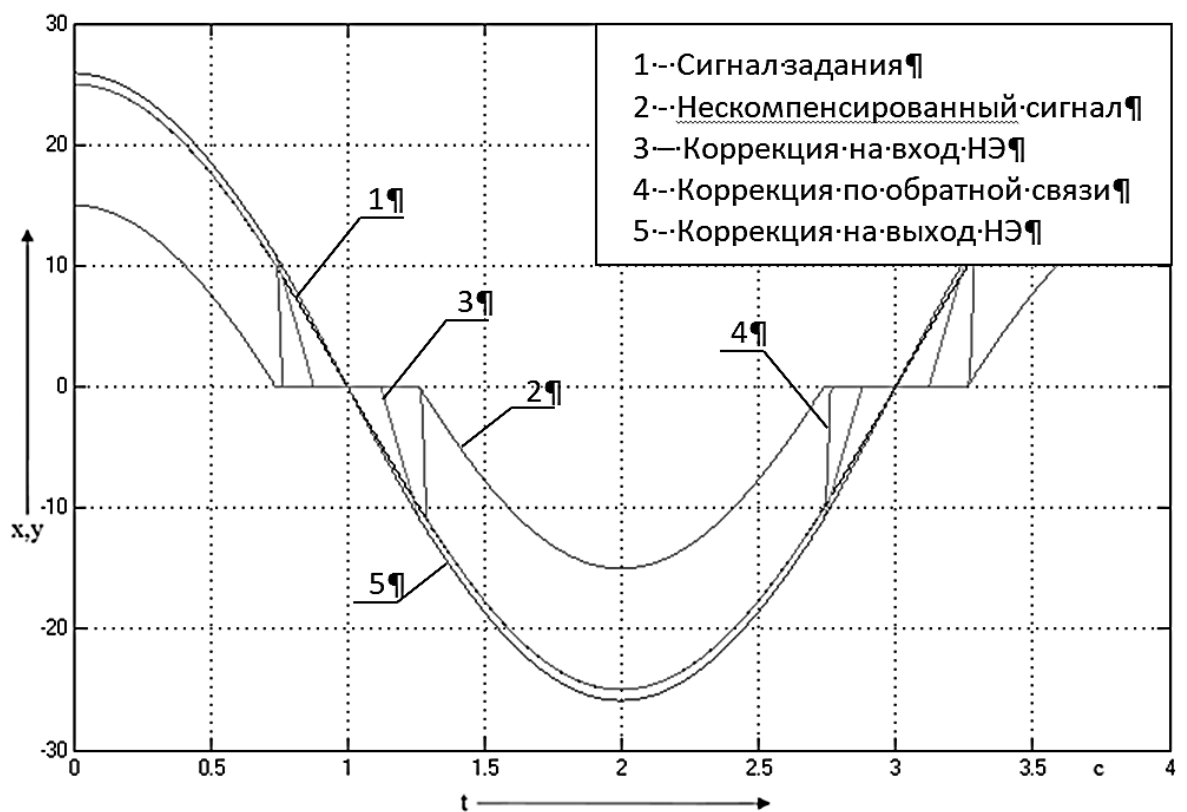


Рисунок 3.3 – Графики переходных процессов сигналов корректируемой системы.

После подачи в систему компенсирующего упреждающего воздействия среднеквадратичная ошибка (далее RMS) за время $t = 4c$ составила (рис. 3.3):

- некомпенсированный сигнал $RMS(\theta(t)) = 34,87$.
- введение прямой связи с подачей сигнала коррекции на вход нелинейного элемента $RMS(\theta(t)) = 4,981$;
- введение компенсирующей обратной связи с подачей сигнала коррекции на вход нелинейного элемента $RMS(\theta(t)) = 5,409$;
- введение компенсирующей прямой связи с подачей сигнала коррекции на выход нелинейного элемента $RMS(\theta(t)) = 3,135$.

На рисунках 3.4 и 3.5 приведены аналогичные кривые, но только при использовании системы, приведенной на рис. 3.2, при этом кривые на рисунке 3.4 отражают реакцию системы при реализации нечетких компенсаторов внешних контуров на базе выводов по Мамдани, а на рис. 3.5 – по Сугено, соответственно.

После подачи в систему компенсирующего предупреждающего воздействия среднеквадратичная ошибка (далее RMS) многокаскадной системы регулирования за время $t = 4c$ составила:

- некомпенсированный сигнал $RMS(\theta(t)) = 34,87$.
- используя нечеткий логический вывод Мамдани (рис. 3.3) $RMS(\theta(t)) = 2,265$;
- используя нечеткий логический вывод Сугено (рис. 3.4) $RMS(\theta(t)) = 2,751$;

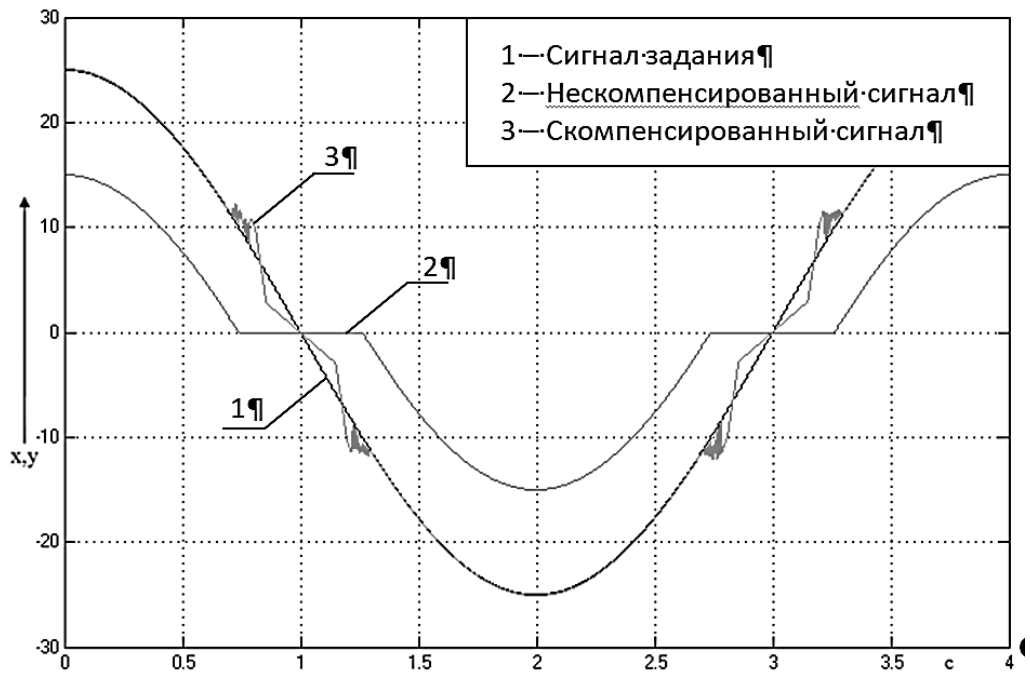


Рисунок 3.4 – Графики переходных процессов сигналов корректируемой системы (нечеткий логический вывод Мамдани).

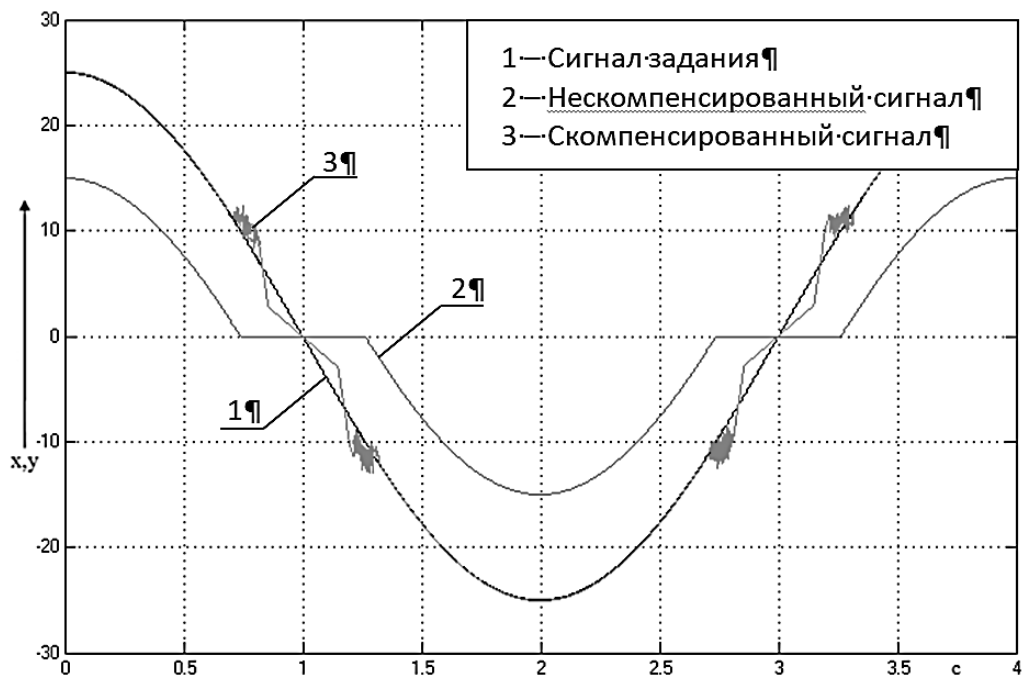


Рисунок 3.5 – Графики переходных процессов сигналов корректируемой системы (нечеткий логический вывод Сугено).

Несмотря на схожесть переходных процессов компенсированных сигналов, представленных на рисунках 3.4 и 3.5, моменты переключения

внешнего каскада между выбором способов для компенсации в определенный момент времени различны (рис. 3.6).

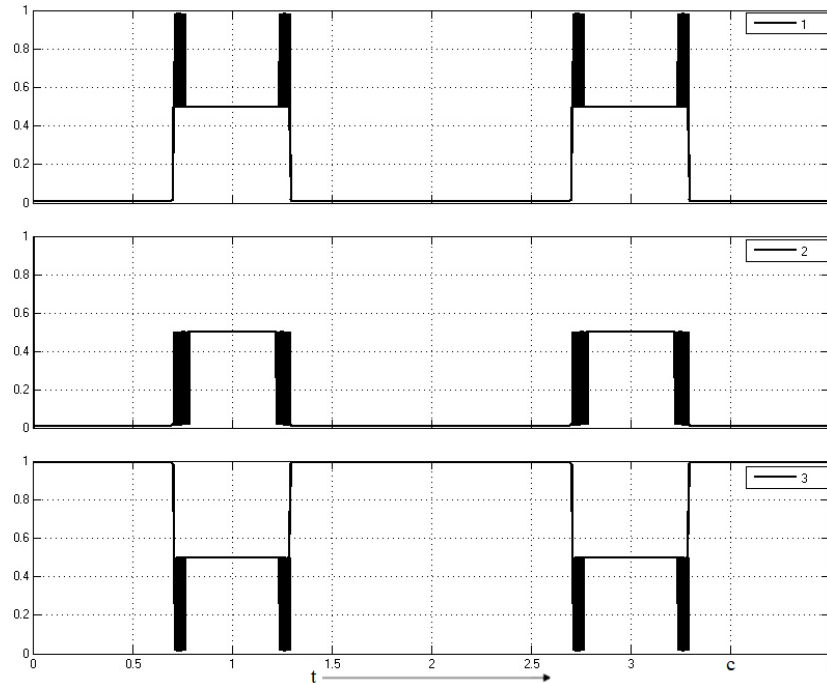


Рисунок 3.6 – Выходной сигнал нечетного переключающего устройства (внешнего каскада).

Как видно из рисунков 3.4 и 3.5, использование изложенного выше принципа, в основу которого заложена интеллектуальная система автоматического регулирования технологическим процессом с нечеткими логическими компенсаторами позволило нивелировать общую ошибку системы управления и получить показатели качества динамических процессов не хуже, чем при использовании в системе управления локальных нечетких логических компенсаторов.

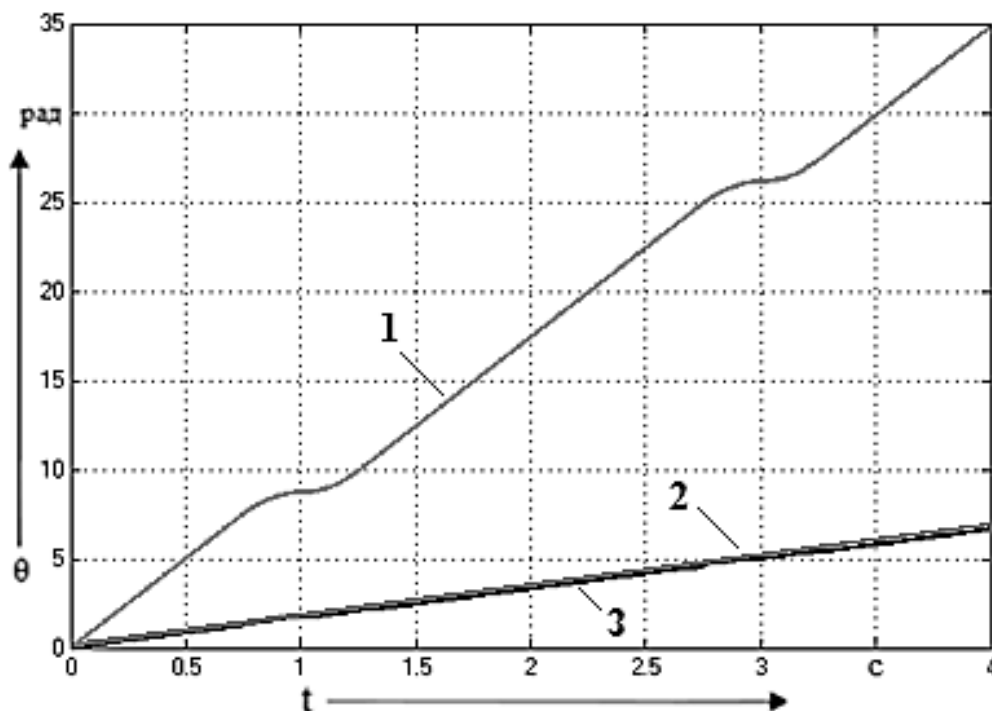


Рисунок 3.7 – Накопленная среднеквадратическая ошибка системы по времени.

Как показано на рисунке 3.7 (1 – RMS нелинейного элемента; 2, 3 – RMS компенсированного нелинейного элемента интеллектуальной системой с нечетким логическим выводом Сугено нулевого порядка во внешнем каскаде и Мамдани соответственно), применение предлагаемого метода многокаскадного управления позволило существенно снизить ошибку системы.

Предложенная методология, на основе многокаскадного нечеткого регулятора, решает задачу компенсации нелинейностей при помощи теории мягких вычислений и позволяет управлять не только включением отдельно взятых способов компенсации нелинейных элементов САУ, но и использовать их совместно для улучшения качества переходного процесса.

Основным оптимизационным показателем данного решения является повышение качества 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.

Анализ результатов моделирования с применением технологии нечеткой многокаскадной компенсации нелинейных элементов, как естественного, так и искусственного характера показал возможности к реализации универсального подхода для регулирования любыми сложными технологическими объектами и системами.

В основу представленной методики заложены различные сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода, показаны достоинства и недостатки применения таких сочетаний при наличии различных нелинейностей. Кроме того, необходимо отметить, что структурное решение, положенное в основу внутреннего каскада, представляют собой нечеткие модули, реализующие различные методы компенсации естественных и искусственных нелинейных элементов сложных объектов регулирования. На внешний каскад возложены функции классификации и выбора соответствующего метода реализованного во вложенной интеллектуальной модели, что существенно повышает, как интеллектуальные свойства системы и так универсальность алгоритма в целом.

3.2 Параметрический и структурный синтез многокаскадного НЛР систем управления позиционированием

Как было показано в главе 1 одним из важнейших достоинств регуляторов, реализуемых на базе нечеткой логики, является возможность их гибкой настройки, что в конечном итоге обеспечит повышение качества регулирования [22, 39, 40, 45, 51, 52, 54]. 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 [57, 58, 63, 71, 75, 77, 78].

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. Имитационная модель одного из возможных вариантов системы регулирования положением исполнительного механизма на основе электропривода постоянного тока с нечетким многокаскадным регулятором представлена на рисунке 3.8.

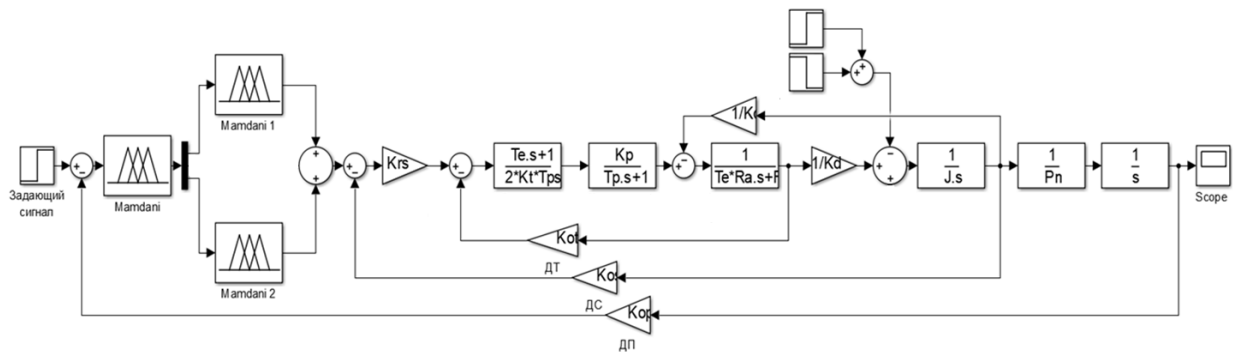


Рисунок 3.8 – Модель системы регулирования положения с нечетким многокаскадным регулятором.

Многокаскадный нечеткий регулятор, изображенный на рисунке 3.8, структурно состоит из внешнего интеллектуального переключающего устройства с одним информационным входом и двумя выходами, и элементов внутреннего каскада, которые представляют собой модули с единственными лингвистическими переменными на входе и выходе соответственно. Целевой функцией регулятора является выработка такого управляющего воздействия, независимо от величины перемещения, чтобы

выходная координата системы управления обладала требуемыми показателями качества в динамических и статических режимах.

При этом на нечеткий регулятор Mamdani возлагается задача определения «больших» и «малых» перемещений, то есть, реализация функции слежения. В свою очередь нечеткий регулятор Mamdani1 отвечает за «большие» перемещения, а Mamdani2 – за «малые».

Регулятор с алгоритмом нечеткого вывода Мамдани (рис. 3.9) имеет одну входную лингвистическую переменную формализующую термин «сигнал ошибки по положению». Выход регулятора организован на базе двух лингвистических переменных, которые формируют сигналы управления элементами вложенного каскада. Таким образом, такое интеллектуальное переключающее устройство осуществляет интеллектуальную оценку поступающих на вход сигналов и с учетом заложенного механизма вывода, на основе полученных данных вырабатывает управляющее воздействие на модули вложенного каскада.

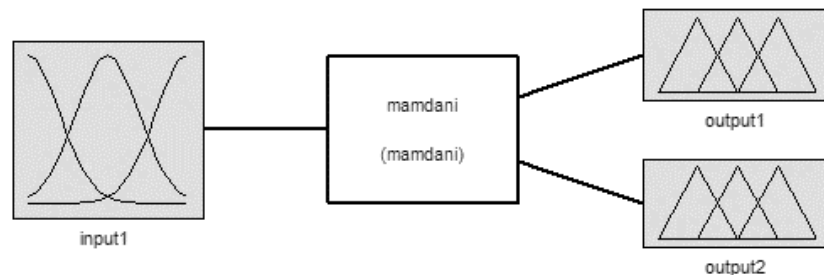


Рисунок 3.9 – Функциональная схема нечеткого регулятора.

Несмотря на многовариантность задачи настройки диапазонов входных и выходных сигналов нечеткого регулятора, с целью универсализации в рассматриваемом случае она осуществлялась симметрично.

Область определения лингвистической переменной $input1$, формализующей сигнал ошибки по положению, представляет собой диапазон $[-120; 120]$, а базовое терм-множество (T) состоит из следующих элементов: $T = \{N, Z, P\}$ (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Обозначение терм-множеств.

Обозначение терм-множества	Англоязычная нотация	Русскоязычная нотация
N	Negative	Отрицательное
NM	Negative Middle	Отрицательное среднее
Z	Zero	Нуль, близкое к нулю
PM	Positive Middle	Положительное среднее
P	Positive	Положительное

Три функции принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной $input1$, как показано на рисунке 3.10.

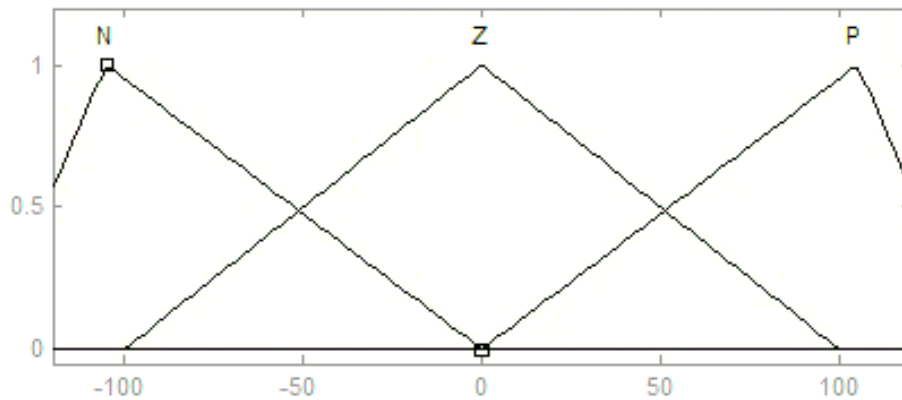


Рисунок 3.10 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной $input1$.

Область определения лингвистической переменной $output1$, формализующей понятие сигнала ошибки по положению для «больших» перемещений регулятора Mamdani, представляет собой диапазон $[-100; 100]$. Базовое терм-множество состоит из следующих элементов: $T = \{N, NM, Z, PM, P\}$ (таблица 3.1). Область определения лингвистической переменной $output2$, формализующей понятие сигнала ошибки по положению для «малых» перемещений регулятора Mamdani, представляет собой диапазон $[-10; 10]$. Базовое терм-множество состоит из следующих элементов: $T = \{N, NM, Z, PM, P\}$. Пять функций принадлежности

треугольного вида распределяются по областям определения лингвистических переменных $output1$ и $output2$, как показано на рисунках 3.11 и 3.12.

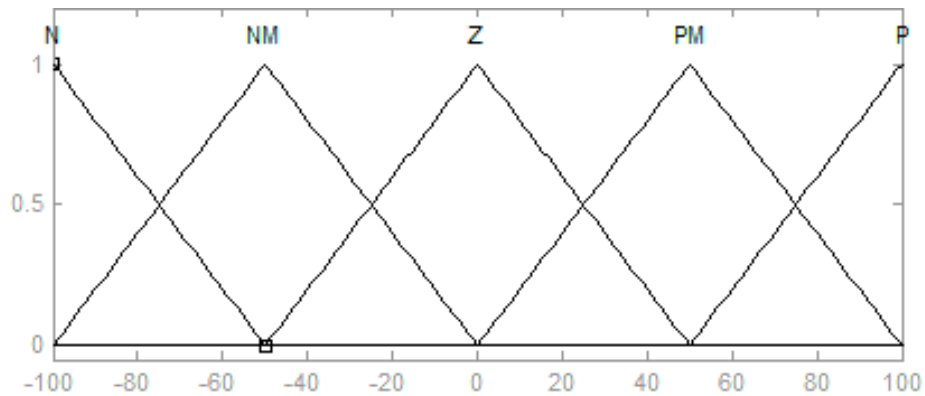


Рисунок 3.11 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной $output1$.

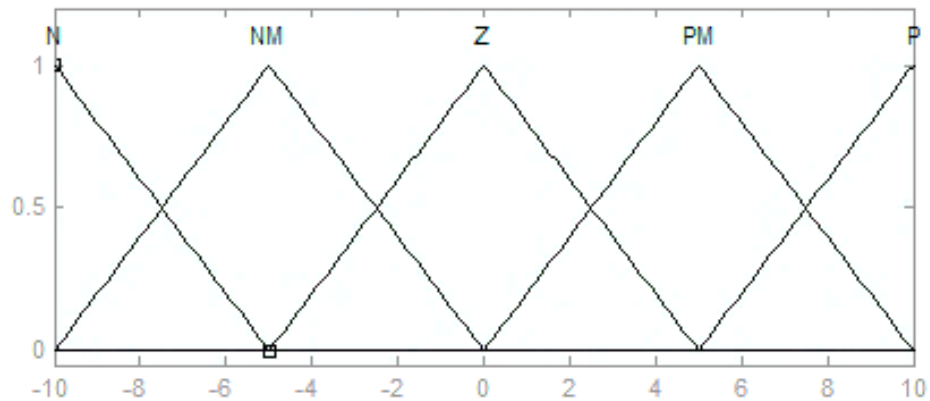


Рисунок 3.12 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной $output2$.

При рассматриваемом случае распределения функций принадлежности нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani может быть представлена пятью правилами вида:

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть NM;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть PM;

Если «input1» есть N, то «output1» есть NM, «output2» есть N;

Если «input1» есть P, то «output1» есть PM, «output2» есть P.

Регулятор Mamdani 1 (mam1) (рис. 3.13) имеет одну входную лингвистическую переменную *input1*, формализующую понятие входного сигнала (сигнал ошибки по положению); сигнал управляющего напряжения для контура скорости в случае «больших» перемещений формализуется лингвистической переменной *output1* на выходе регулятора. В основу данного нечеткого регулятора также положен алгоритм вывода Мамдани (с целью универсальности).

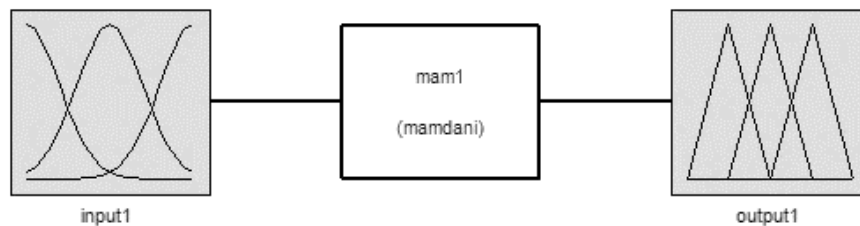


Рисунок 3.13 – Функциональная схема нечеткого регулятора Mamdani 1.

Настройки лингвистической переменной *input1* регулятора Mamdani 1 идентичны настройкам лингвистической переменной *output1* регулятора Mamdani.

Область определения лингвистической переменной *output1* регулятора Mamdani 1 представляет собой диапазон $[-660; 660]$. Базовое терм-множество состоит из следующих элементов: $T = \{N, NM, Z, PM, P\}$. Пять функций принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной *output1* (рис. 3.14).

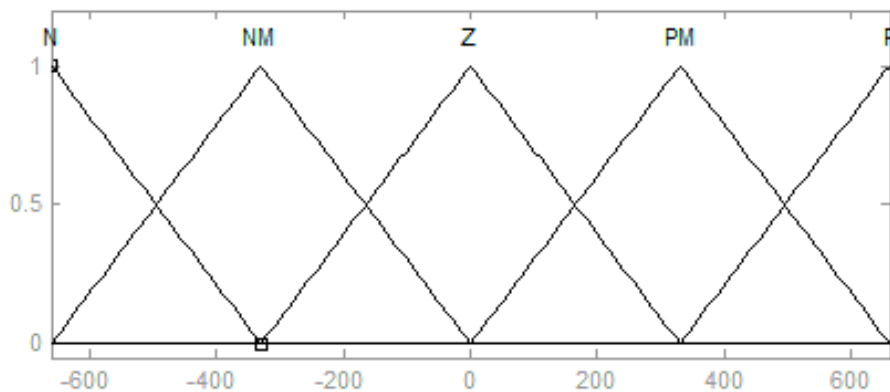


Рисунок 3.14 – Распределение нечетких термов переменной «output1».

Нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani 1 включает в себя пять правил вида:

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z;

Если «input1» есть N, то «output1» есть N;

Если «input1» есть NM, то «output1» есть NM;

Если «input1» есть P, то «output1» есть P;

Если «input1» есть PM, то «output1» есть PM.

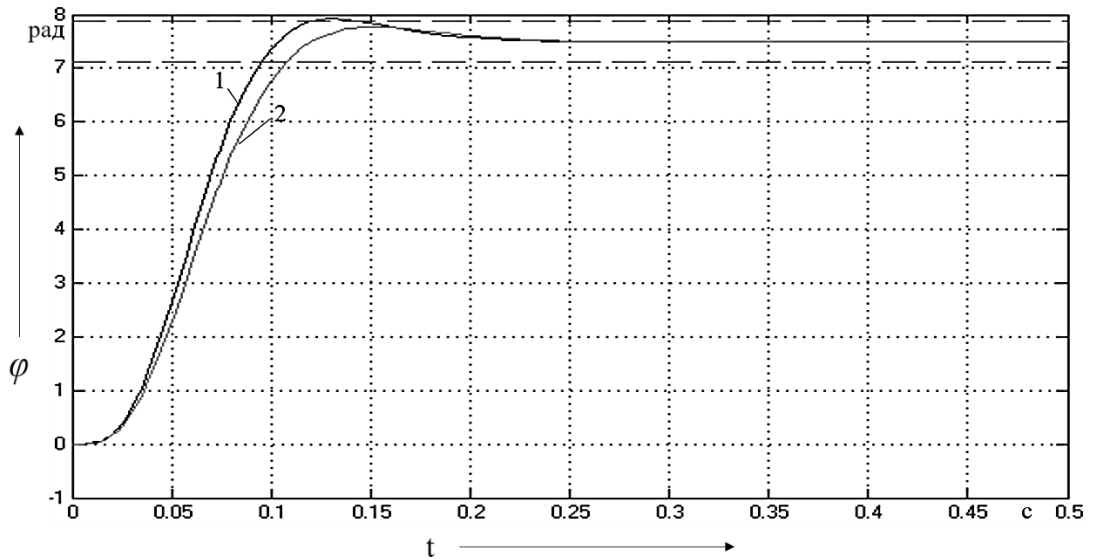
Регулятор Mamdani 2 (mam2) (рис. 3.13) имеет одну входную лингвистическую переменную *input1*, формализующую понятие входного сигнала (сигнал ошибки по положению); сигнал управляющего напряжения для контура скорости в случае «малых» перемещений формализуется лингвистической переменной *output1* на выходе регулятора. В основу данного нечеткого регулятора также положен алгоритм вывода Мамдани.

Настройки лингвистической переменной *input1* регулятора Mamdani 2 идентичны настройкам лингвистической переменной *output2* регулятора Mamdani.

Область определения лингвистической переменной *output1* регулятора Mamdani 2 представляет собой диапазон $[-70; 70]$, базовое терм-множество состоит из следующих элементов: $T = \{N, NM, Z, PM, P\}$. Пять функций принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной *output1* аналогично распределению нечетких термов регулятора Mamdani 1 (mam1).

Нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani 2 полностью повторяет базу знаний регулятора Mamdani 1.

Анализ качественных показателей системы управления положением, приведенной на рисунке 3.8, рассмотрим на примере отработки скачка задающего воздействия (рис. 3.15). Для сравнения на этом же рисунке приведена реакция аналогичной системы с классическим регулятором положения.

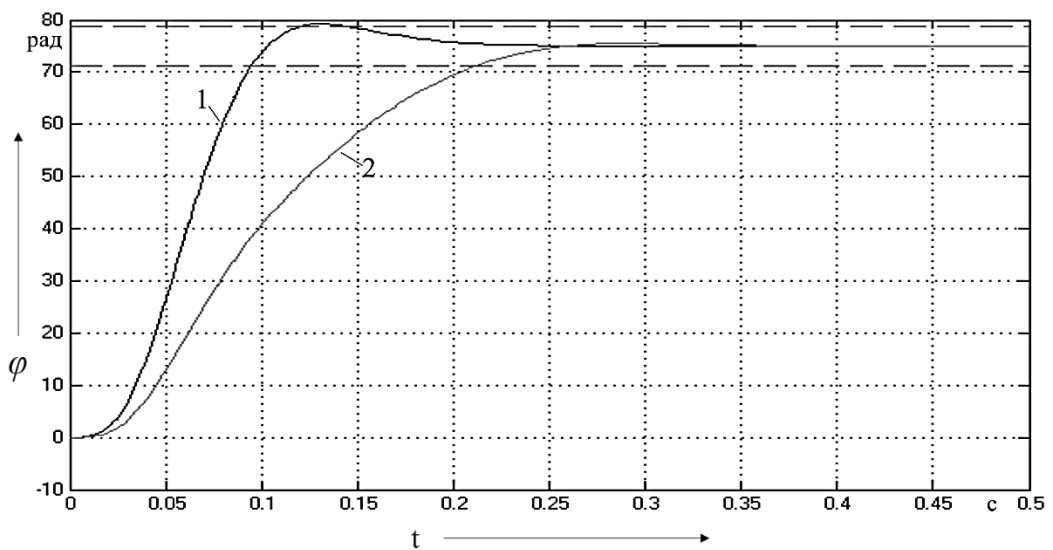


1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор

Рисунок 3.15 – Реакция систем на входное воздействие $U=8 В$.

Анализ результатов моделирования наглядно показывает что, система позиционирования с регулятором положения, реализованного на базе нечеткой логики, имеет практически то же время позиционирования ($0,108 с$), но обладает меньшей величиной перерегулирования (3,5%).

Реакция систем на входной сигнал, в десять раз превышающий предыдущее значение (работа системы в режиме большого сигнала), показана на рисунке 3.16.



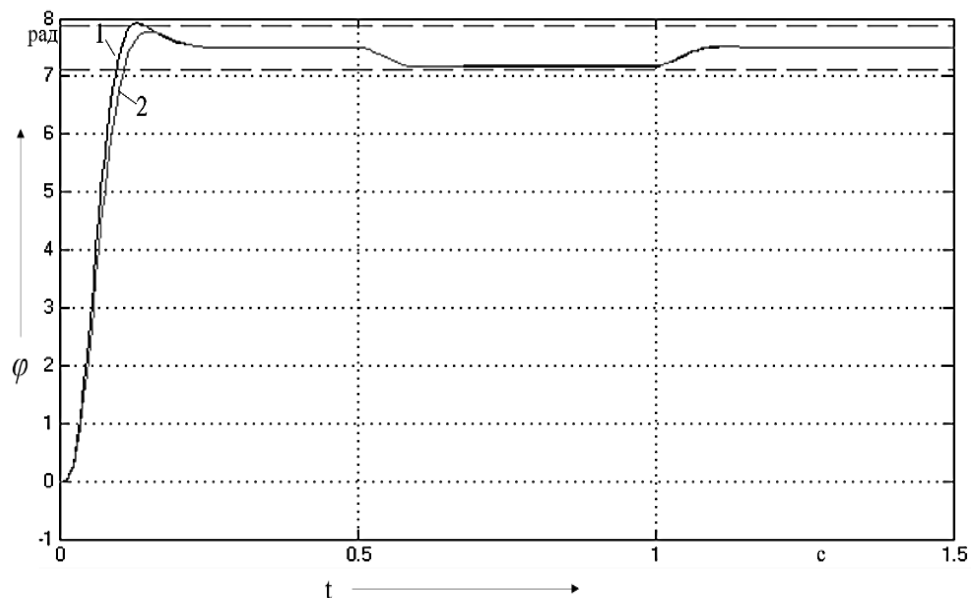
1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор

Рисунок 3.16 – Реакция систем на входное воздействие $U=80 В$.

При обработке больших перемещений система позиционирования с нечетким регулятором положения обрабатывает задающее воздействие практически без перерегулирования (0,6%), но с большим временем регулирования 0,21 с. Учитывая, что для систем позиционирования во главу ставится отсутствие перерегулирования, то и в этом случае рассматриваемая нечеткая система позиционирования имеет определенное преимущество

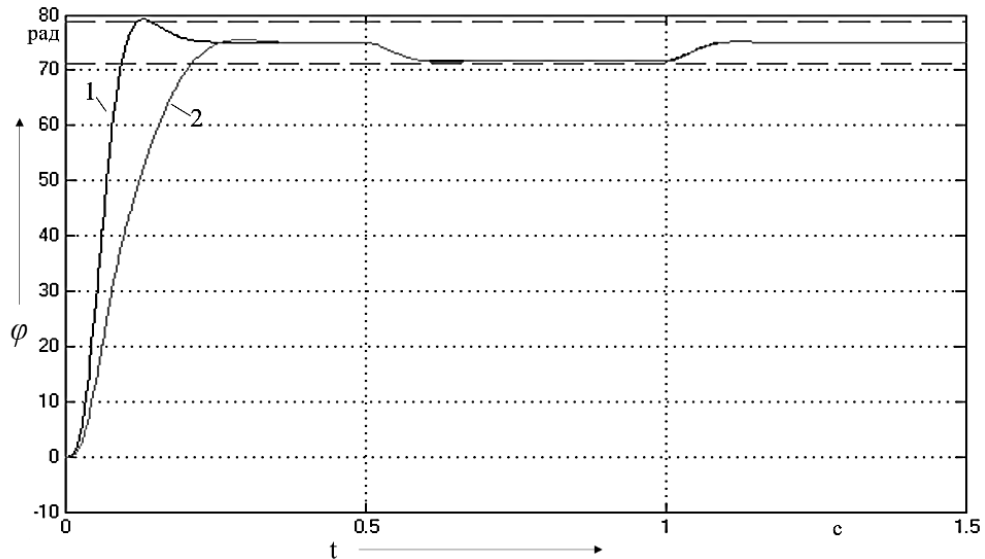
Максимально возможная величина задающего воздействия, при которой нечеткий регулятор работает корректно, равна 120, что соответствует настроенному диапазону регулирования нечеткой системы. Минимальное значение входного сигнала системы равно 4, показатели качества при такой величине задающего воздействия идентичны показателям качества классического регулирования.

Реакция систем при набросе и сбросе нагрузки (0,5-1 с) при входных сигналах уровнем 8 В и 80 В представлена на рисунках 3.17, 3.18.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

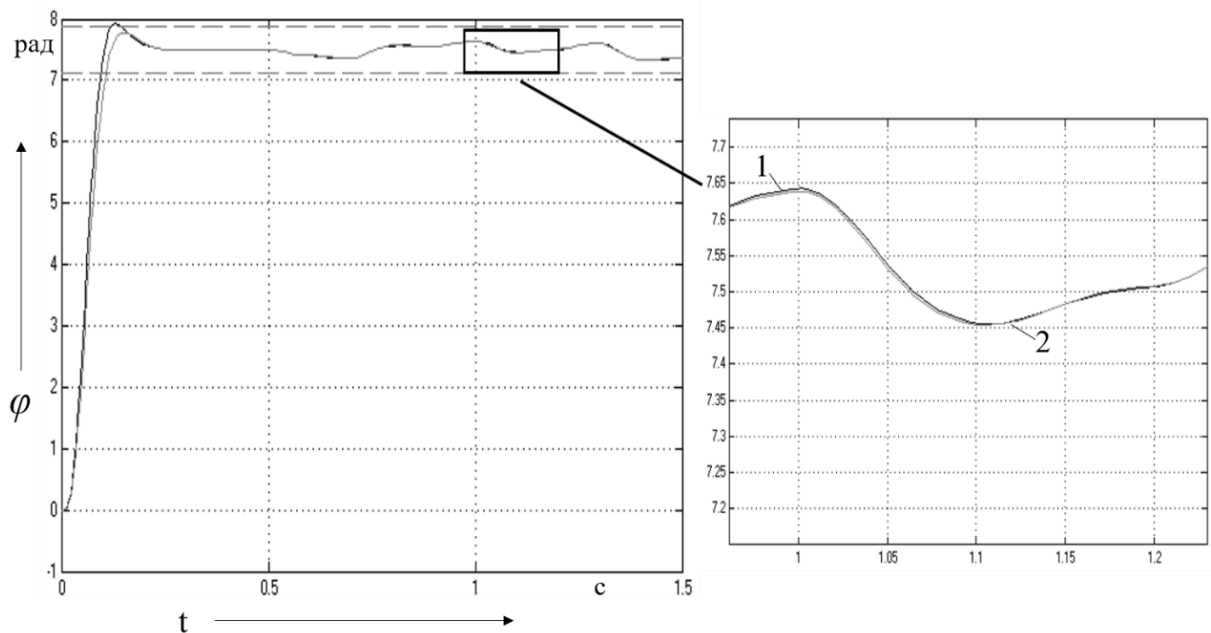
Рисунок 3.17 – Реакция систем на входное воздействие $U=8 В$ при подаче и съёме нагрузки.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.18– Реакция систем на входное воздействие $U=80\text{ В}$ при подаче и съёме нагрузки.

Реакция систем при отработке возмущающего воздействия случайного характера, поданным на систему в момент времени (0,5 с) при задающем воздействии уровнем $U=8\text{ В}$ представлена на рисунке 3.19.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.19 – Реакция систем при подаче возмущающего воздействия.

Таким образом, анализ результатов моделирования позволяет утверждать, что даже при упрощенном подходе к синтезу параметров нечеткого регулятора положения, проявившегося в произвольном выборе распределения функций принадлежности нечеткого регулятора, показатели качества динамических характеристик нечеткой системы позиционирования не уступают аналогичным системе с классическим регулятором положения.

Дальнейшее совершенствование нечеткой системы позиционирования с точки зрения повышения качества управления может быть достигнуто за счет некоторого усложнения нечеткого регулятора положения. Структурно это сводится к добавлению во второй каскад еще одного нечеткого регулятора (рис. 3.20).

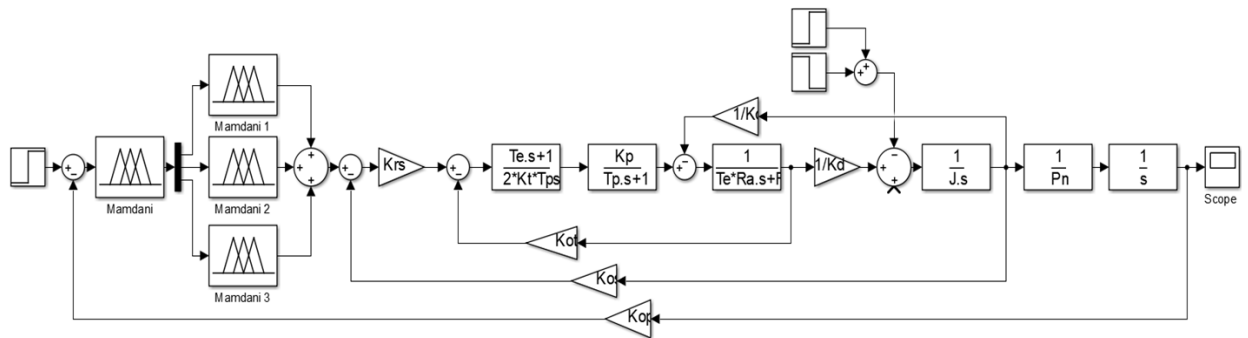


Рисунок 3.20 – Модель системы регулирования положения с нечетким многокаскадным регулятором.

Такое расширение интеллектуальных возможностей регулятора Mamdani (рис. 3.21) подразумевает структуру с тремя лингвистическими переменными output1, output2 и output3 на выходе, которые формализуют понятия сигнала ошибки по положению для «больших», «средних» и «малых» перемещений.

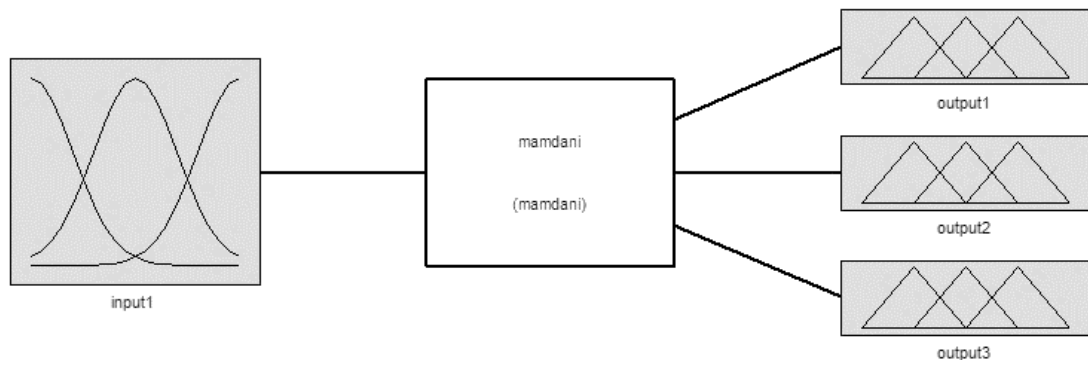


Рисунок 3.21 – Функциональная схема нечеткого регулятора Mamdani с тремя выводами.

Область определения лингвистической переменной *input1*, формализующей сигнал ошибки по положению, остаётся неизменной, как и базовое терм-множество. Распределение функций принадлежности показано на рисунке 3.22.

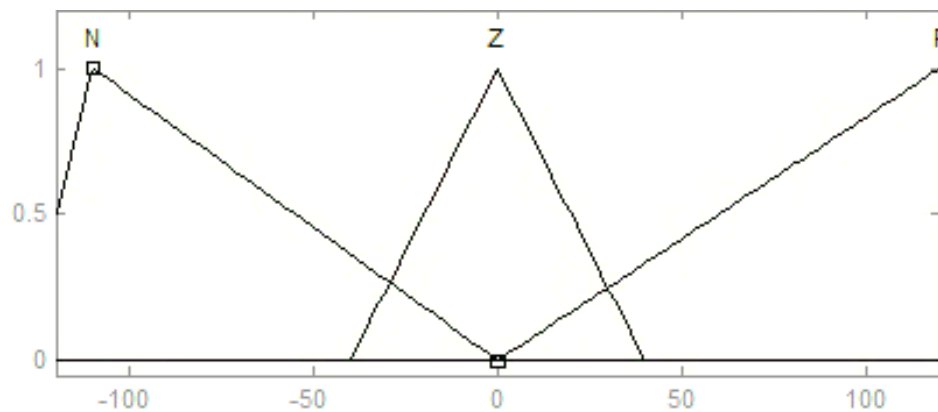


Рисунок 3.22 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной *input1*.

Настройки лингвистических переменных *output1*, *output2* остаются неизменными. Лингвистическая переменная *output3*, формализующая понятие ошибки по положению для «малых» перемещений, имеет диапазон области определения $[-1;1]$. Базовое терм-множество состоит из следующих элементов: $T = \{N, NM, Z, PM, P\}$. Пять функций принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной *output3*, как показано на рисунке 3.23.

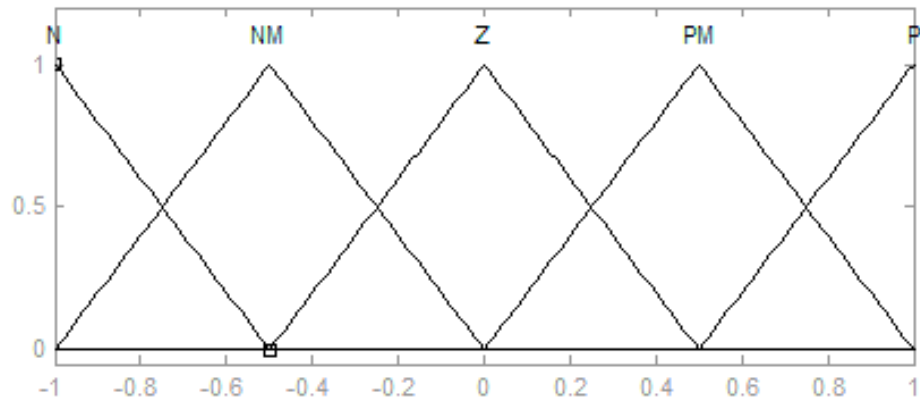


Рисунок 3.23 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной output3.

Нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani с тремя выходами включает в себя набор правил вида:

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть NM;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть PM;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть N;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть P;

Если «input1» есть P, то «output1» есть P, «output2» есть Z, «output3» есть Z;

Если «input1» есть P, то «output1» есть PM, «output2» есть Z, «output3» есть Z;

Если «input1» есть P, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть P;

Если «input1» есть P, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть PM;

Если «input1» есть N, то «output1» есть N, «output2» есть N, «output3» есть N;

Если «*input1*» есть N , то «*output1*» есть Z , «*output2*» есть Z , «*output3*» есть NM .

Настройка лингвистической переменной *input1* регулятора Mamdani 3 (mam3) (рис. 3.24) выполняется идентично настройке лингвистической переменной *output3* регулятора Mamdani.

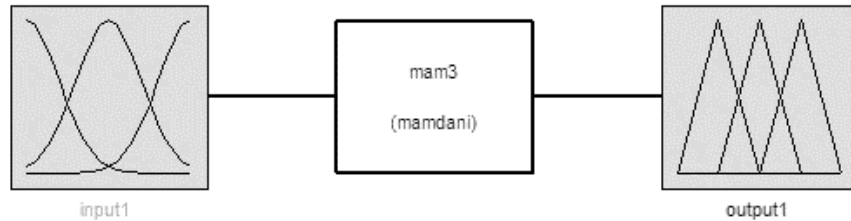
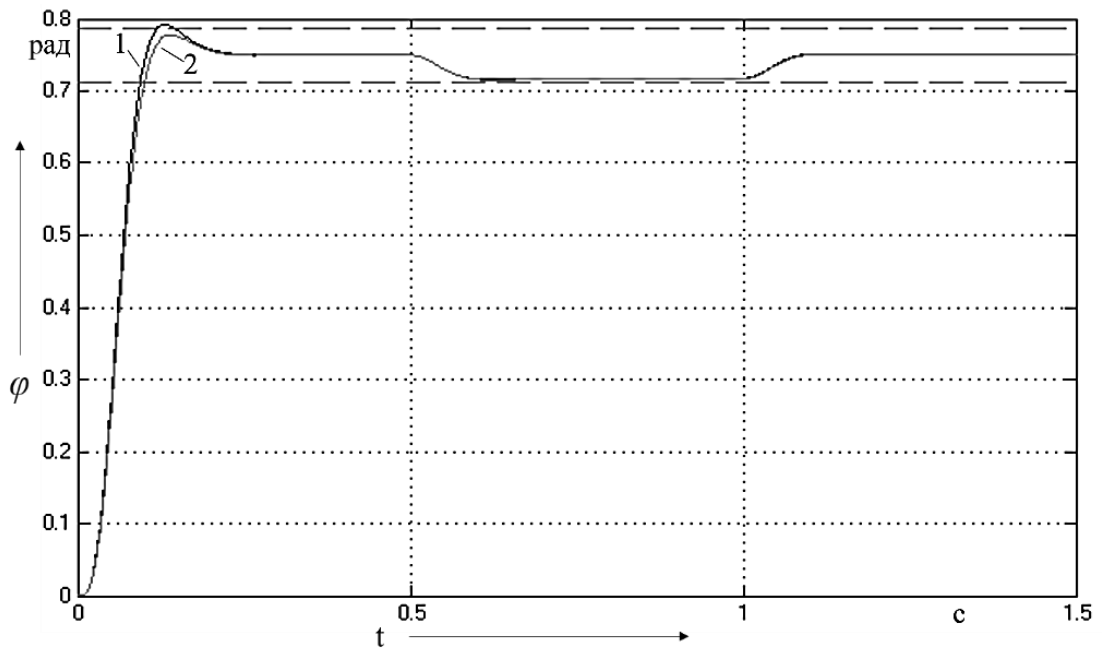


Рисунок 3.24 – Функциональная схема нечеткого регулятора Mamdani 3.

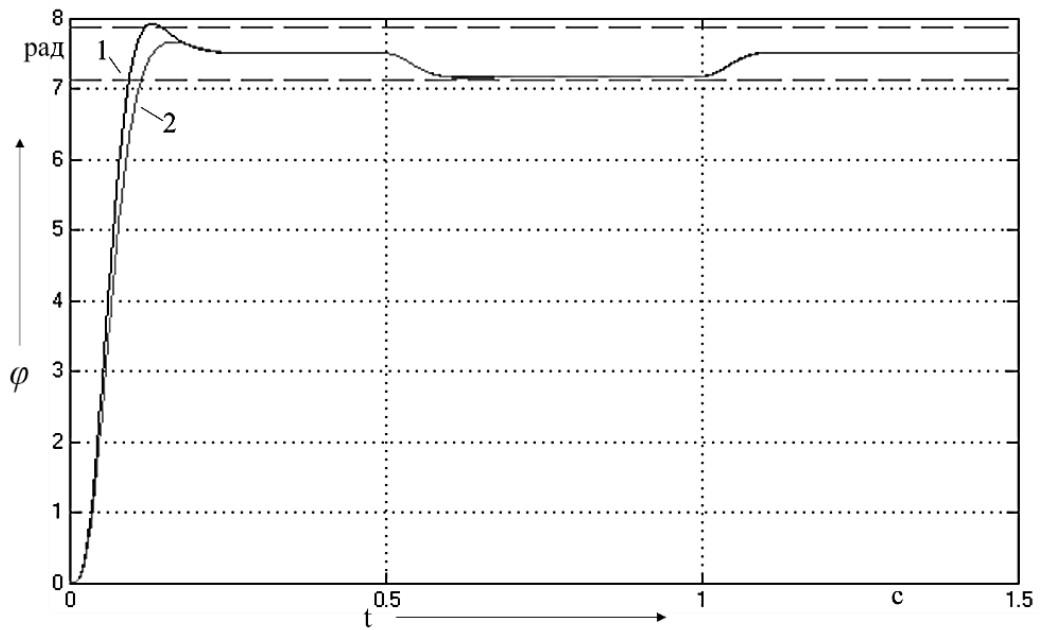
Область определения лингвистической переменной *output1*, формализующей понятие величины управляющего напряжения для контура скорости, представляет собой диапазон $[-6,8; 6,8]$, базовое терм-множество состоит из следующих элементов: $T = \{N, NM, Z, PM, P\}$. Пять функций принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной *output1* аналогично распределению нечетких термов регуляторов Mamdani 1. Нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani 3 полностью повторяет базу знаний регуляторов Mamdani 1.

Эффективность данного технического решения оценим, как и ранее моделированием нечеткой системы управления позиционированием. На рисунках 3.25 – 3.27 показана реакция систем с нечетким и с классическим регулятором на входной сигнал в малых пределах регулирования – $0,8 В$, в средних – $8 В$ (номинальный сигнал) и в больших – $80 В$, при набросе и сбросе нагрузки в моменты времени $0,5с$ и $1с$.



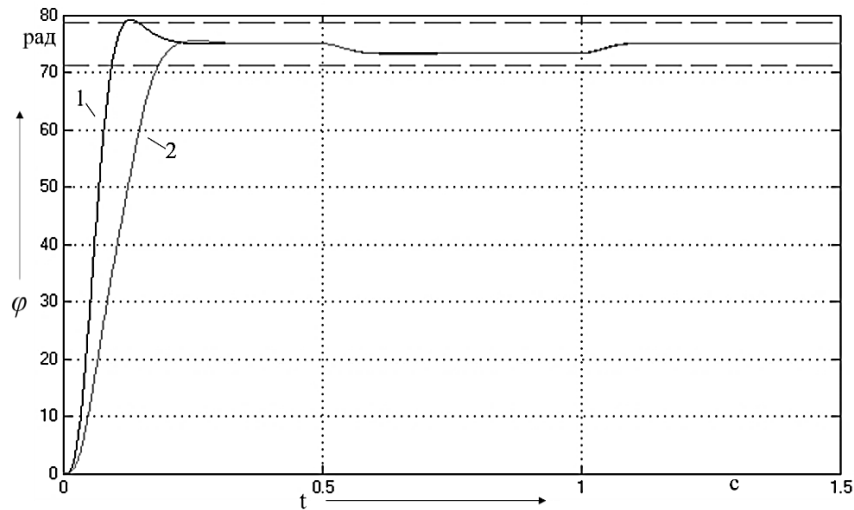
1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.25 – Реакция систем на входное воздействие $U=0,8$ В.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.26 – Реакция систем на входное воздействие $U=8$ В.

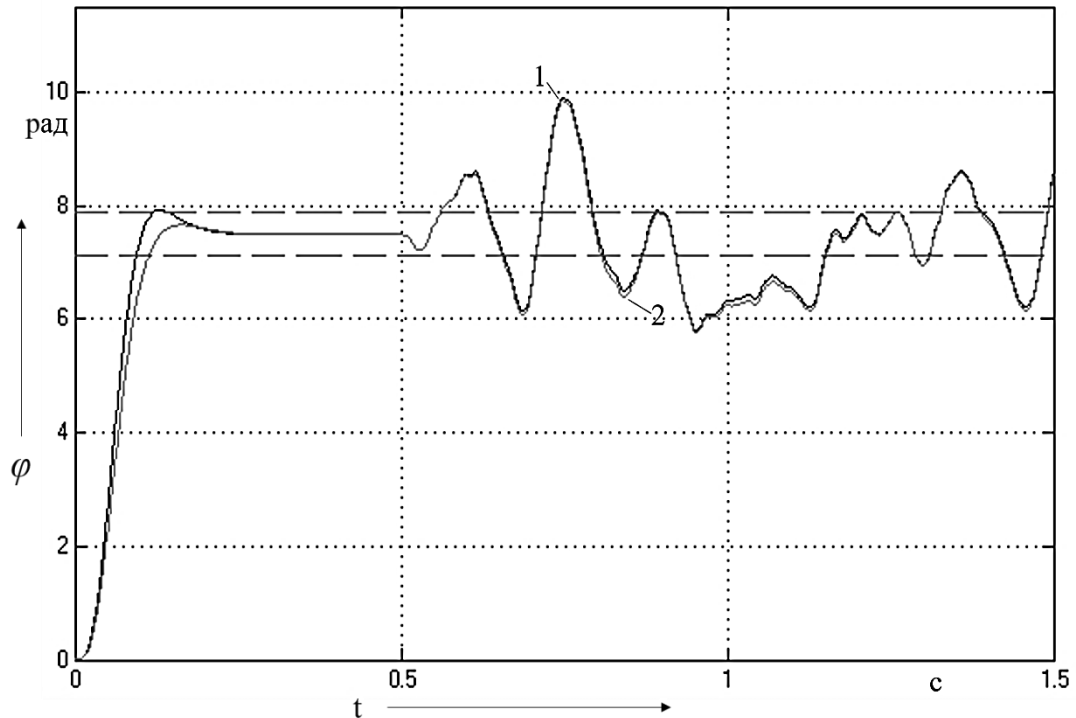


1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.27 – Реакция систем на входное воздействие $U=80 В$.

Анализ кривых моделирования дает возможность констатировать, что система позиционирования с регулятором положения, построенным на базе нечеткой логики при «малых» перемещениях, имеет время переходного процесса $0,1 с$ и перерегулирование $3,7\%$; при «средних» перемещениях время регулирования составляет $0,114 с$, а перерегулирование $2,1\%$; при «больших» перемещениях система с нечетким регулятором отработывает практически без перерегулирования ($0,7\%$) и временем регулирования $0,184 с$. Таким образом, интеллектуальная система с многокаскадным регулятором обладает лучшими динамическими характеристиками по сравнению с системой управления с классическим регулятором положения в пределах заданного диапазона перемещения $[-120; 120]$. Отработка возмущающих воздействий системы управления с нечетким регулятором осуществляется практически одинаково с вариантом в классической системе управления. Если говорить о сравнительной интегральной оценке работы анализируемой системы, то можно утверждать, что система, построенная с применением алгоритма нечеткого логического вывода Мамдани с двумя выходами, показывает лучшие результаты в широком диапазоне изменения входного сигнала $[0,1; 120]$.

Реакция систем на обработку возмущающего воздействия случайного вида значительной величины подаваемого в момент $0,5$ с при уровне задающего сигнала $U=8$ В представлена на рисунке на рисунке 3.28.

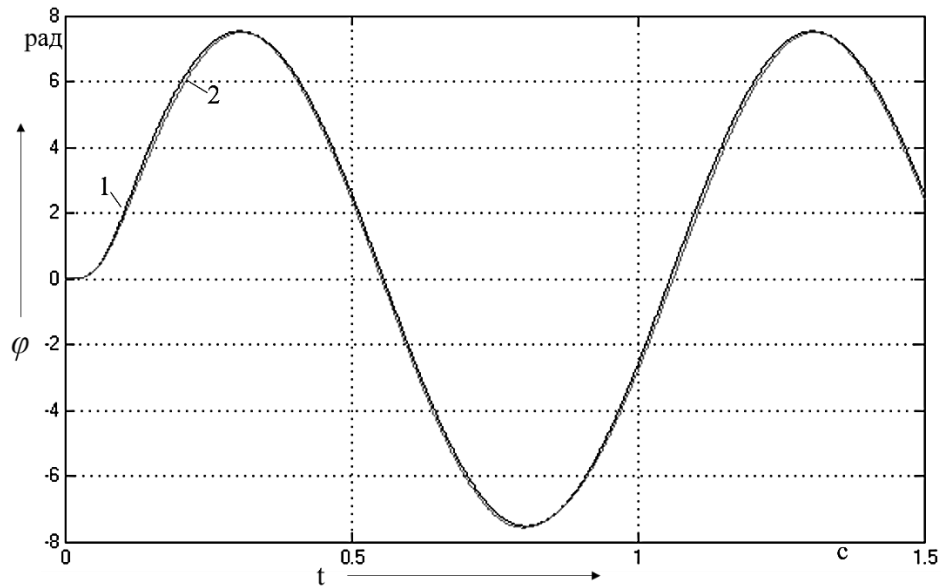


1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.28 – Реакция систем при подаче случайного сигнала большого номинала как возмущающее воздействие.

Анализ результатов наглядно демонстрирует, что интеллектуальная система позиционирования обрабатывает случайное возмущающее воздействие не хуже системы позиционирования с классическим регулятором. Незначительное рассогласование в кривых можно объяснить упрощенным подходом при параметрическом синтезе нечетких регуляторов. Это легко устраняется увеличением количества функций принадлежности и их расположением.

Реакция систем на синусоидальное входное воздействие с амплитудой 8 и частотой 2π рад/с представлена на рисунке 3.29.

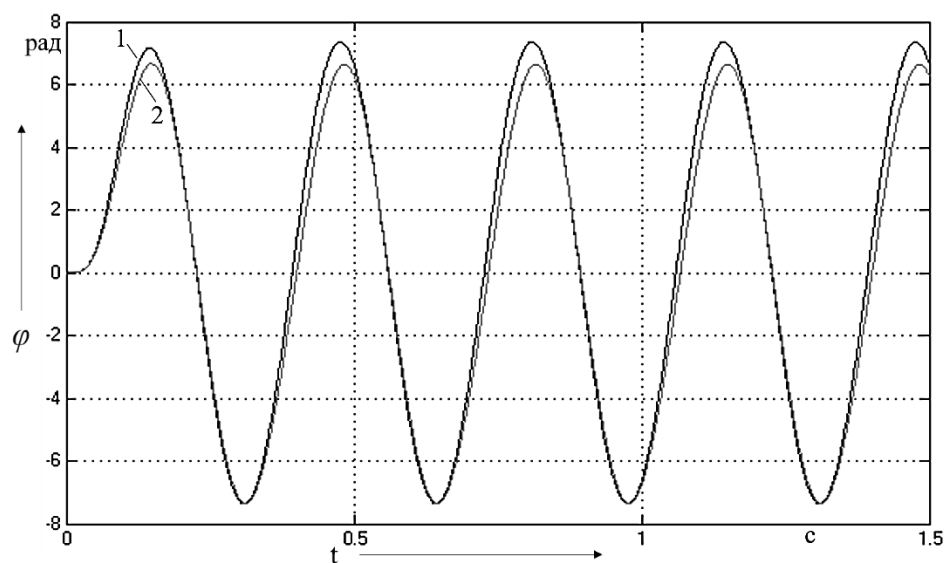


1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.29 – Реакция систем на входное синусоидальное воздействие.

Система управления с многокаскадным нечетким регулятором обрабатывает входное синусоидальное воздействие практически одинаково с системой управления с классическим регулятором положения.

Трехкратное увеличение частоты входного сигнала приводит к несколько иным результатам. На рисунке 3.30 приведены результаты моделирования систем для данного случая.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

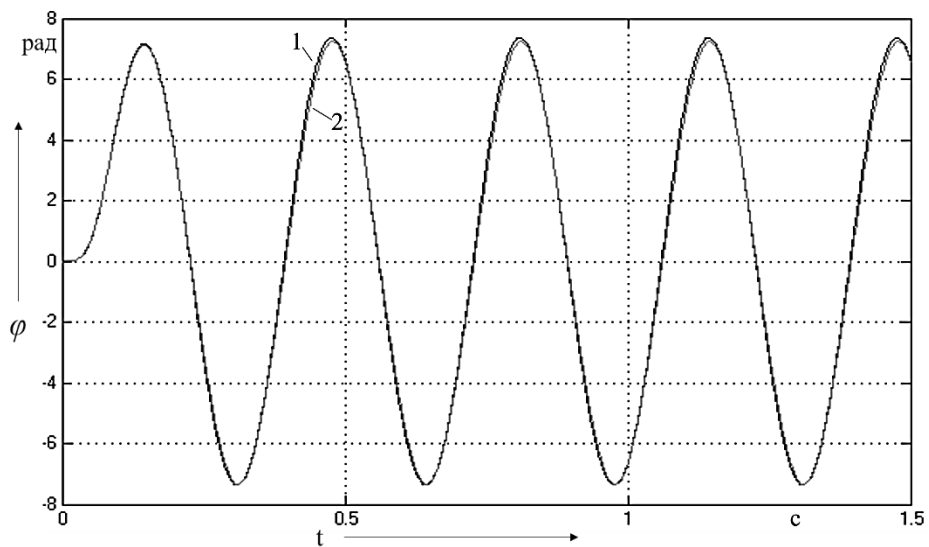
Рисунок 3.30 – Реакция систем на входное воздействие.

Как видно из полученных кривых, при увеличении частоты в 3 раза синусоидального входного сигнала, система управления с нечетким регулятором имеет меньшие значения амплитуды выходной величины для положительных полуволн. Это опять указывает на недочеты в параметрическом синтезе нечеткого регулятора.

Так, например, при добавлении правила:

Если «input1» есть P, то «output1» есть P, «output2» есть P, «output3» есть P,

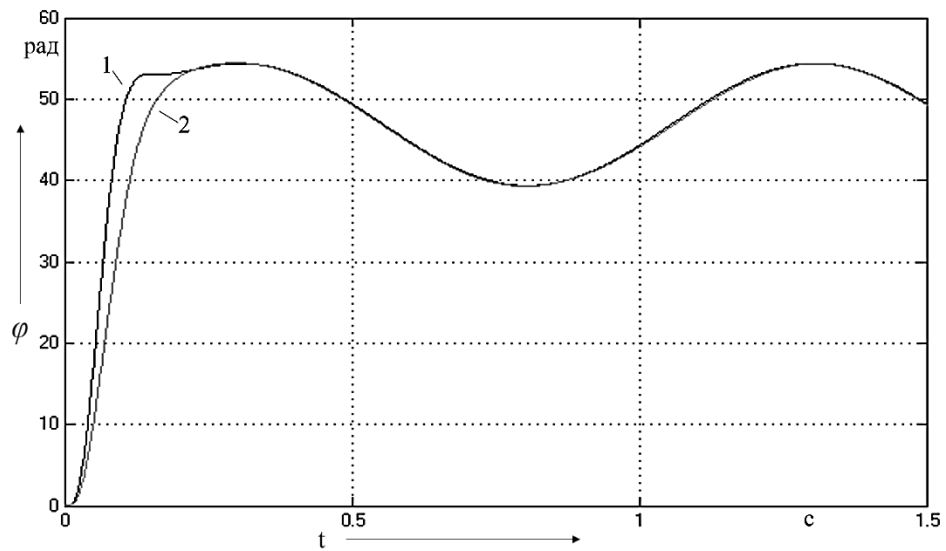
реакция нечеткой системы будет совпадать с классической (рис. 3.31).



1 — классический регулятор; 2 — нечеткий регулятор.

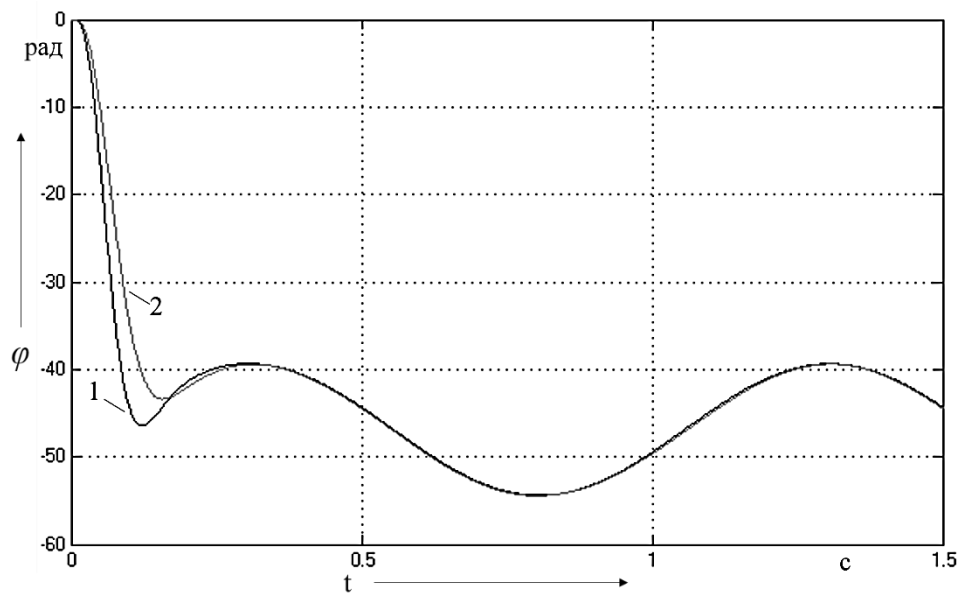
Рисунок 3.31 — Реакция систем на входное воздействие.

Реакция систем на смещение синусоиды входного сигнала на величину 50 и -50 имеет вид графиков, показанных на рисунках 3.32, 3.33.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.32 – Реакция систем на входное синусоидальное воздействие со смещением вверх.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.33 – Реакция систем на входное синусоидальное воздействие со смещением вниз.

Нечеткая система, выходя на синусоиду, обрабатывает сигнал более корректно, без лишних колебаний, что наиболее удовлетворяет требованиям следящих систем.

Таким образом, на основании вышеприведенного анализа можно констатировать, что использование каскадного принципа построения нечеткого регулятора для следящих и систем позиционирования позволяет расширить функциональные возможности систем и улучшить показатели качества регулирования. Увеличение числа нечетких регуляторов второго каскада позволяет расширить диапазон регулирования системы управления, а точность позиционирования повысить за счет правильности и объективности настройки базы правил каждого из регуляторов.

Далее рассмотрим влияние алгоритма вывода нечеткого регулятора на показатели качества систем управления положением. Так как многокаскадный нечеткий регулятор имеет несколько алгоритмов вывода, то их определённое сочетание может привести к лучшим выходным характеристикам системы. Вначале рассмотрим структурное решение для многокаскадного нечеткого регулятора при организации внешнего каскада с использованием алгоритма вывода Мамдани и внутреннего каскада на основе механизма Сугено.

Модель системы автоматического регулирования положением исполнительного механизма на примере электропривода постоянного тока с нечетким многокаскадным регулятором представлена на рисунке 3.34.

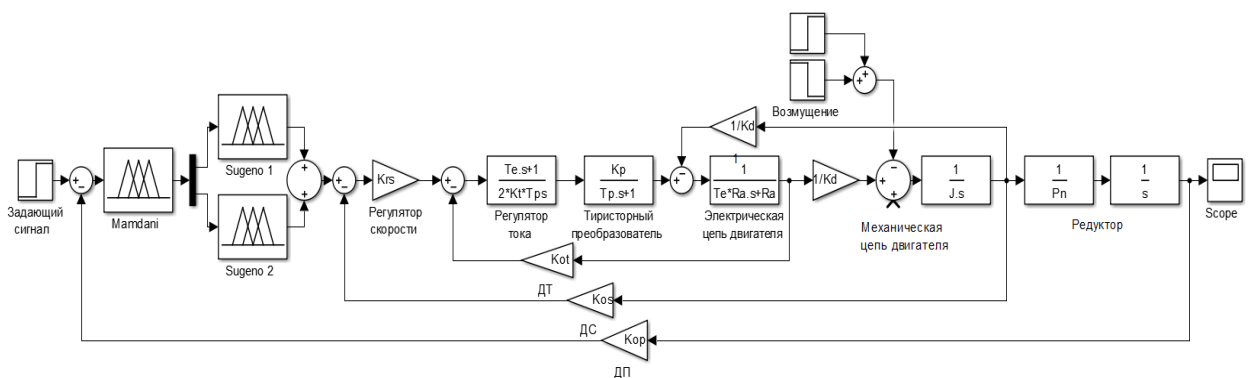


Рисунок 3.34 – Имитационная модель системы управления положением с нечетким многокаскадным регулятором с алгоритмом вывода Сугено во внутреннем каскаде.

Функциональная схема регулятора Mamdani представлена на рисунке 3.21. Изменению подвергается только расположение функций принадлежности лингвистической переменной $input1$ и база знаний. Настройки лингвистических переменных $output1$ и $output2$ остаются неизменными, как показано выше.

Таким образом, три функции принадлежности треугольного вида распределяются по области определения лингвистической переменной $input1$ регулятора Mamdani, как показано на рисунке 3.35.

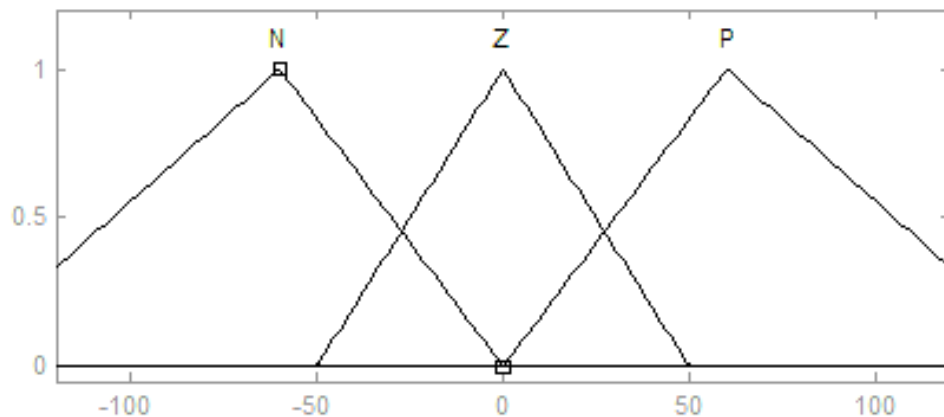


Рисунок 3.35 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной $input1$.

Нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani включает в себя пять правил вида:

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть NM;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть PM;

Если «input1» есть N, то «output1» есть NM, «output2» есть NM;

Если «input1» есть P, то «output1» есть PM, «output2» есть PM.

Регулятор Sugeno 1 (sug1) (рис. 3.36) имеет одну входную лингвистическую переменную $input1$, формализующую понятие сигнала ошибки по положению для «больших» перемещений; сигнал управляющего напряжения для контура скорости на выходе регулятора формализуется

лингвистической переменной *output1*. В основу данного нечеткого регулятора положен упрощенный алгоритм нечеткого логического вывода.

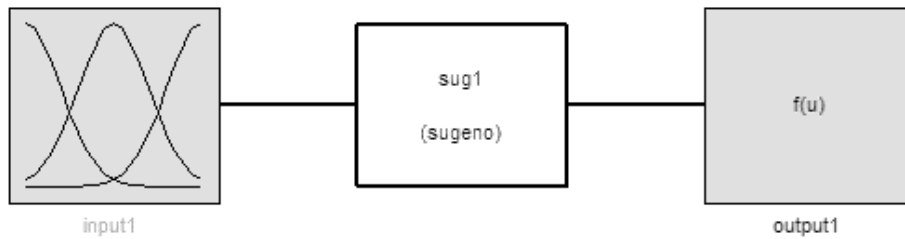


Рисунок 3.36 – Функциональная схема нечеткого регулятора Sugeno 1.

Настройки лингвистической переменной *input1* регулятора Sugeno 1 идентичны настройкам лингвистической переменной *output1* регулятора Mamdani (рис. 3.12).

Область определения лингвистической переменной *output1* представляет собой набор констант: [-660; -270; 0; 270; 660].

Нечеткая продукционная база знаний регулятора Sugeno 1 имеет вид:

Если «input1» есть Z, то «output1» = 0;

Если «input1» есть N, то «output1» = -660;

Если «input1» есть NM, то «output1» = -270;

Если «input1» есть P, то «output1» = 660;

Если «input1» есть PM, то «output1» = 270.

Регулятор Sugeno 2 (sug2) (рис. 3.37) имеет одну входную лингвистическую переменную *input1*, формализующую понятие сигнала ошибки по положению для «малых» перемещений; сигнал управляющего напряжения для контура скорости на выходе регулятора формализуется лингвистической переменной *output1*. В основу данного нечеткого регулятора также положен алгоритм вывода Сугено.

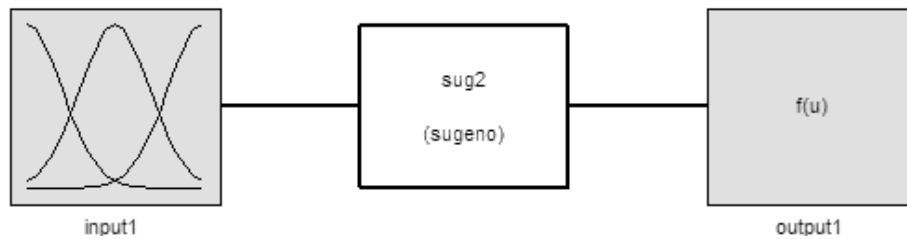


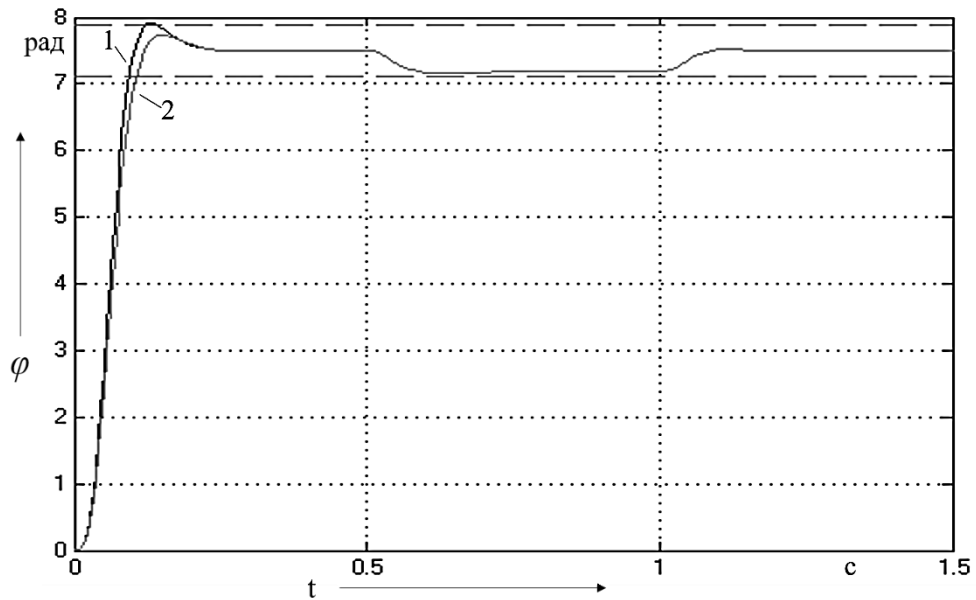
Рисунок 3.37 – Функциональная схема нечеткого регулятора Sugeno 2.

Настройки лингвистической переменной *input1* регулятора Sugeno 2 идентичны настройкам лингвистической переменной *output2* регулятора Mamdani (рис. 3.14).

Область определения лингвистической переменной *output1* представляет собой набор констант: $[-66; -10; 0; 10; 66]$. Выбор распределения констант в заданной предметной области может быть произведен в вершинах выходных функций принадлежности унимодального вида, при реализации подобного регулятора с алгоритмом вывода Мамдани на заданный диапазон управления (рис. 3.24).

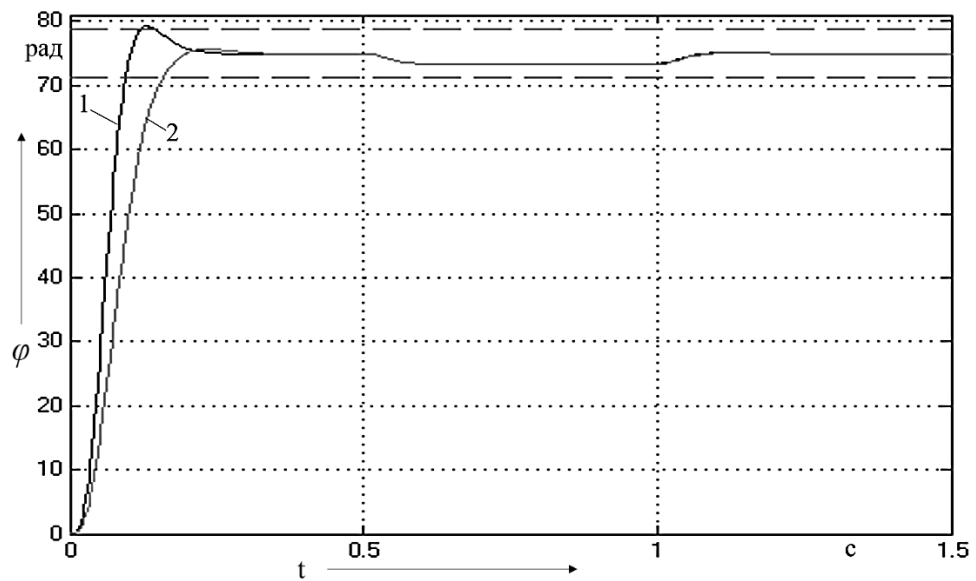
Нечеткая продукционная база знаний регулятора Sugeno 2 составляется аналогично базе знаний регулятора Sugeno 1.

На рисунках 3.38, 3.39 показана реакция систем с нечетким и с классическим регулятором на задающее воздействие величиной 8 В и 80 В , с набросом и съёмом нагрузки ($0,5\text{-}1\text{ с}$).



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.38 – Реакция систем на входное воздействие $U=8 В$.



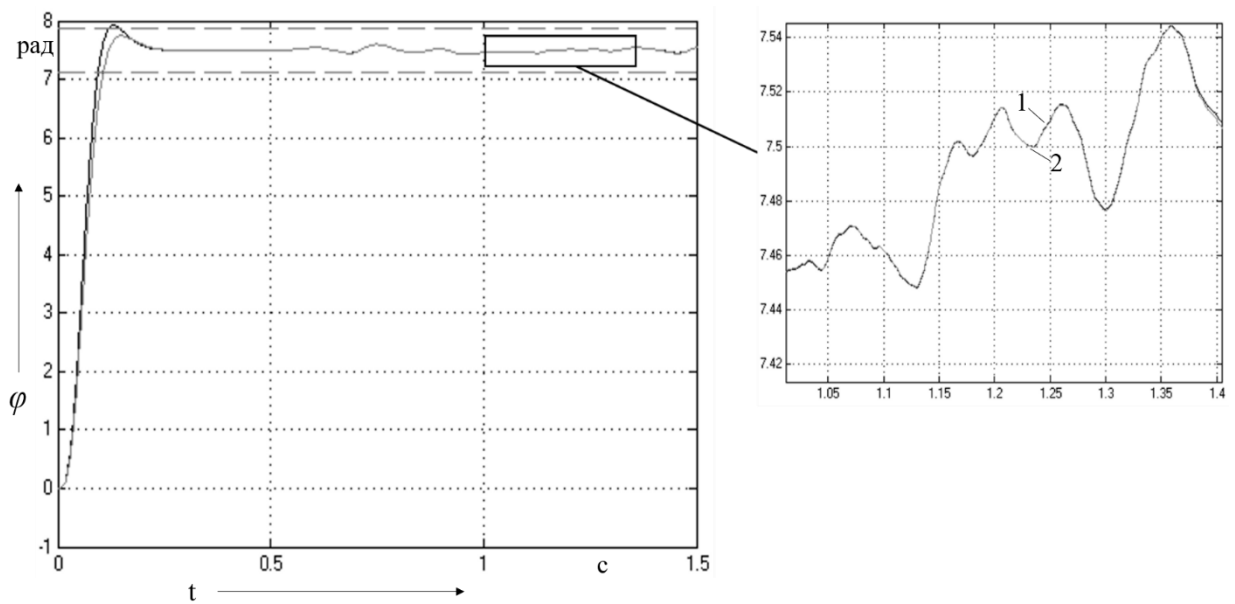
1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.39 – Реакция систем на входное воздействие $U=80 В$.

Как видно из графиков, нечеткая система обрабатывает возмущение идентично классической. Показатели качества при «малых» перемещениях: время регулирования $0,107 с$, перерегулирование $3,2\%$; при «больших» перемещениях: время регулирования $0,16 с$, перерегулирование $0,9\%$.

Стоит заметить, что для такого структурного решения максимально возможный сигнал задания по-прежнему равен 120, но минимальный равен 2, что немного расширяет диапазон регулирования по сравнению с регулятором с двумя выходами, во втором каскаде которого используется алгоритм вывода Мамдани.

Реакция систем при подаче случайного сигнала в качестве возмущения (0,5 с) при задающем воздействии уровнем $U=8 В$ представлена на рисунке 3.40.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.40 – Реакция систем при подаче случайного сигнала как возмущающее воздействие.

Анализ кривых показывает практическое совпадение отработки возмущения системами.

Как и в предыдущем пункте, чтобы улучшить работу и расширить диапазон регулирования многокаскадного нечеткого регулятора, добавляется ещё один нечеткий регулятор с алгоритмом вывода Сугено во второй каскад (рис. 3.41).

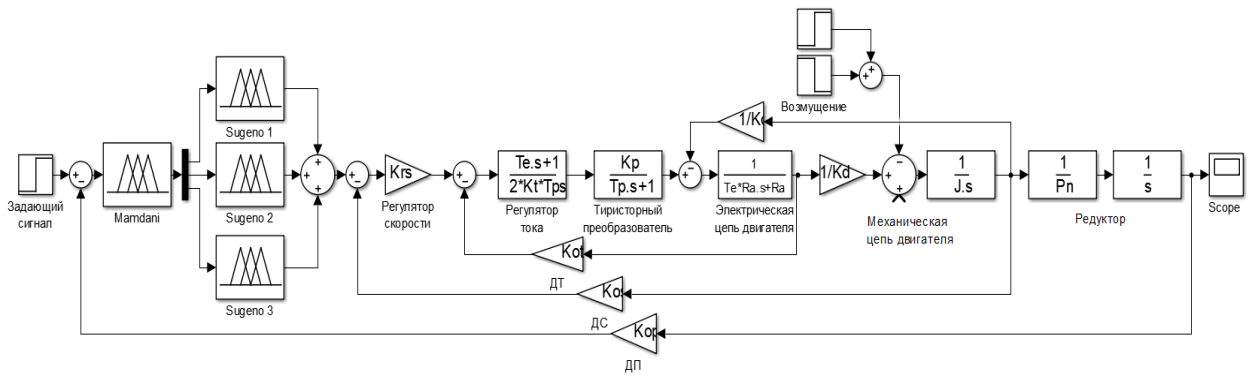


Рисунок 3.41 – Модель системы регулирования положения с нечетким многокаскадным регулятором.

Функциональная схема регулятора Mamdani представлена на рисунке 3.9. При внедрении дополнительного модуля в структуру многокаскадного нечеткого логического регулятора возникает необходимость некоторой модернизации интеллектуального переключающего устройства в части преобразования базового-терм множества и соответственно расширения базы нечетких продукционных правил.

Таким образом, распределение функций принадлежности входной лингвистической переменной нечеткого регулятора внешнего каскада при расширении базового терм-множества будет выглядеть, как показано на рисунке 3.42.

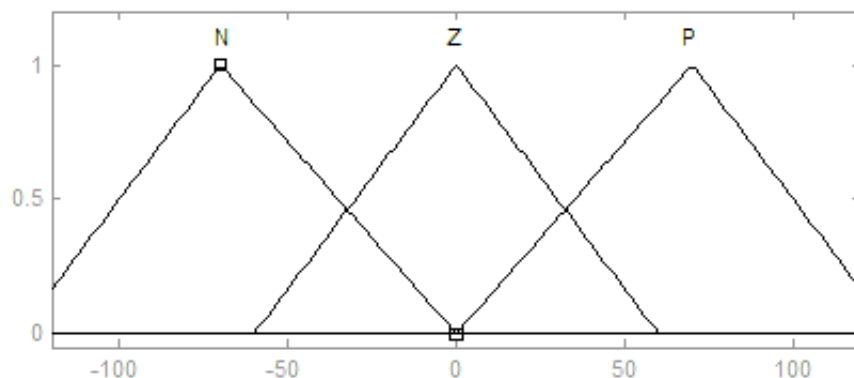


Рисунок 3.42 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной *input1*.

Настройки выходных лингвистических переменных задаются подобными и зависят только от диапазона изменения регулируемой величины.

Нечеткая продукционная база знаний регулятора Mamdani с тремя выходами, во втором каскаде которого используются нечеткие регуляторы с алгоритмом вывода Сугено, включает в себя шесть правил вида:

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть NM;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть PM;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть N;

Если «input1» есть Z, то «output1» есть Z, «output2» есть Z, «output3» есть P;

Если «input1» есть P, то «output1» есть PM, «output2» есть Z, «output3» есть Z;

Если «input1» есть N, то «output1» есть NM, «output2» есть NM, «output3» есть NM.

Настройка лингвистической переменной *input1* регулятора Sugeno 3 (*sug3*) (рис. 3.43), формализующей понятие сигнала ошибки по положению для «малых» перемещений, выполняется идентично настройке лингвистической переменной *output3* регулятора Mamdani. В основу данного нечеткого регулятора положен алгоритм нечеткого логического вывода Сугено.

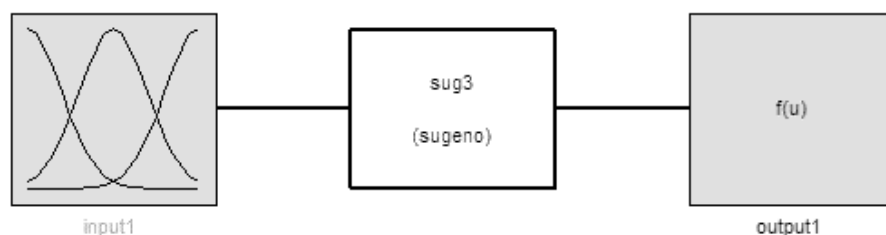


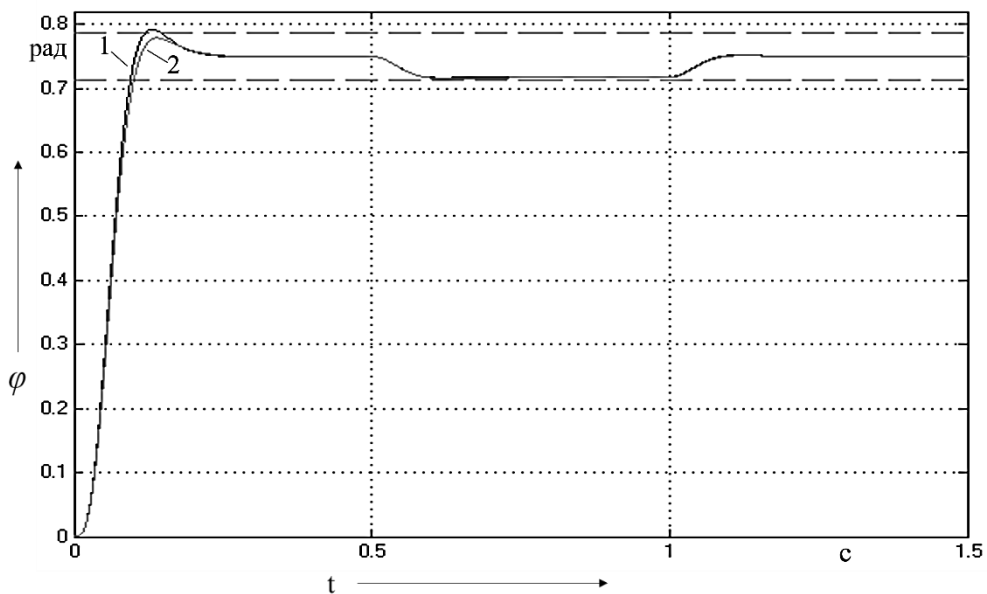
Рисунок 3.43 – Функциональная схема нечеткого регулятора Sugeno 3.

Область определения лингвистической переменной $output1$, формализующей понятие сигнала управляющего напряжения для контура скорости в случае «малых» перемещений, представляет собой набор констант: $[-6,8; 0,5; 0; -0,5; 6,8]$.

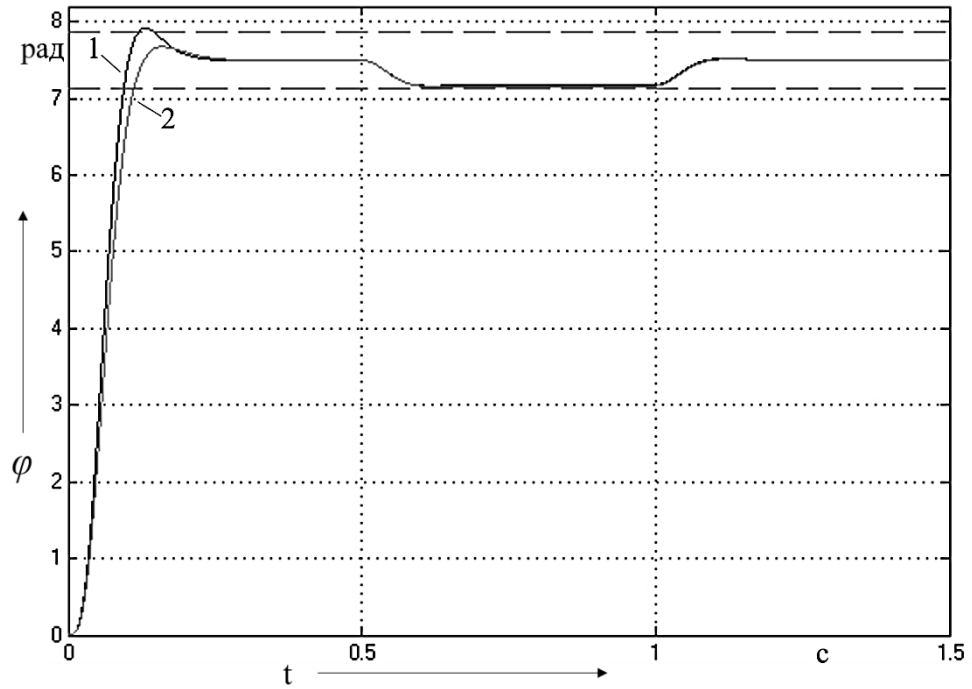
Нечеткая продукционная база знаний регулятора Sugeno 3 составляется аналогично базе знаний регулятора Sugeno 1.

Стоит отметить, что для такого расширения интеллектуальных возможностей многокаскадного нечеткого регулятора, область определения лингвистической переменной $output1$ регулятора Sugeno 1 представляет собой набор констант $[-660; -300; 0; 300; 660]$.

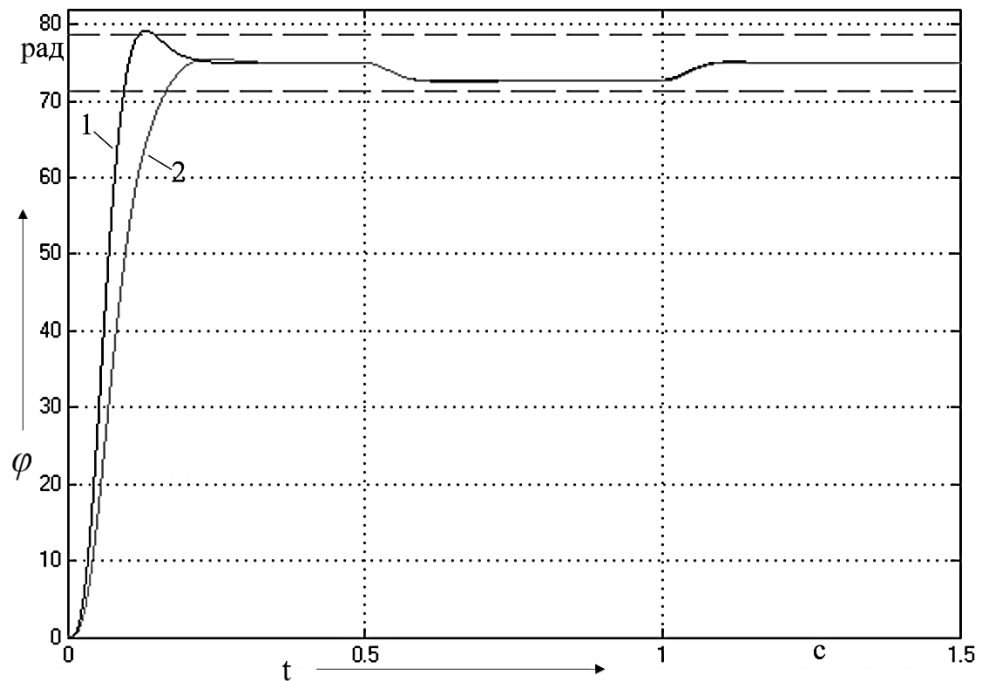
После завершения настройки многокаскадного нечеткого регулятора с тремя выходами, во втором каскаде которого используются нечеткие регуляторы с алгоритмом вывода Сугено, производится анализ системы на основе полученных в результате моделирования графиков. На рисунках 3.44 – 3.46 показана реакция систем с нечетким и с классическим регулятором на входной сигнал в малых пределах регулирования – $0,8 В$, в средних – $8 В$ (номинальный сигнал) и в больших – $80 В$, с набросом и съёмом нагрузки ($0,5-1 с$).



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.44 – Реакция систем на входное воздействие $U=0,8 В$.

1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.45 – Реакция систем на входное воздействие $U=8 В$.

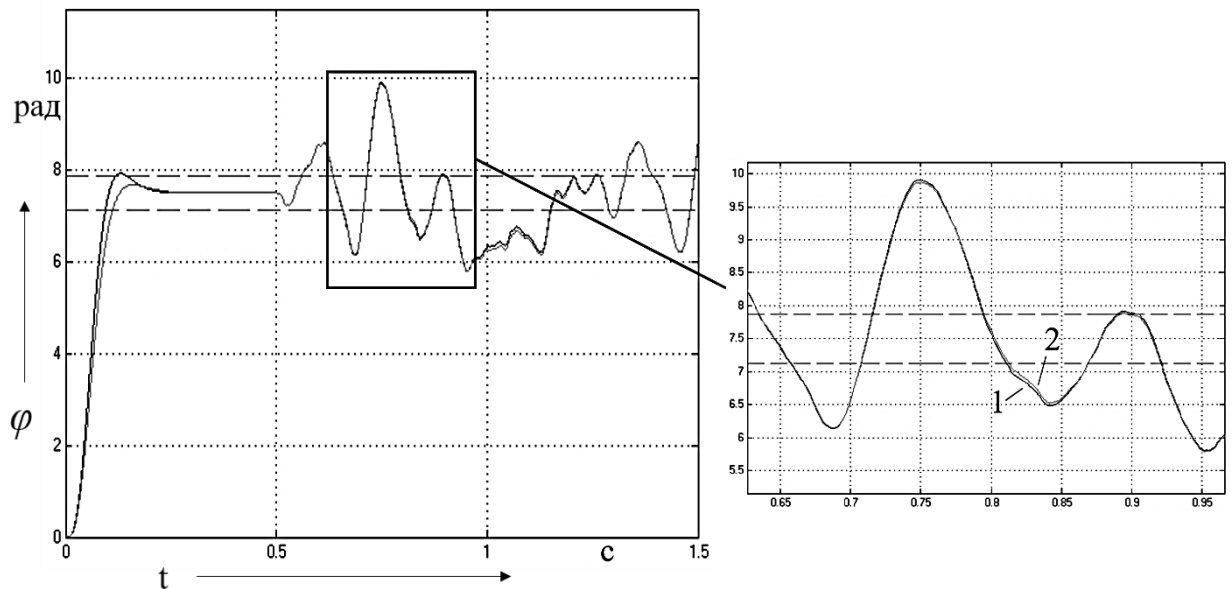
1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.46 – Реакция систем на входное воздействие $U=80 В$.

Показатели качества нечеткой системы:

- при «малых» перемещениях: время регулирования 0,1 с, перерегуливание 3,8%;
- при «средних» перемещениях: время регулирования 0,12 с, перерегуливание 2,3%;
- при «больших» перемещениях: время регулирования 0,165 с, перерегуливание 0,7%.

Реакция систем при обработке возмущающего воздействия случайного характера относительно большой величины (0,5 с) при входном сигнале равном 8 В представлена на рисунке 3.47.

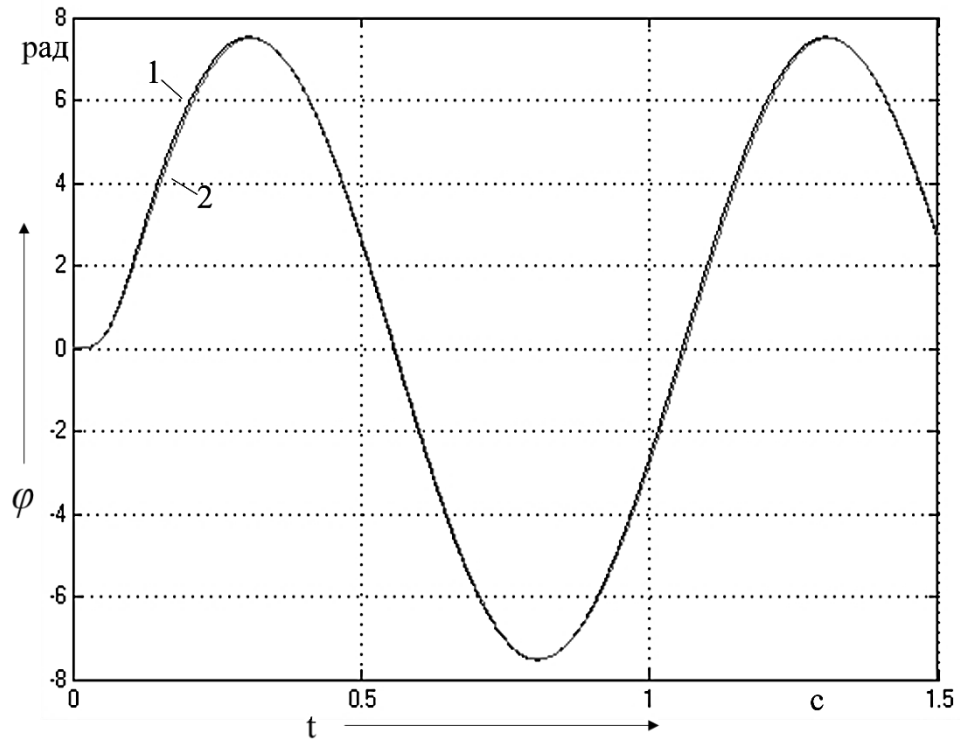


1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.47 – Реакция систем при подаче случайного сигнала как возмущающее воздействие.

Существенного отличия обработки системами в данном случае не наблюдается.

Реакция систем на синусоидальное входное воздействие с амплитудой 8 и частотой $1/2\pi$ рад/с представлена на рисунке 3.48.

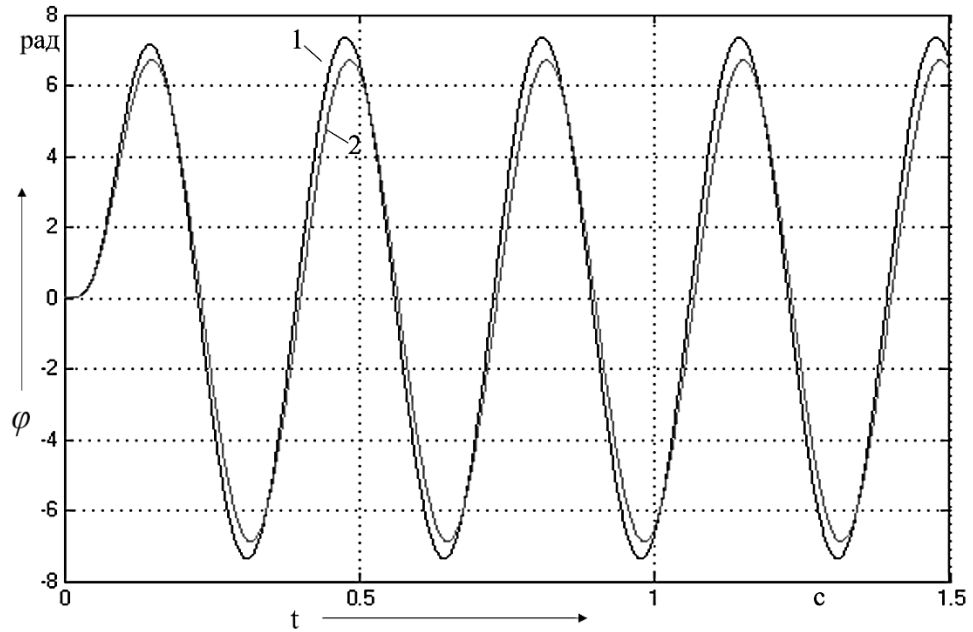


1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.48 – Реакция систем на входное синусоидальное воздействие.

При реакции системы на другой вид тестового сигнала не удастся выделить существенных преимуществ развитой интеллектуальной системы перед системой, построенной классическими методами. Обе системы обрабатывают входное синусоидальное воздействие одинаковыми показателями по точности и быстродействию.

Реакция систем при трехкратном увеличении частоты входного сигнала ($1/6\pi$) представлена на рисунке 3.49.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.49 – Реакция систем на входное воздействие.

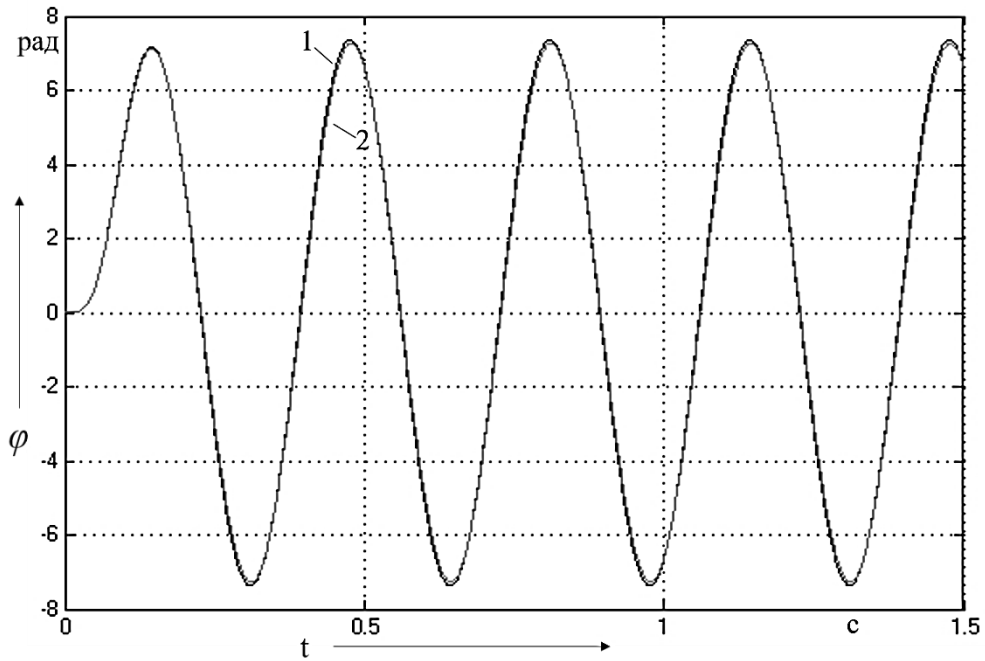
При таких условиях обработка входного синусоидального сигнала системой с нечетким регулятором будет происходить с отставанием, как по фазе, так и по амплитуде по сравнению с системой с классическим регулятором. Однако даже незначительное расширение базы правил регулятора позволяет исключить этот недостаток.

При добавлении правил:

Если «input1» есть P, то «output1» есть P, «output2» есть P, «output3» есть P;

Если «input1» есть N, то «output1» есть N, «output2» есть N, «output3» есть N;

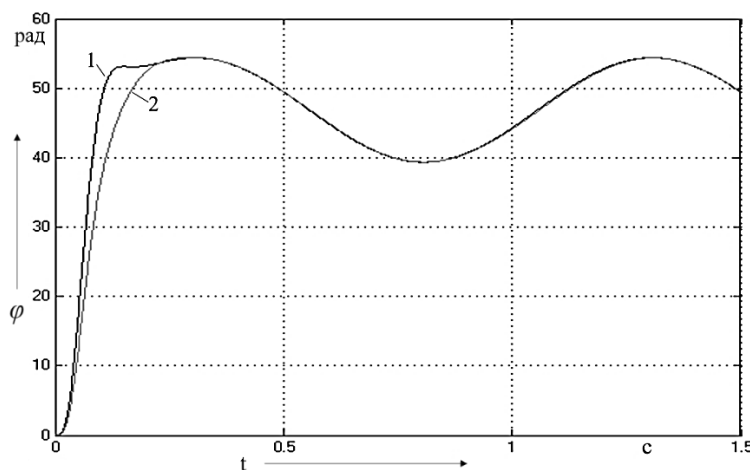
реакция нечеткой системы будет практически совпадать с классической (рис. 3.50).



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

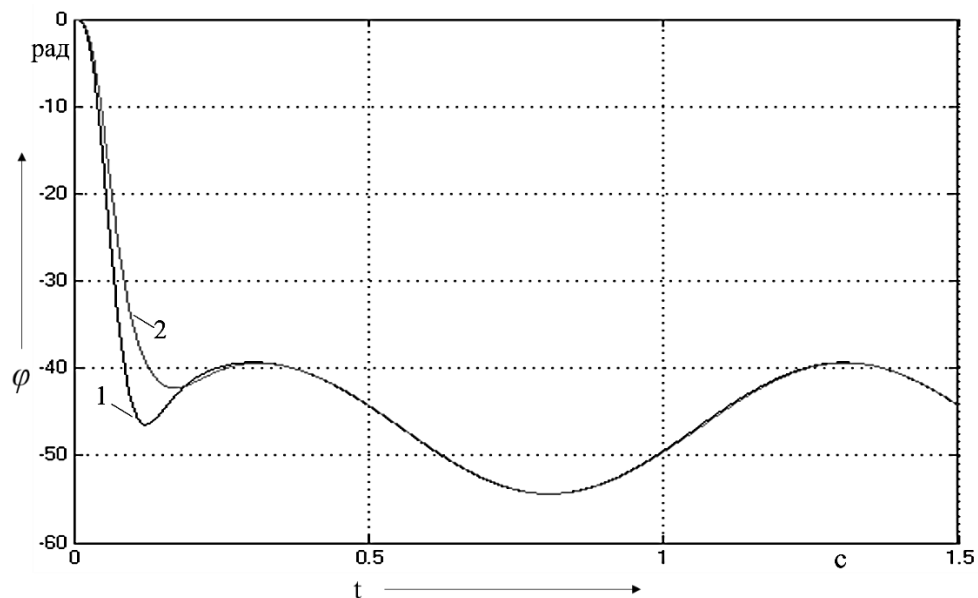
Рисунок 3.50 – Реакция систем на входное воздействие.

В случае изменения параметров задающего синусоидального сигнала, а именно при его отклонении на величину $+50$, преимущества многокаскадной нечеткой системы управления по отношению к системе с классическим регулированием становятся более заметными. Динамические характеристики систем управления при применении различных подходов представлены на рисунках 3.51, 3.52.



1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.51 – Реакция систем на входное синусоидальное воздействие со смещением вверх.



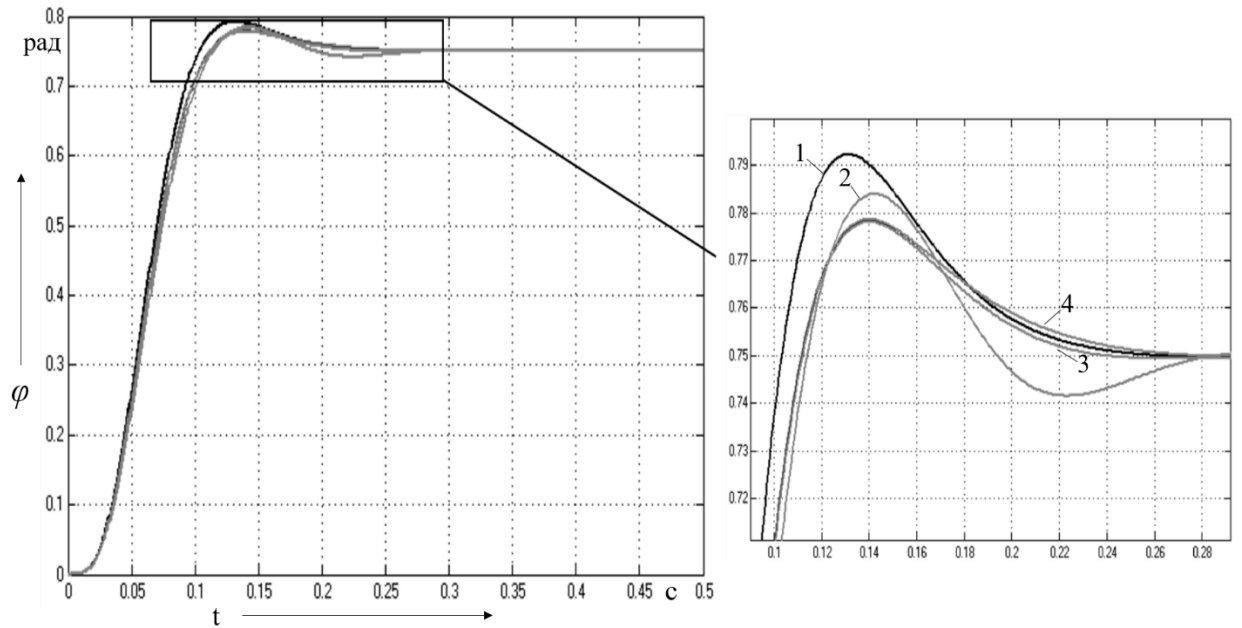
1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор.

Рисунок 3.52 – Реакция систем на входное синусоидальное воздействие со смещением вниз.

Для наглядного представления качества переходного процесса систем классического и нечеткого регулирования на рисунках 3.53 – 3.55 приведены графики, которые показывают работу трёх нечетких многокаскадных регуляторов на фоне классического, при задающем воздействии уровнем $U=0,8 В$, $U=8 В$ и $U=80 В$.

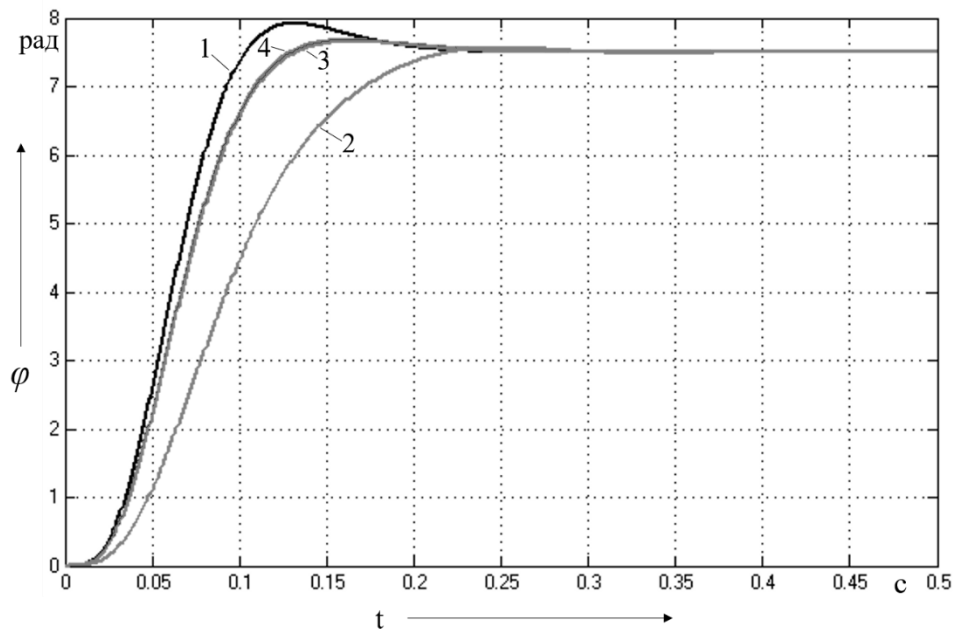
Многокаскадный нечеткий регулятор с механизмом вывода Сугено-Мамдани, содержит во внешнем каскаде интеллектуальное переключающее устройство на основе упрощенного алгоритма вывода, а во вложенном каскаде – набор элементарных интеллектуальных модулей на основе алгоритма вывода Мамдани.

На рисунках 3.53 – 3.55 представлен сравнительный анализ систем управления, использующих классический подход и различные сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода: Мамдани-Сугено, Мамдани-Мамдани, Сугено-Мамдани.



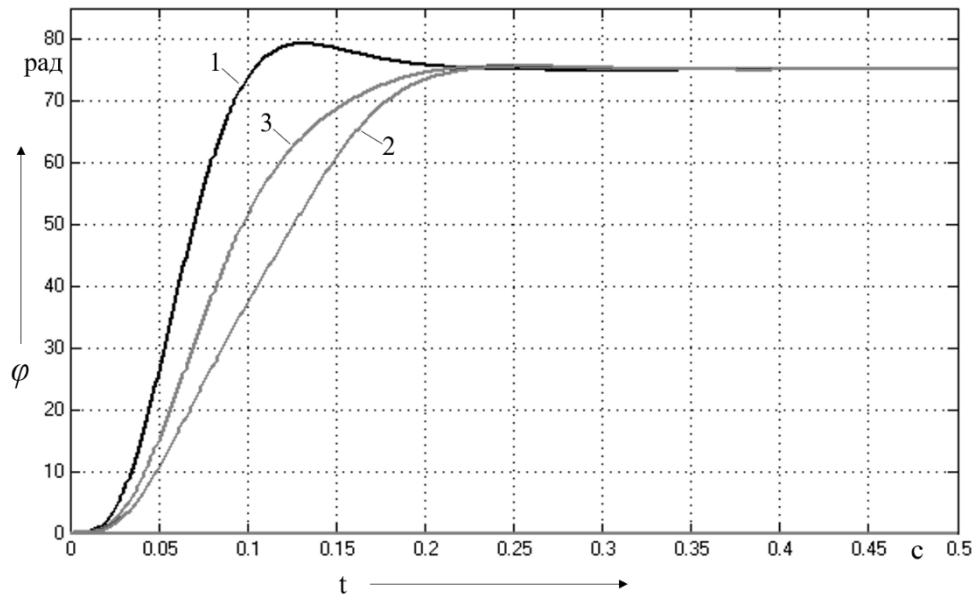
- 1 – классический регулятор; 2 – нечеткий регулятор Сугено-Мамдани; 3 – нечеткий регулятор Мамдани-Мамдани;
4 – нечеткий регулятор Мамдани-Сугено.

Рисунок 3.53 – Реакция систем на входное воздействие $U=0,8$ В.



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

Рисунок 3.54 – Реакция систем на входное воздействие $U=8$ В.



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

Рисунок 3.55 – Реакция систем на входное воздействие $U=80 \text{ В}$.

Как видно из графиков, по показателям качества регулятор Мамдани-Сугено может сравниться с регулятором Мамдани-Мамдани, но первый лучше сглаживает колебания и при «больших» перемещениях обладает большим быстродействием. Регулятор Сугено-Мамдани имеет низкое быстродействие, по сравнению с вышеупомянутыми регуляторами, и малое перерегулирование для «средних» перемещений, однако показывает высокую колебательность при «малых» и некорректную работу при «больших» перемещениях, что говорит о недостаточной настройке диапазона регулирования такого регулятора. Таким образом, наилучшим переходным процессом, наиболее подходящим по характеристикам следящим системам, обладает система с нечетким многокаскадным регулятором Мамдани-Сугено.

На основе результатов моделирования многокаскадных нечетких систем управления и с учетом анализа основных показателей качества можно определить ряд обобщенных рекомендаций:

- введение модульности и каскадности в нечеткий регулятор существенно повышает его интеллектуальные возможности и позволяет сократить алгоритмическую сложность базы знаний;

- внедрение дополнительных элементарных интеллектуальных модулей во внутренний каскад позволяет расширить диапазон регулирования заданной координаты;

- основное влияние на качество регулирования оказывают количество нечетких переменных и определенный на них вид функции принадлежности;

- уменьшение ширины терм-множества Z (нуль) во внешнем каскаде увеличивает быстродействие системы;

- расположение вершин терм-множеств P (положительное) и N (отрицательно) на диапазоне регулирования входного сигнала во внешнем каскаде влияет на перерегулирование;

- качество обработки различных возмущающих фактором зависит от полноты набора правил продукций;

- адекватность работы многокаскадного нечеткого логического регулятора напрямую зависит от выполнения требований полноты и непротиворечивости базы знаний. Настройка многокаскадного нечеткого регулятора производилась симметрично с использованием треугольных функций принадлежности. При одинаковом диапазоне регулирования, благодаря регуляторам второго каскада, нечеткая система способна вырабатывать управляющие воздействия в трёх зонах: «большие» перемещения, «средние» и «малые», которые определяются величиной входного сигнала. Успешность настройки регулятора внешнего каскада в основном определялась базой знаний и числом функций принадлежности в блоках входа/выхода, а также их распределением по диапазону изменения сигнала ошибки по положению.

Анализ работы нечеткой системы производился по результатам моделирования, где в качестве управляющего воздействия подаётся

единичный ступенчатый или синусоидальный сигнал. По сравнению с классическим нечеткое регулирование показало лучшие результаты.

Нечеткая система с регулятором Мамдани-Мамдани позволяет совершать более гибкую настройку системы, однако работа с выходными переменными сложнее по сравнению с регулятором Мамдани-Сугено. Таким образом, в результате моделирования сочетания алгоритмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани и Мамдани-Сугено демонстрируют практически одинаковые показатели переходного процесса при «малых» и «средних» значениях входного сигнала, однако при «больших» - регулятор Мамдани-Сугено превосходит по быстродействию регулятор Мамдани-Мамдани.

3.3 Нейросетевые подходы при параметрическом синтезе многокаскадных нечетких логических регуляторов

Рассмотрим применение предложенного подхода при настройке многокаскадного нечеткого логического регулятора в системе подчиненного регулирования с использованием методик автоматизированной настройки интеллектуальных систем адаптивной нейронной сетью. Процесс формирования нечеткой системы в ее классическом понимании представляет собой задачу, ориентированную на внедрение в контур управления экспертных оценок [4, 9, 16, 43]. 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 [151, 154, 156, 222, 252, 266, 270, 289]. Такие методики не лишены целого ряда недостатков – главным, в числе которых является наличие строгой и максимальной полной математической модели, получение которой зачастую не представляется возможным для сложных объектов управления технологическими процессами [66, 72, 129, 130, 146].

Покажем, что стандартный алгоритм настройки нечеткого логического регулятора адаптивной нейронной [240-244, 305] сетью может быть применен и к синтезу предложенных нечетких многокаскадных систем управления для регуляторов вложенного каскада. Огромный класс объектов управления технологическими процессами в своей структуре содержат регулируемый электропривод постоянного или переменного тока, на который возлагается реализация силовой управляющей функции. Системы управления такими технологическими процессами, как правило, выполняются по принципу подчиненного регулирования [3, 70, 94]. При этом внутренние контуры регулирования системы реализуют таким образом, чтобы обеспечить требуемые статические и динамические показатели

регулируемого электропривода, а внешний контур обеспечивает регулирование технологического параметра. Ниже приведена структурная схема ОУ с многокаскадной нечеткой системой управления (рис. 3.56).

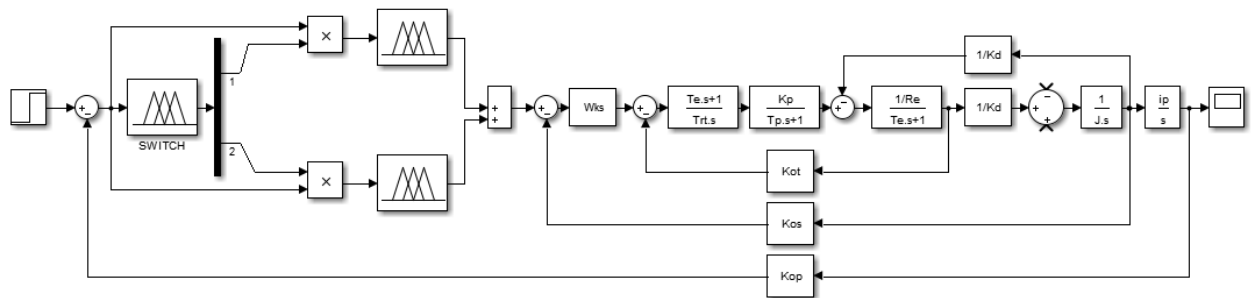


Рисунок 3.56 – Структурная схема ОУ с многокаскадной нечеткой системой управления.

Предлагается произвести замену классического регулятора внешнего контура регулирования на многокаскадную нечеткую систему, которая состоит из переключающего устройства во внешнем каскаде и двух НЛР с различной настройкой во внутреннем.

Реализация нечеткого регулятора по каскадному принципу дает возможность модулю внешнего каскада интеллектуально совмещать различные настройки системы управления, в том числе с учетом сочетания различных условий, взаимосвязи координат, и особенно, многокритериальности технологического объекта, совмещая при этом достоинства настроек симметричного и модульного оптимумов [23, 50, 65, 107, 136, 144]. Функциональная схема МНСУ представлена ниже (рис. 3.57).

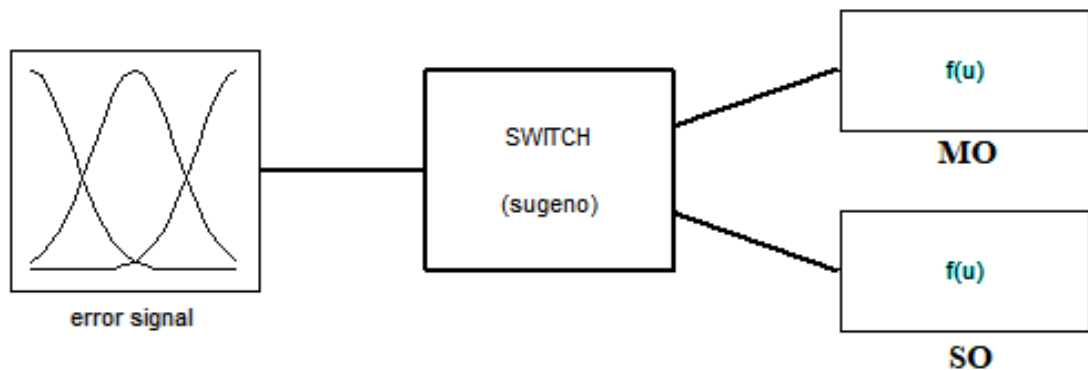


Рисунок 3.57 – Функциональная схема НЛР – SWITCH.

Интеллектуальное переключающее устройство, построенное на основе нечеткого логического регулятора, с упрощенным механизмом вывода, имеет на своем входе одну лингвистическую переменную, описывающую состояние ошибки системы управления. Выход внешнего каскада выполнен с применением двух информационных выходов, соответствующих различные критерии регулирования. Целевой задачей функционирования внешнего каскада развитой нечеткой системы является интеллектуальная оценка состояния ошибки системы и выбор соответствующего управляющего воздействия на внутренний каскад регуляторов [10, 87, 162, 347].

Лингвистическая переменная, описывающая понятие «сигнал ошибки системы», формализует единственный информационный вход системы в диапазоне регулирования $[-10; 10]$.

Базовое терм-множество лингвистической переменной содержит набор из двух нечетких переменных $T = \{small, big\}$, соответствующих понятиям *small* – «малое отрицательное значение ошибки»; *big* – «большое положительное значение ошибки». Область определения базового терм-множества лингвистической переменной включает в себя две нечетких функции принадлежности трапецевидного вида (рис. 3.58).

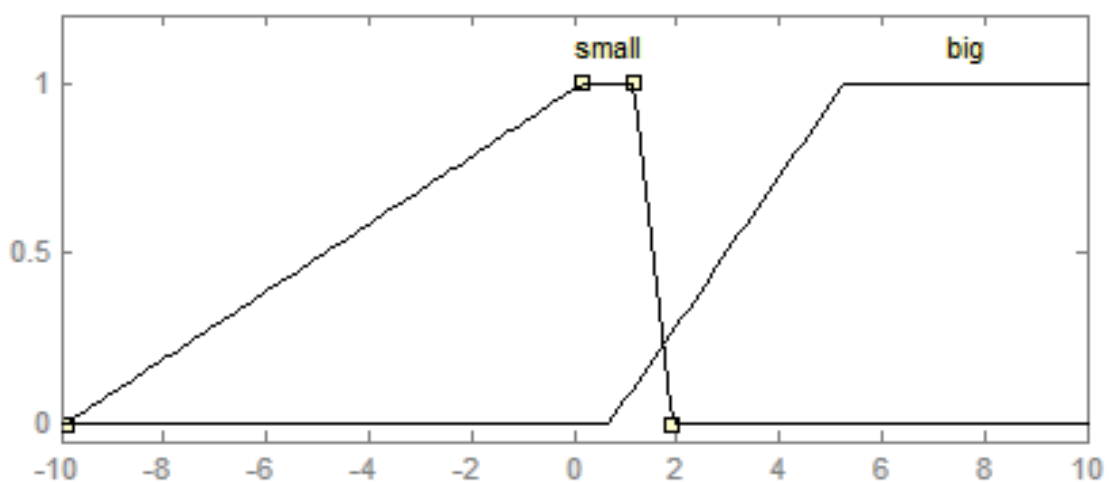


Рисунок 3.58 – Распределение функций принадлежности лингвистической переменной «proportional».

Понятия “МО” и “СО” представляют собой лингвистические переменные с набором констант [0;1] и описывают состояние выходных каналов внутреннего каскада нечеткого регулятора.

База знаний, как основной компонент механизма нечеткого вывода, реализуется в виде классического набора правил продукций. Учитывая, что основная функция нечеткого регулятора внутреннего каскада это классификация входных сигналов и подключение вложенных модулей получим следующий перечень:

Если («error signal» есть big), то (MO = 1) и (SO = 0);

Если («error signal» есть small), то (MO = 0) и (SO = 1);

Ниже показана функциональная схема внутреннего каскада нечеткого логического регулятора с основными блоками, на которой можно наглядно увидеть этапы фаззификации, работы базы правил и дефаззификации (рис. 3.59), а также приведена структурная схема многокаскадной нечеткой системы управления (рис. 3.60).

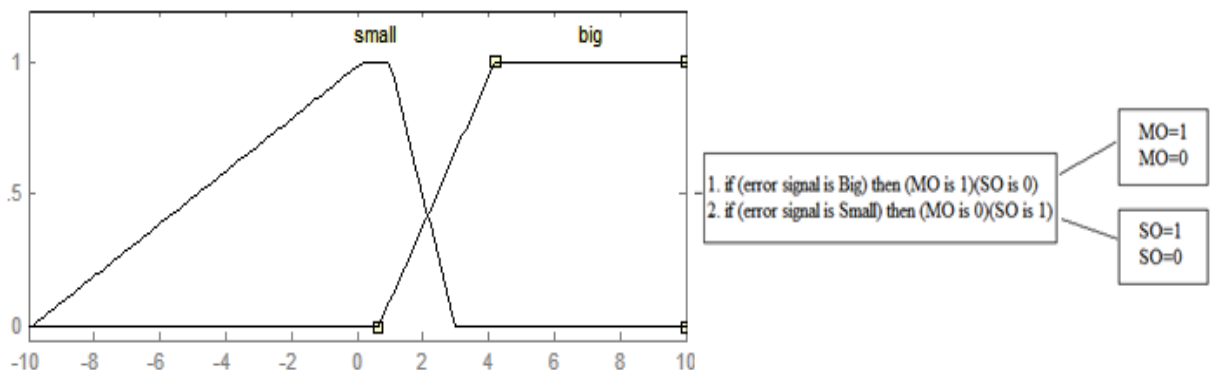


Рисунок 3.59 – Функциональная схема НЛР – SWITCH.

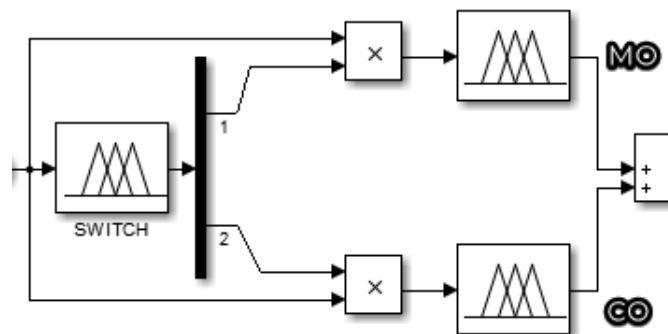


Рисунок 3.60 – Структурная схема МНЛР.

После настройки регулятора внешнего контура МНСУ, необходимо получить выборку обучающих данных для настройки НЛР. Производится съем данных с классического регулятора внешнего контура регулирования настроенного на модульный и симметричный оптимумы (рис. 3.61).

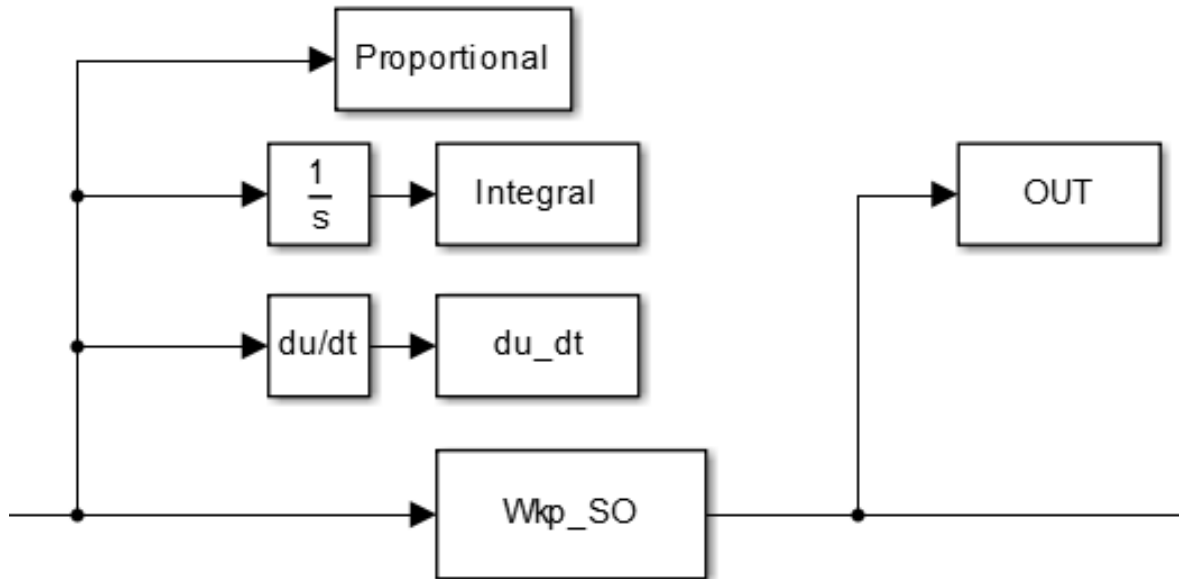


Рисунок 3.61 – Функциональная схема отражающая, процесс получения данных для обучающей выборки.

Полученные данные загружаются в адаптивную нейронную сеть (ANFIS), с применением которой и будет производиться настройка НЛР [154, 266, 270, 289]. Используя заданный набор входных / выходных данных, функция набора инструментов `anfis` создает систему нечеткого вывода, параметры функции членства которой настраиваются (корректируются), используя либо алгоритм обратного распространения, либо в сочетании с методом наименьших квадратов (рис. 3.62).

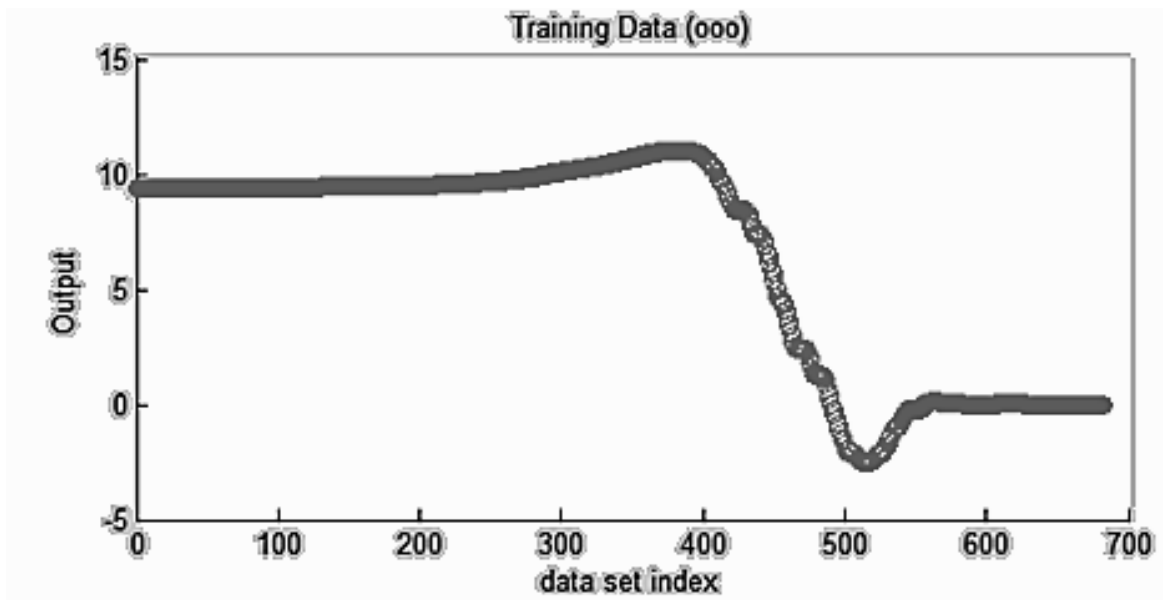


Рисунок 3.62 – Отображение полученных данных в окне редактора ANFIS.

Если рассматривать ANFIS как метод идентификации параметров, то её можно представить в виде адаптивной сети, которая подражает работе классической FIS и способна использовать методы, применяемые к обучению нейронных сетей [26, 33, 47, 258, 280, 298].

Для примера, адаптивную нейронную сеть можно представить в виде пяти слоев, как показано в [184, 242]:

- первый слой отвечает за вычисление значений функций принадлежности каждого из входов ANFIS, параметры которых подлежат последующей идентификации;

- второй слой реализует операцию логического умножения "И" через различные T – нормы. В нашем примере в пакете Fuzzy Logic Toolbox применяется алгебраическое произведение, результатом которого являются уровни активации для каждого правила;

- третий слой отвечает за вычисление нормализованных значений уровней активации. То есть, значение уровня активации, которое было получено на предыдущем слое, делится на сумму всех значений уровня активации;

– собственно четвертый слой реализует модель нечеткого логического вывода по Сугено, в котором результат из предыдущего слоя умножается на значение вычисления линейной функции, аргументами для которой служат значения на входах ANFIS.

– пятый слой отвечает за вычисление конечных значений на выходе ANFIS, суммируя результаты предыдущего слоя.

Что касается метода обучения ANFIS, то в Fuzzy Toolbox реализован как классический метод обратного распространения ошибки (по сути, обычный градиентный метод), так и гибридный вариант, учитывающий то, что ряд параметров ANFIS линейны.

Выбранный метод извлечения правил сначала использует функцию вычитающей кластеризации для определения количества правил и функций принадлежности к антецедентам, а затем использует линейную оценку наименьших квадратов для определения последующих уравнений каждого правила. Эта функция возвращает структуру “FIS”, которая содержит набор нечетких правил для покрытия пространства объектов. После генерации нечеткой логической системы, получаем её структуру, представленную ниже (рис. 3.63).

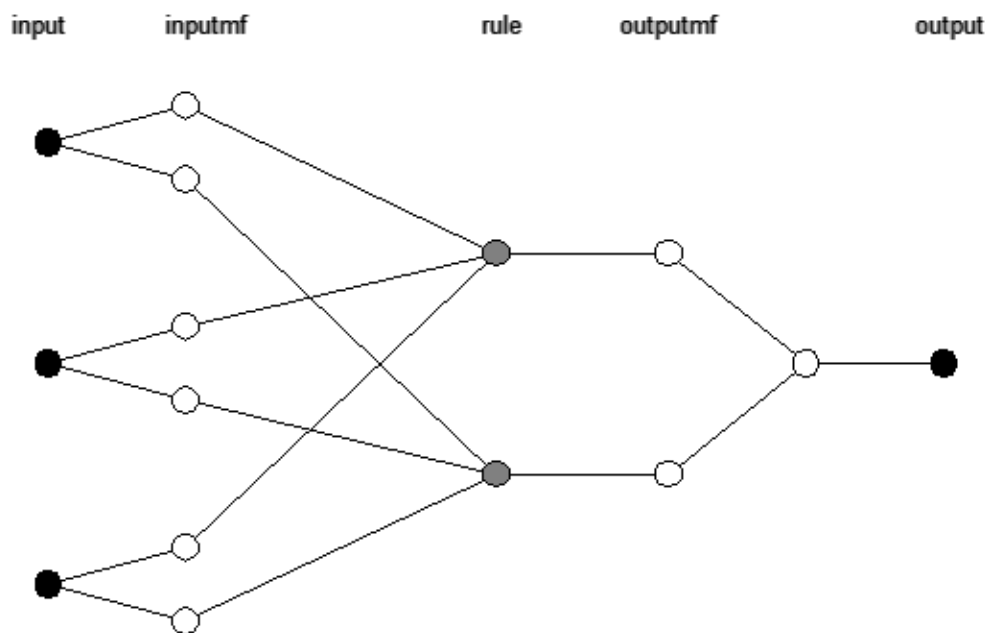


Рисунок 3.63 – Структура нечеткого логического регулятора “SO”.

Далее осуществляется этап обучения одним из двух методов: метода обратного распространения ошибки и гибридного. В ходе экспериментов было выявлено, что наилучшие результаты обучения, а именно наименьшая ошибка соответствия модели, получаются при использовании обоих методов. Увеличение количества итераций обучения также уменьшает ошибку.

После завершения процесса обучения можно посмотреть настройки основных параметров полученной нечеткой системы.

Состав нечеткого логического регулятора “SO”, настроенного с применением адаптивной нейронной сети:

- три входных канала, которые представлены лингвистическими переменными: *proportional* – сигнал пропорциональный сигналу ошибки по положению; *integral* – интеграл сигнала ошибки по положению; *du/dt* – производная сигнала ошибки по положению;
- множество управляющих правил (база знаний регулятора);
- один выходной канал, формализующийся одной лингвистической переменной *out1*.

В основе функционального назначения данной структуры является формирование результирующего сигнала управления на последующий контур подчиненного регулирования, а именно контур скорости двигателя постоянного тока.

Первый входной канал нечеткого логического регулятора представлен лингвистической переменной «*proportional*», которая формализует понятия первого входного сигнала. Диапазон области определения $[-5.088, 10]$.

Терм-множество – T лингвистической переменной – является набором следующих элементов: $T = \{small, big\}$, где *small* – малое отрицательное значение; *big* – большое положительное значение.

Область определения терм-множества лингвистической переменной включает в себя две нечетких функции принадлежности гауссового вида (рис. 3.64).

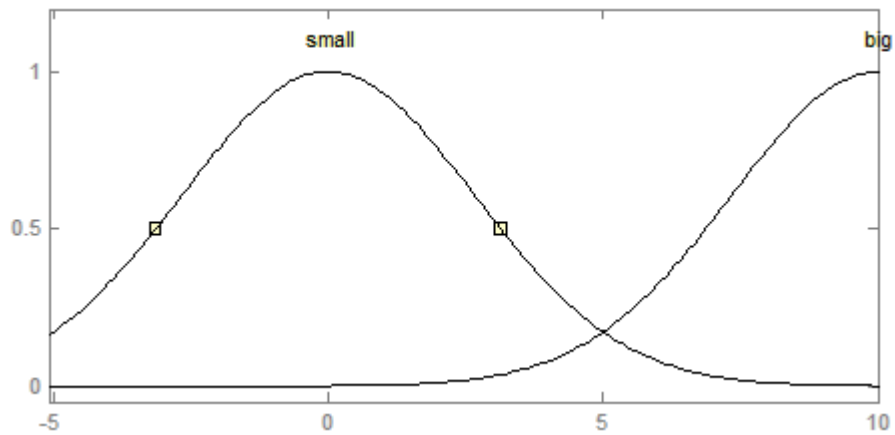


Рисунок 3.64 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «*proportional*».

За работу второго канала отвечает лингвистическая переменная «*integral*», которая формализует понятия второго входного сигнала нечеткого логического регулятора. Область определения задана диапазоном $[-0,004643; 0,07631]$.

Терм-множество лингвистической переменной «*integral*» описывается двумя нечеткими переменными, формирующими понятия *vsmall* – «малое отрицательное значение»; *small* – «малое положительное значение» с функции принадлежности гауссового вида (рис. 3.65).

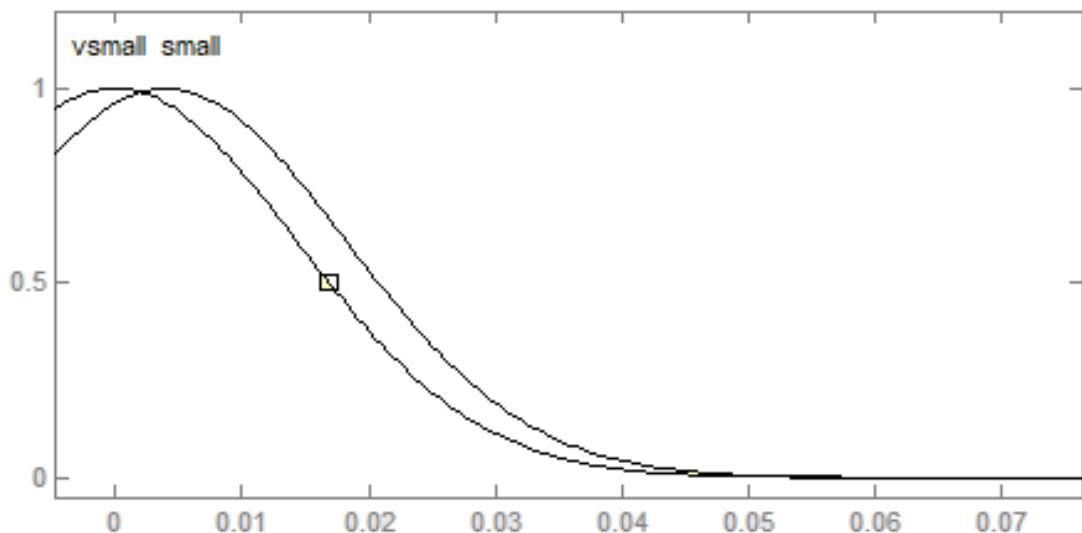


Рисунок 3.65 – Распределение функции принадлежности лингвистической переменной «*integral*».

На входе третьего канала нечеткого логического регулятора “SO” представлена лингвистическая переменная « du/dt », которая формализует понятия третьего входного сигнала НЛР. Диапазон области определения [-1475; 342].

Терм-множество – T лингвистической переменной – является набором следующих элементов: $T = \{big, big\}$, где big – нулевое значение.

Терм-множество лингвистической переменной « du/dt » задано на области определения (рис. 3.66) и включает в себя две нечетких функции принадлежности гауссового вида.

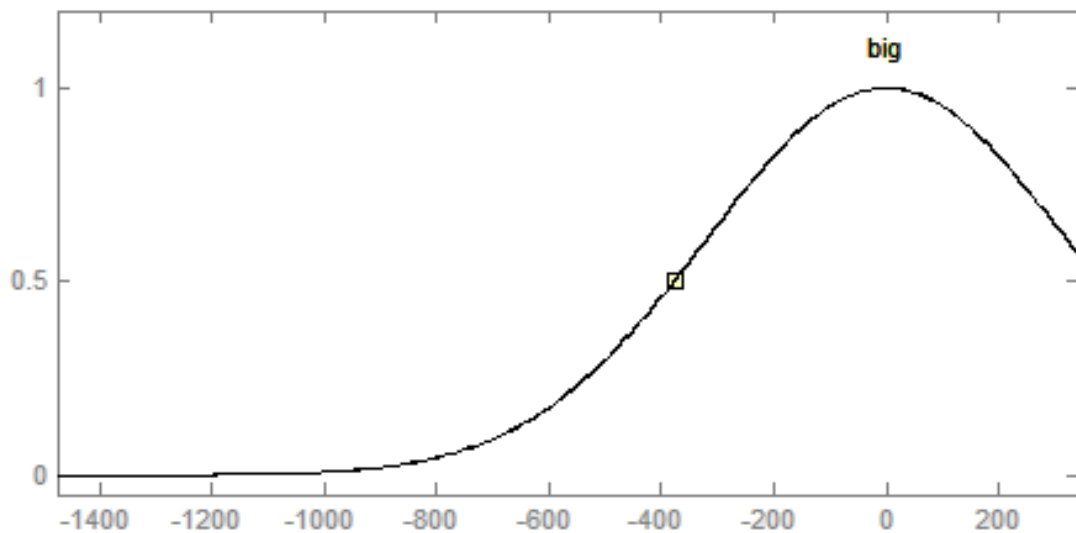


Рисунок 3.66 – Размещение нечетких термов лингвистической переменной « du/dt ».

Функционирование выхода НЛР обеспечивает лингвистическая переменная « $out1$ », формализующая понятия выходного сигнала, а именно управления по положению. Терм-множество – T лингвистической переменной – является набором следующих элементов: $T = \{a, b\}$, названия переменных лингвистической переменной « $out1$ ». Набор постоянных коэффициентов, определяющих параметры полиномов синглет, имеют вид: $a = [0,9408; 58,8; -1,651e-07; 0.0003461]$; $b = [0,9407; 58,79; -8,223e-07; 5,245e-06]$.

База знаний, как основной компонент механизма нечеткого вывода, реализуется в виде классического набора правил продукций. Получим следующий перечень для пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих сигнала управления:

Если («proportional» есть small) и («integral» есть vsmall) и («du/dt» есть big), то («out1» есть b);

Если («proportional» есть big) и («integral» есть small) и («du/dt» есть big), то («out1» есть a).

Ниже будет приведена функциональная схема НЛР, который был синтезирован с помощью адаптивной нейронной сети, на основе обучающих данных классического регулятора (рис. 3.67).

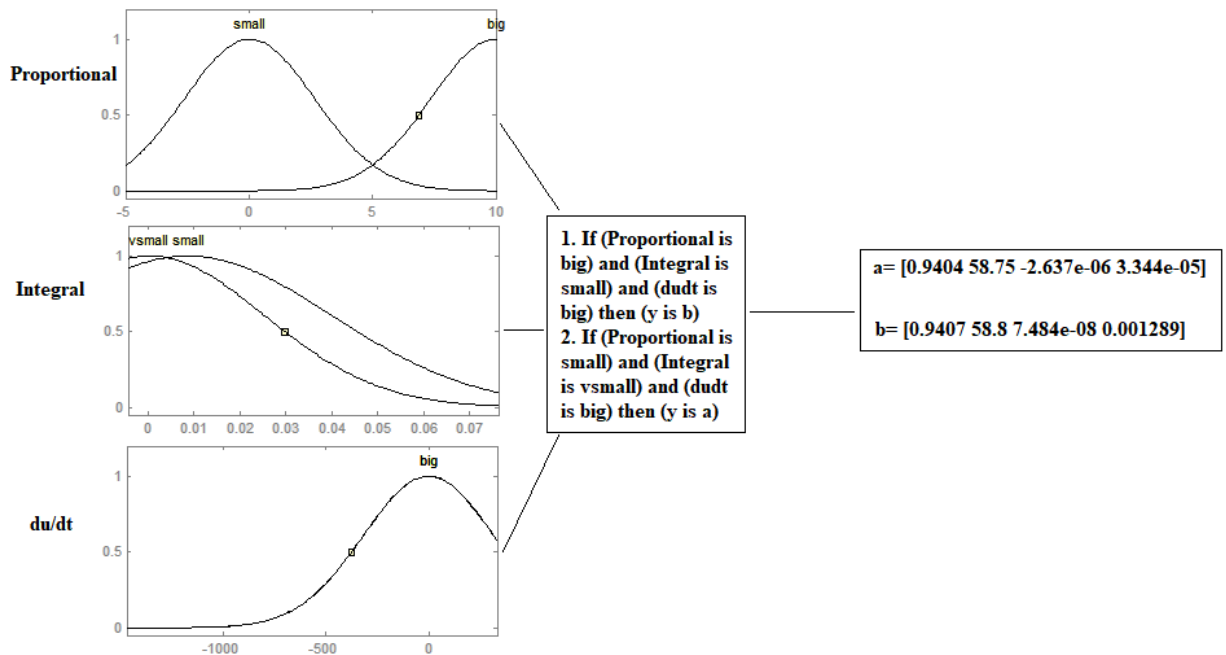


Рисунок 3.67 – Функциональная схема НЛР, настроенного с помощью адаптивной нейронной сети.

Для того чтобы показать различные методы генерации FIS в случае синтеза второго регулятора внутреннего каскада МНСУ, воспользуемся генерацией нечеткого системного объекта логического вывода из набора данных - методом grid partition.

Отображение зависимости входных и выходных величин, классического регулятора, настроенного на модульный оптимум, представлено на рисунке 3.68.

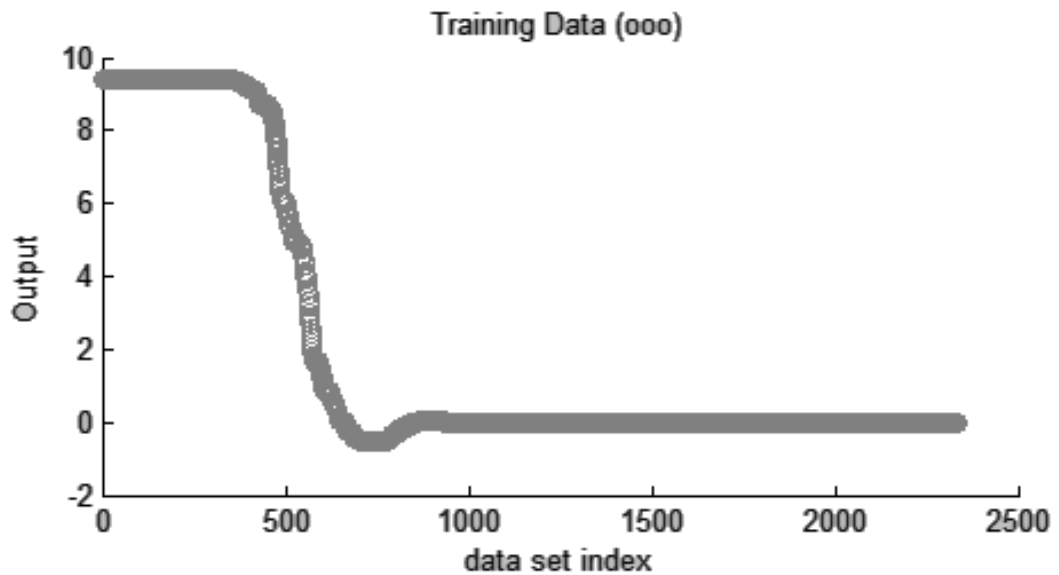


Рисунок 3.68 – Отображение полученных данных в окне редактора ANFIS.

С учетом всего сказанного выше, ANFIS позволяет вывести структуру сгенерированного регулятора и увидеть связи входных терм каждого канала с правилами и выходными термами (рис. 3.69).

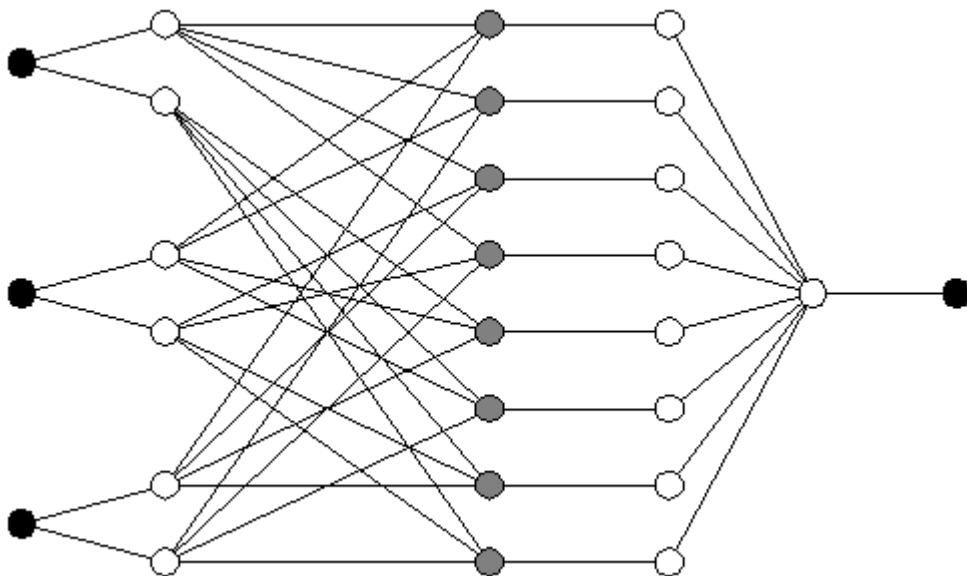


Рисунок 3.69 – Структура нечеткого логического регулятора “МО”.

После завершения процесса обучения и по достижении заданной точности получим следующие настройки основных параметров нечеткой системы. Состав нечеткого логического регулятора “МО”, настроенного с применением адаптивной нейронной сети:

- три входных канала, которые представлены лингвистическими переменными: *proportional* – сигнал пропорциональный сигналу ошибки по положению; *integral* – интеграл сигнала ошибки по положению; *du/dt* – производная сигнала ошибки по положению;
- множество управляющих правил (база знаний регулятора);
- один выходной канал, формализующийся одной лингвистической переменной *out1*.

В основе функционального назначения данной структуры является формирование результирующего сигнала управления на последующий контур подчиненного регулирования, а именно контур скорости двигателя постоянного тока.

Первый входной канал нечеткого логического регулятора представлен лингвистической переменной «*proportional*», которая формализует понятия первого входного сигнала. Диапазон области определения $[-0,5741; 10]$.

Терм-множество – T лингвистической переменной является набором следующих элементов: $T = \{small, big\}$, где *small* – малое положительное значение; *big* – большое положительное значение.

Область определения терм-множества лингвистической переменной включает в себя две нечетких функции принадлежности гауссового вида (рис. 3.70).

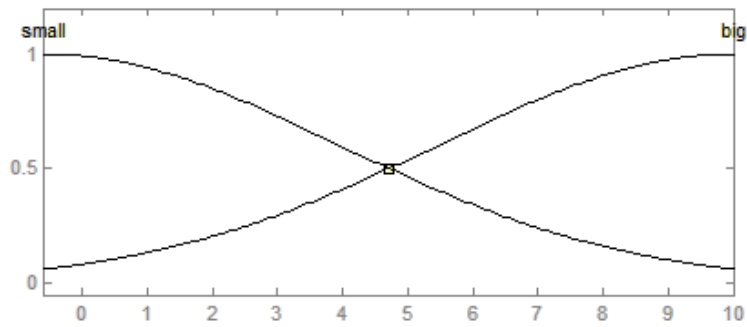


Рисунок 3.70 – Размещение нечетких термов лингвистической переменной «*proportional*».

За работу второго канала отвечает лингвистическая переменная «*integral*», которая формализует понятия второго входного сигнала нечеткого логического регулятора. Диапазон области определения [0; 0,08402].

Терм-множество – T лингвистической переменной является набором следующих элементов: $T = \{small, big\}$, где *small* – малое положительное значение; *big* – большое положительное значение.

Область определения терм-множества лингвистической переменной включает в себя две нечетких функции принадлежности гауссового вида (рис. 3.71).

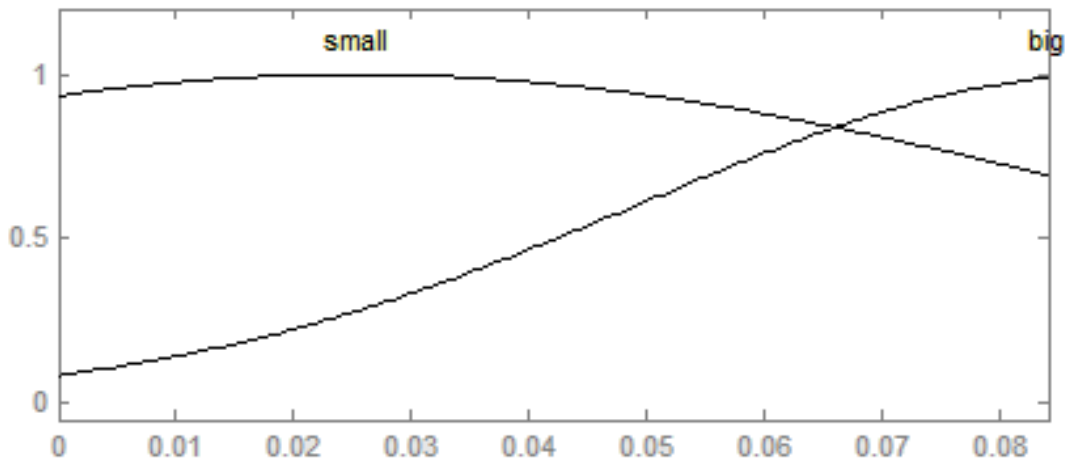


Рисунок 3.71 – Размещение нечетких термов лингвистической переменной «*integral*».

На входе третьего канала нечеткого логического регулятора “SO” представлена лингвистическая переменная «*du/dt*», которая формализует

понятия третьего входного сигнала НЛР. Диапазон области определения $[-1165; 83,6]$.

Терм-множество – T лингвистической переменной является набором следующих элементов: $= \{small, big\}$, где $small$ – большое отрицательное значение; где big – малое положительное значение.

Область определения терм-множества лингвистической переменной включает в себя две нечетких функции принадлежности гауссового вида (рис. 3.72).

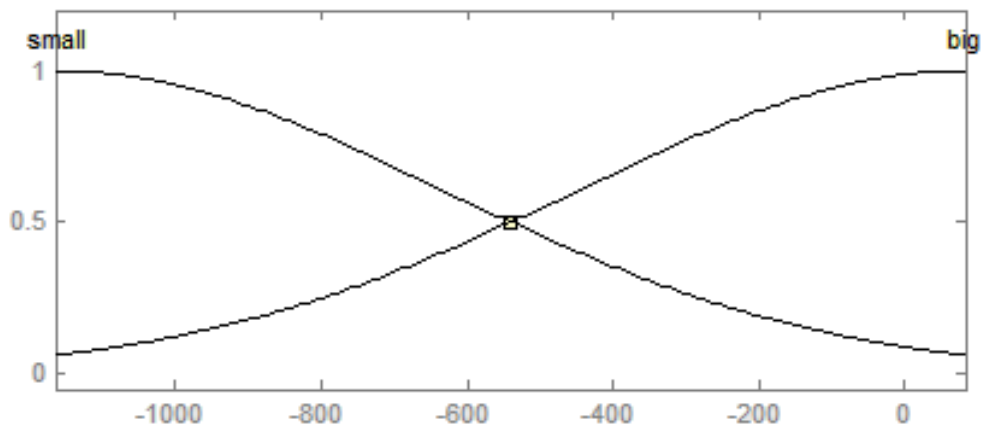


Рисунок 3.72 – Размещение нечетких термов лингвистической переменной « du/dt ».

Функционирование выхода НЛР обеспечивает лингвистическая переменная $out1$, формализующая понятия выходного сигнала, а именно управления по положению. Параметры полиномов синглет имеют следующие значения:

$$a = [0,8222; -0,001463; -9,318e-06; -0,008637];$$

$$b = [0,9092; -0,001088; 9,124e-06; 0,0009934];$$

$$c = [1,007; -0,003122; -1,215e-05; -0,0305];$$

$$d = [0,9552; -0,001918; -1,127e-05; -0,02191];$$

$$e = [0,9313; 0,01087; -0,0001541; 0,1507];$$

$$f = [0,9284; 0,00502; -1,34e-06; 0,1454];$$

$$g = [0,906; 0,01059; 5,677e-05; 0,1621];$$

$$h = [0,9254; 0,0107; -5,558e-06; 0,1582].$$

Механизм вывода нечеткого логического регулятора основан на некотором наборе правил продукций, который с учетом решаемой задачи будет определяться перечнем следующего вида:

Если («proportional» есть small) и («integral» есть small) и («du/dt» есть small), то («out» есть a);

Если («proportional» есть small) и («integral» есть small) и («du/dt» есть big), то («out» есть b);

Если («proportional» есть small) и («integral» есть big) и («du/dt» есть small), то («out» есть c);

Если («proportional» есть small) и («integral» есть big) и («du/dt» есть big), то («out» есть d);

Если («proportional» есть big) и («integral» есть small) и («du/dt» есть small), то («out» есть e);

Если («proportional» есть big) и («integral» есть small) и («du/dt» есть big), то («out» есть f);

Если («proportional» есть big) и («integral» есть big) и («du/dt» есть small), то («out» есть g);

Если («proportional» есть big) и («integral» есть big) и («du/dt» есть big), то («out» есть h).

Ниже представлена полная функциональная схема НЛР, в которой отображены диапазоны распределения входных терм лингвистических переменных входных каналов, база правил и вывод регулятора (рис. 3.73).

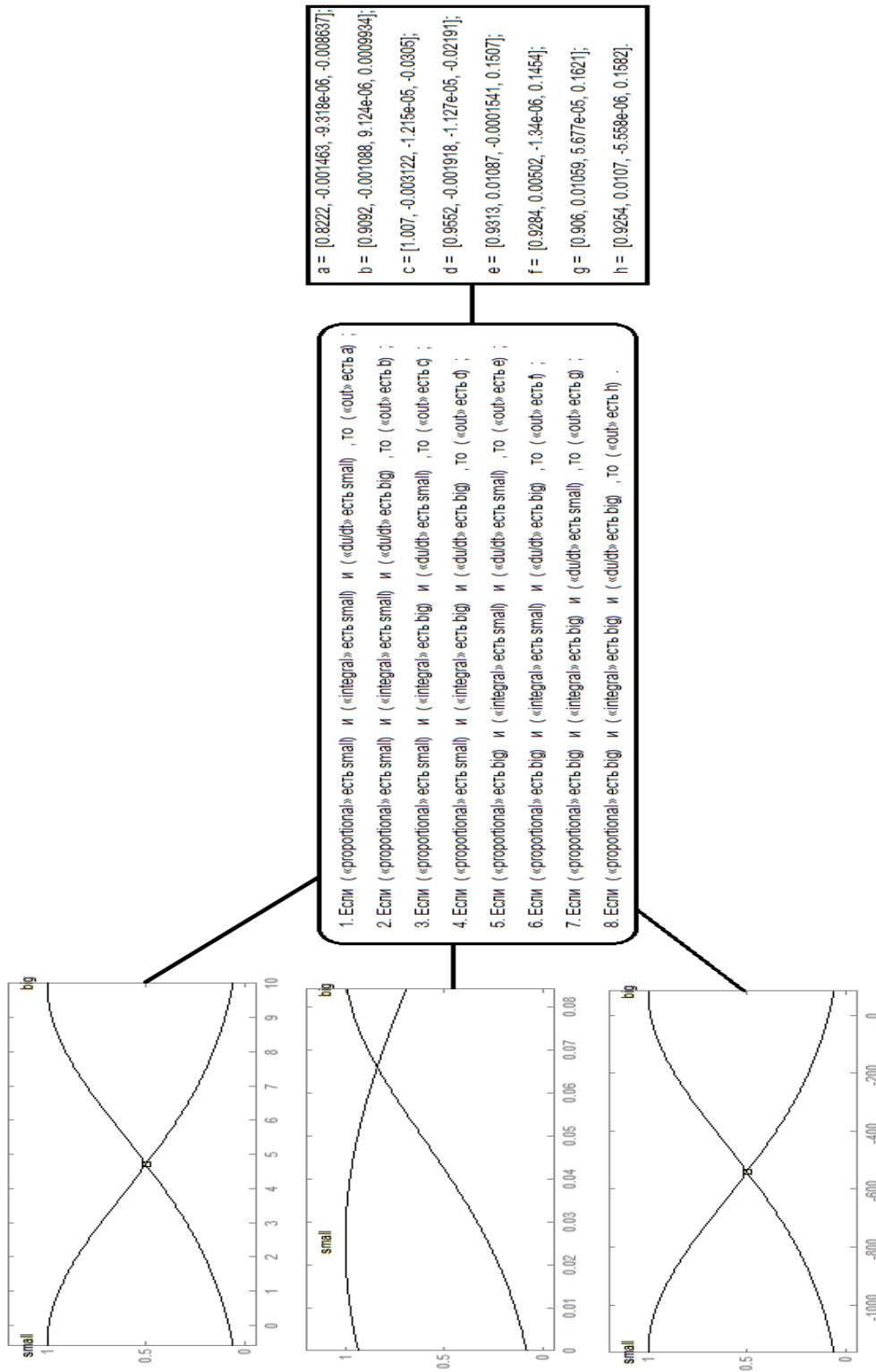


Рисунок 3.73 – Функциональная схема НЛР “МО” настроенного с помощью адаптивной нейронной сети.

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. 3.74).

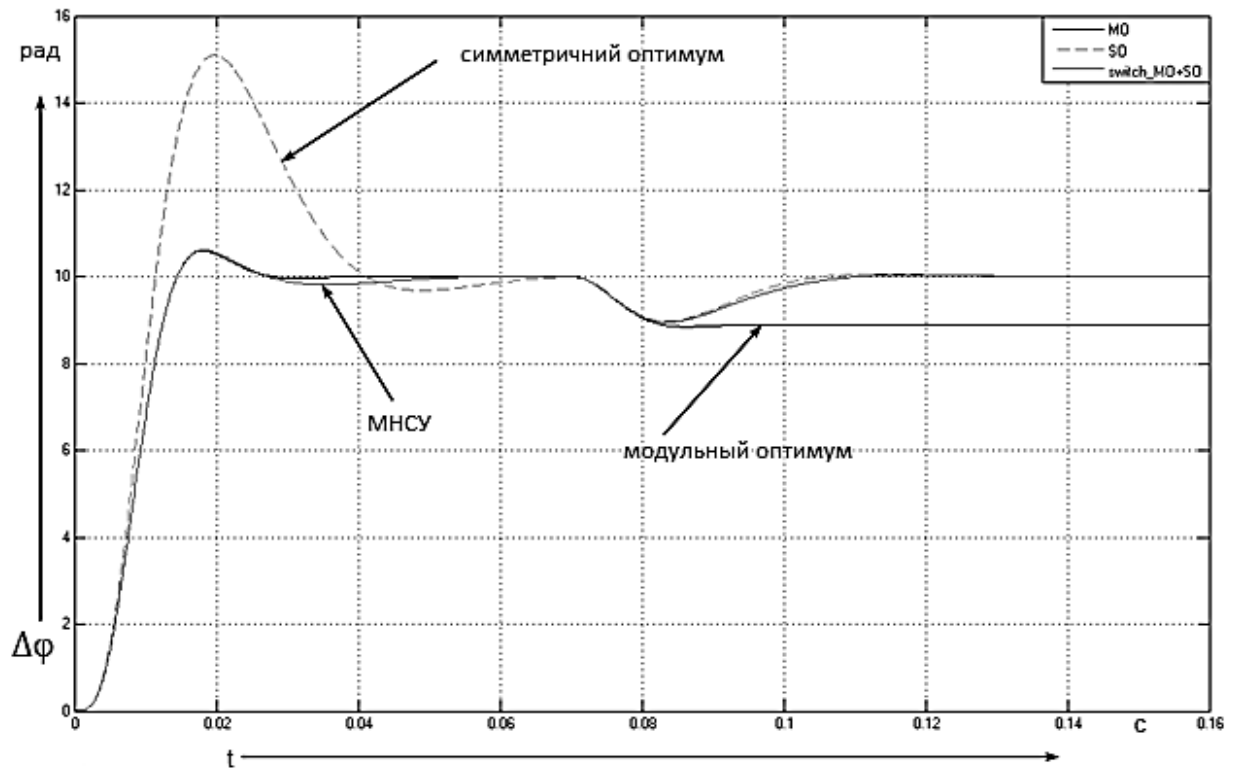


Рисунок 3.74 – График переходного процесса системы при подаче сигнала задания и возмущающего воздействия.

По результатам моделирования, полученным на рисунке 3.74 можно сделать вывод, что применение принципа вложенности каскадов при построении нечеткого логического регулятора в системе управления технологическим процессом 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. 3.75).

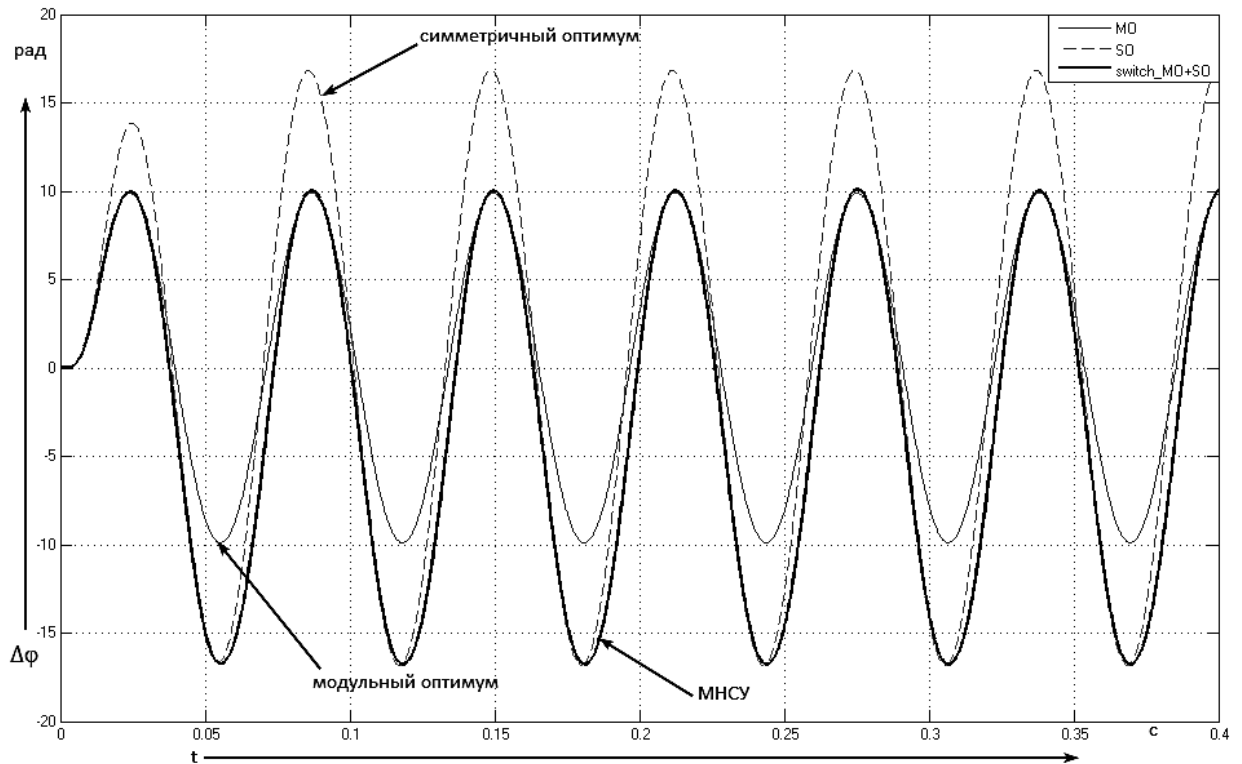


Рисунок 3.75 – Реакция системы управления с МНЛР на задающий сигнал синусоидальной формы.

Анализ результатов моделирования (рис. 3.75) наглядно демонстрирует, что НЛР внешнего каскада реализует функцию интеллектуального приключения в МНСУ и выполняет закон управления с настройкой на модульный оптимум при верхнем пороге ошибки по положению, в противоположном случае осуществляется переключение на модуль, настроенный на симметричный оптимум. Принятие решения по переключению каналов и плавность переключения достигается за счёт зоны пересечения функций принадлежности двух нечетких переменных. Ниже представлено отображение работы базы правил переключающего устройства при различных значениях ошибки по положению (рис. 3.76-3.79).

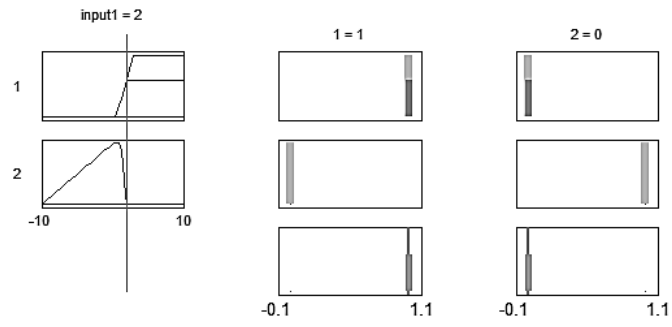


Рисунок 3.76 – Отображение работы базы правил переключающего устройства.

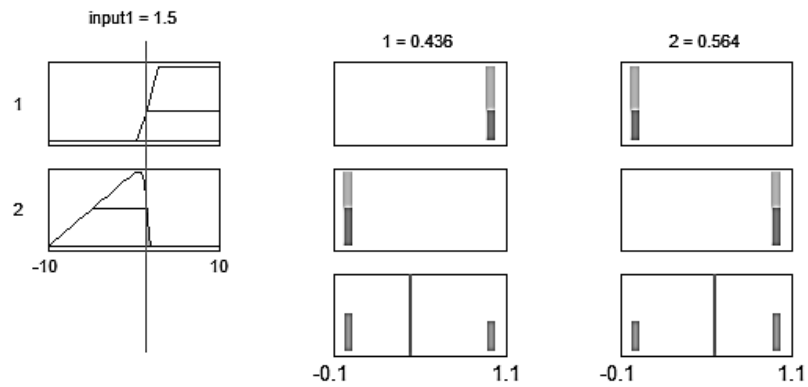


Рисунок 3.77 – Отображение работы базы правил переключающего устройства.

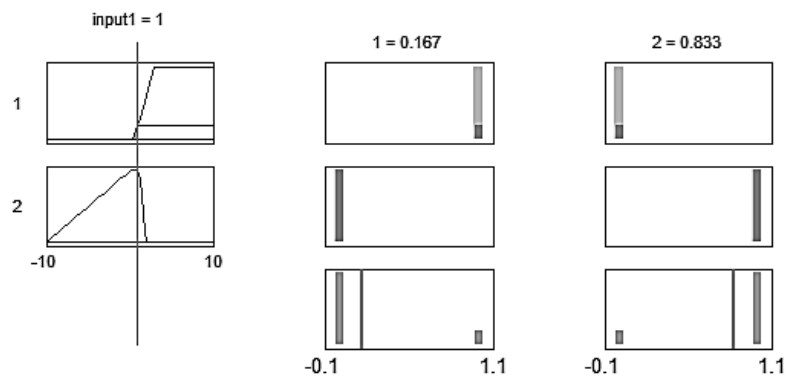


Рисунок 3.78 – Отображение работы базы правил переключающего устройства

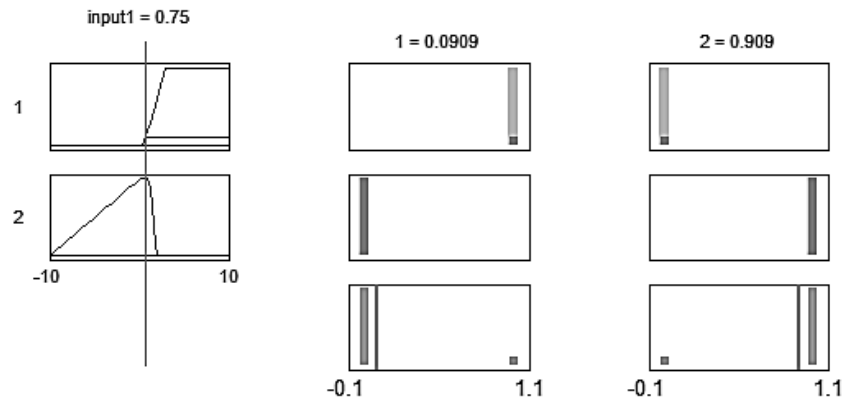


Рисунок 3.79 – Отображение работы базы правил переключающего устройства

Как можно заметить по отображению выходных величин на первом и втором выходном каналах, значения плавно изменяются в зависимости от величины входного значения ошибки, тем самым удается избежать резкого переключения и получить плавный переходный процесс.

Помимо этого, эксперту предоставляется возможность тонко настроить зону сопряжения терм лингвистических переменных, варьируя наклон боковых сторон трапецевидных терм относительно друг друга, добиваясь нужного результата.

Для оценки работоспособности предлагаемой адаптации параметров нечеткого регулятора проанализируем результаты моделирования системы при вариации значения коэффициента передачи управляемого преобразователя электропривода. Для удобства представления все данные будут отображены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Зависимость времени переходного процесса от величины коэффициента передачи управляемого тиристорного преобразователя.

Кр, %	Время переходного процесса, с		
	Симметричный оптимум	Модульный оптимум	МНСУ
50	0,0983	0,0732	0,0896
55	0,0682	0,0574	0,0642
60	0,0526	0,0454	0,0596
65	0,0312	0,034	0,038
70	0,0326	0,0326	0,0368
75	0,0341	0,0301	0,0355
80	0,0354	0,0219	0,0337
85	0,0365	0,0216	0,0217

90	0,037	0,0212	0,0214
95	0,0375	0,0207	0,0212
100	0,0377	0,0204	0,0209
105	0,0379	0,0192	0,0204
110	0,0386	0,0137	0,0137
115	0,0384	0,0139	0,0139
120	0,0384	0,014	0,014
125	0,0385	0,0142	0,0142
130	0,0388	0,0144	0,0144
135	0,0388	0,0145	0,0145
140	0,0389	0,0147	0,0147
145	0,0392	0,0148	0,0148
150	0,0392	0,0149	0,0149

На основе полученных результатов моделирования построим диаграмму отражающую влияние нестационарности коэффициента усиления тиристорного преобразователя на быстродействие интеллектуальной системы управления технологическим процессом (рис. 3.80).

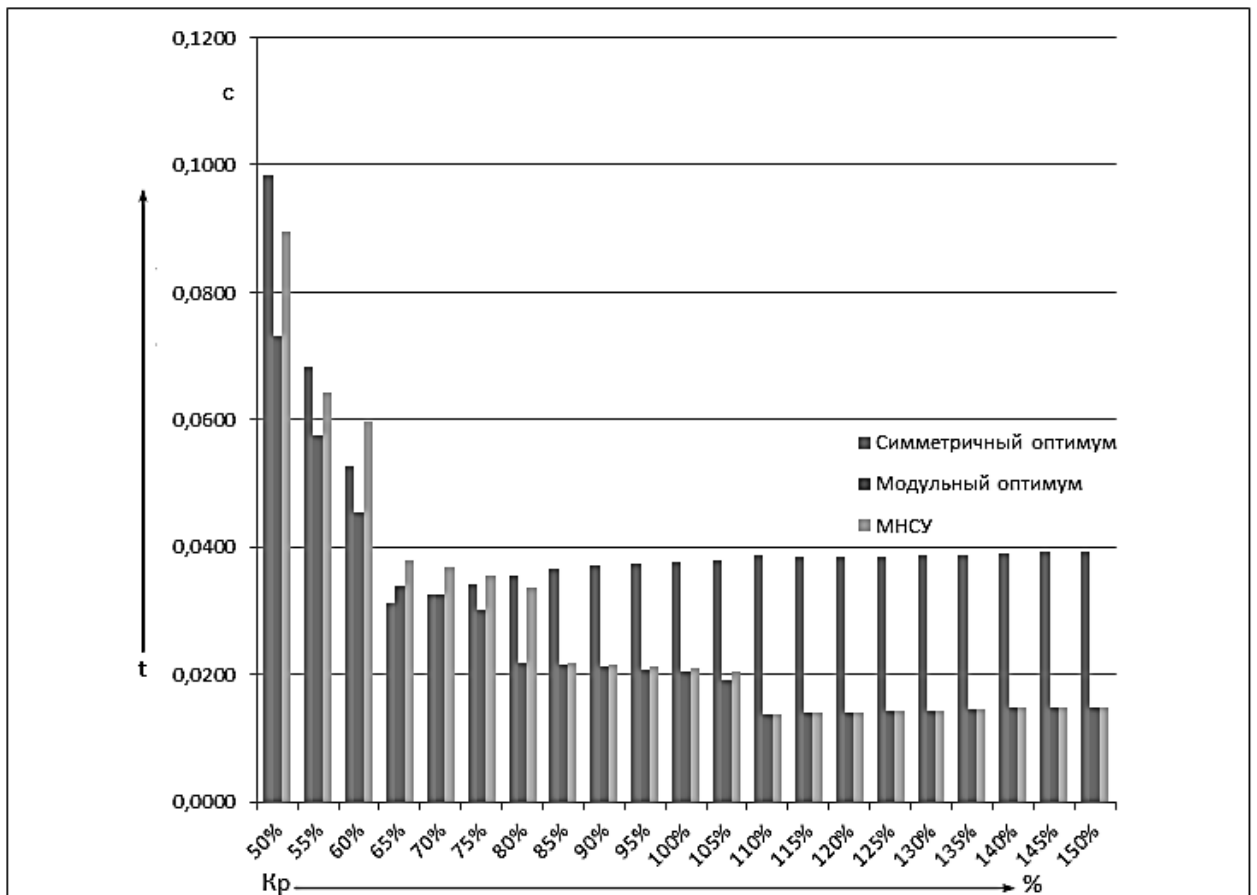


Рисунок 3.80 – Гистограмма зависимости времени переходного процесса от величины коэффициента передачи управляемого преобразователя.

По результатам моделирования (рис. 3.80) можно сделать вывод, что многокаскадная нечеткая система управления за счет интеллектуального переключения между элементами внутреннего каскада, позволяет выполнять гибкую перенастройку процедур регулирования.

Рассмотрим реакцию МНСУ при подаче сигнала задания, который будет многократно превышать номинальное значение (рис. 3.81).

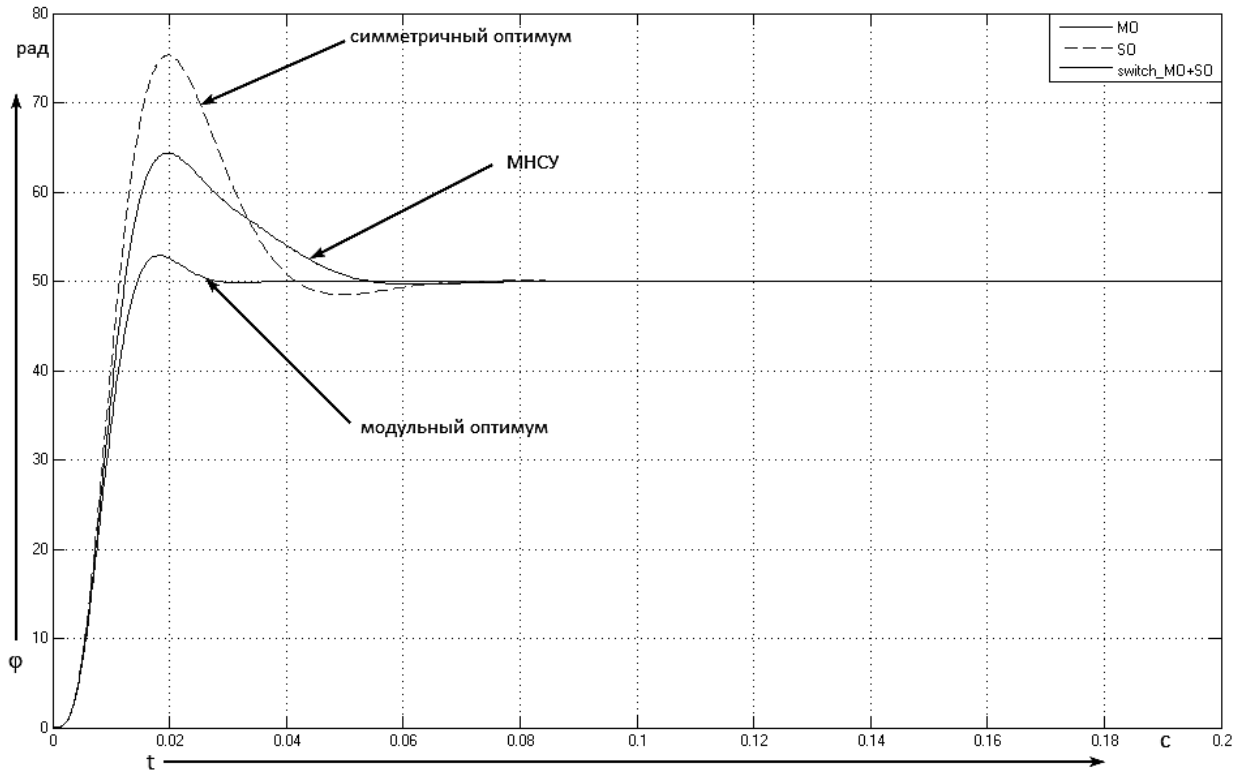


Рисунок 3.81 – График переходного процесса системы.

По результатам моделирования (рис. 3.81), можно сделать вывод, что в процессе увеличения сигнала задания, переключающее устройство во внешнем контуре, в основном выдает управляющее воздействие на первом выходном канале управления, ввиду отсутствия подходящей входной термы лингвистической переменной “ошибка по положению”. Для коррекции работы системы, эксперту достаточно расширить входной диапазон значений переключающего устройства (рис. 3.82).

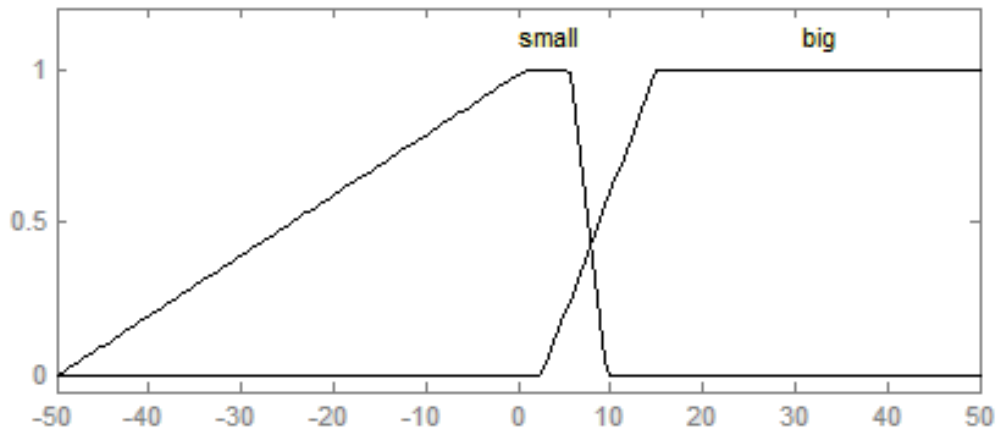


Рисунок 3.82 – Увеличение диапазона значений терм лингвистической переменной “ошибка по положению”.

После проделанной операции расширения диапазона значений, проанализируем полученные результаты моделирования (рис. 3.83).

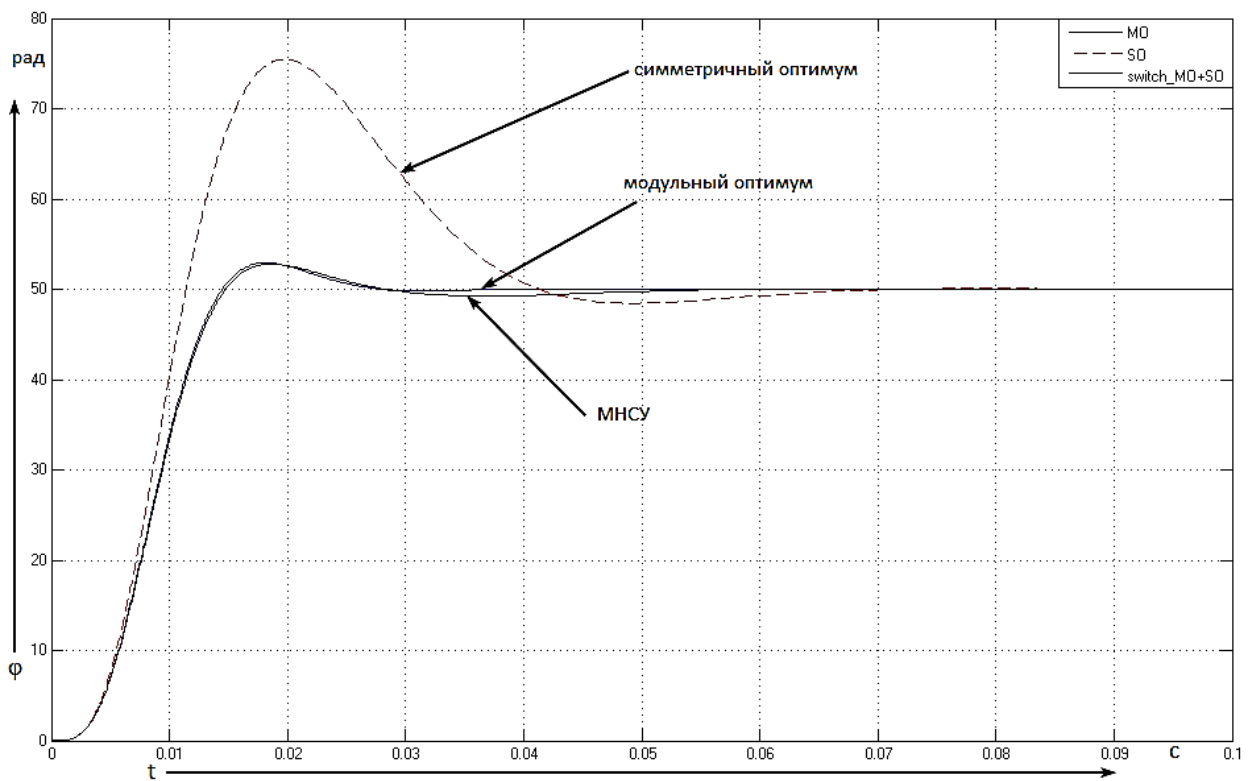


Рисунок 3.83 – График переходного процесса системы.

Анализируя результаты моделирования (рис. 3.83), следует отметить отличия в расширении интеллектуальных возможностей МНСУ при различных подходах их синтеза. В случае, рассмотренном в подразделе 3.2, необходимо внедрить не только дополнительное звено во внутренний каскад,

но и провести донастройку внешнего переключающего устройства, для корректного функционирования системы. Данный подход, позволяет обойтись лишь корректировкой внешнего регулятора МНСУ, что ощутимо упрощает настройку.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что предложенный подход к построению многокаскадных нечетких систем управления позволяет достаточно гибко производить сопряжение различных законов, алгоритмов и форматов настроек регуляторов. Предложенный подход, реализующий многокаскадные нечеткие логические регуляторы, позволяет на основе данных и знаний эксперта в предметной области без применения сложного математического аппарата получить качественные переходные характеристики регулирования и расширить некоторые интеллектуальные свойства системы управления.

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 базэкспертную настройку основных параметров нечетких модулей.

Выводы по третьей главе

Рассмотрены принципы реализации многокаскадного компенсирующего устройства расширяющего функциональные возможности нечетной компенсации нелинейностей различного типа. Показано, что предложенный автором подход к построению компенсирующего устройства формирует «развитую» интеллектуальную систему, осуществляющую распознавание типа нелинейности, подбор метода компенсации или их сочетания, что в конечном итоге обеспечивает наилучшую компенсацию нелинейных свойств объекта.

Для целого класса систем управления технологическими процессами на примере следящих систем и систем позиционирования доказана эффективность использования многокаскадного построения нечеткого регулятора. Показано, что данный подход к синтезу нечеткого регулятора позволяет упростить настройку параметров регулятора, приблизить ее к безэкспертному алгоритму за счет функционального разделения задач по различным каскадам, расширяя интеллектуальные возможности самой системы управления.

Модульность построения многокаскадного нечеткого регулятора придает интеллектуальной системе некоторый универсализм, ограниченный рядом факторов, например, предметной областью, фиксированным набором входных лингвистических переменных, количеством внутренних модулей определяющих точность детализации поддиапазонов регулирования и т.п.

Рассмотренный подход позволяет адаптировать информационную структуру многокаскадного нечеткого регулятора при переходе от одного объекта управления к другому, в рамках общей предметной области, при условии соблюдения обозначенных выше ограничений. Что исключает необходимость перенастройки основных параметров нечетких модулей входящих в состав такой развитой интеллектуальной системы.

Применение стандартных подходов к автоматизации процесса настройки интеллектуальных систем с применением технологии адаптивной нейронной сети показал аналогичные результаты в случае распространения ее и на процесс настройки предложенного многокаскадного нечеткого регулятора.

Глава 4 Разработка принципов построения многокаскадных нечетких логических регуляторов систем управления технологическими процессами, характеризующимися многокритериальностью

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 [186, 251, 257, 295, 330]. Одним из вариантов решения подобных задач представляется подход, основанный на реализации систем с переменной структурой, в которых осуществляется выбор законов управления, характерных для набора различных структур замкнутых систем управления [138-140]. Применение метода многокаскадного нечеткого регулирования позволит реализовать интеллектуальную систему управления технологическим процессом в условиях наложения различных критериев путем дробления элементарных модулей вложенного каскада.

Рассмотрим классическую систему подчиненного регулирования, представленную на рисунке 4.1.

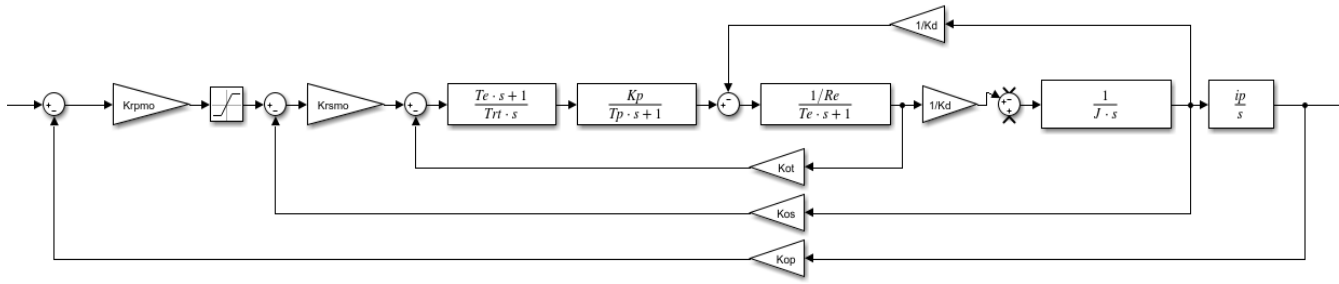


Рисунок 4.1 – Классическая система управления с контуром положения.

В таких системах ограничение переменных представляет более трудную задачу. Проблема ограничения переменных особенно актуальна для режимов отработки больших перемещений (регулирования «в большом»), а также значительных перегрузок на валу двигателя [143]. Реально позиционная САР должна обеспечивать стыковку процессов регулирования «в большом» (как правило, с ограничением переменных) и «в малом» - с обеспечением уравнивания системы в заданных позициях при заданной точности позиционирования. Формальная установка локальных ограничителей на все регуляторы позиционной САР дает неудовлетворительные результаты и может стать причиной неустойчивости системы регулирования. 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 отработке перемещений «в малом»), параболической (при отработке перемещений «в большом») и ограничения. Даже незначительная флуктуация параметров системы вызывает необходимость перенастройки регулятора, что на практике не всегда приемлемо.

В качестве объекта регулирования рассмотрим рассчитанную ранее модель следящего электропривода и применим предложенный ранее

принцип многокаскадного нечеткого управления. Нечеткий многокаскадный регулятор заменит существующие классические регуляторы в контурах скорости и положения (рис. 4.2).

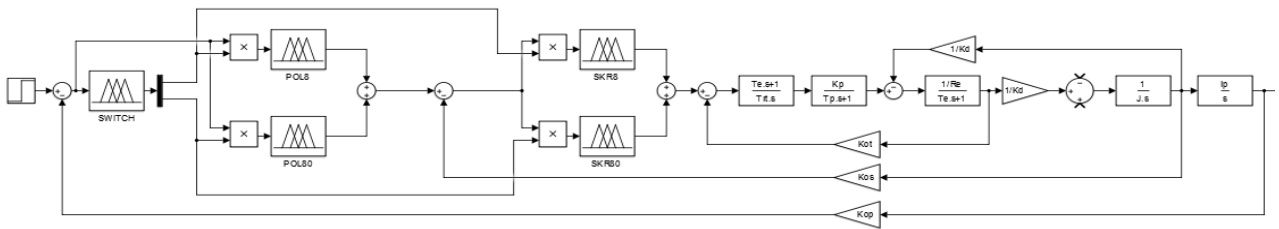


Рисунок 4.2 – Имитационная модель системы автоматического регулирования положения и скорости с МНЛР.

Структура нечеткого многокаскадного регулятора (рис. 4.2) организована на пяти различных нечетких модулях SWITCH, POL8, POL80, SKR8, SKR80.

Внешний каскад реализуется нечетким логическим регулятором SWITCH в функции которого входит анализ сигнала ошибки и выбор необходимой величины перемещения которую должен выполнить электропривод в позиционном режиме. Элементарные нечеткие модули составляющие внутренний каскад можно разделить на две группы: POL8, SKR8 отвечают реализацию сигналов управления в зоне малых положений и скоростей, а POL80, SKR80 – за зону больших перемещений и скоростей.

Согласно функциональной схеме приведенный на рисунке 4.3 нечеткий регулятор внешнего каскада SWITCH, имеет на своем входе единственную лингвистическую переменную, соответствующую понятию «ошибка системы по положению», выход регулятора реализуется на основе двух лингвистическими переменными описывающих понятия «сигнал управления малыми перемещениями» и «сигнал управления большими перемещениями» соответственно. С учетом структурного решения показанного на рисунке 4.2 внешний каскад целесообразно выполнять на основе нечеткого регулятора с механизмом Сугено. Выбор управляющего воздействия на элементарные

нечеткие модули внутреннего каскада является основной функцией регулятора этого каскада.

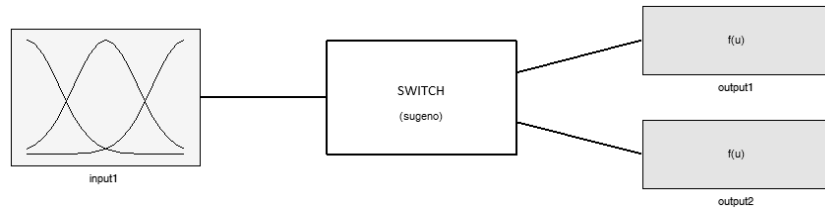


Рисунок 4.3 – Функциональная схема нечеткого контроллера SWITCH.

Единственный информационный вход описывается понятием «сигнал ошибки по положению» Базовое терм-множество $T = \{mf1, mf2\}$ входной лингвистической переменной содержит набор из двух элементов, где $mf1$ – «малое значение сигнала»; $mf2$ – «большое значение сигнала». Область определения задается интервалом $[0; 80]$, что соответствует перемещению системы в области «больших» задающих сигналов.

В заданной области определения (рис. 4.4) расположены две функции принадлежности трапецевидной формы с областями распределения ориентированными на зоны «больших» и «малых» перемещений.

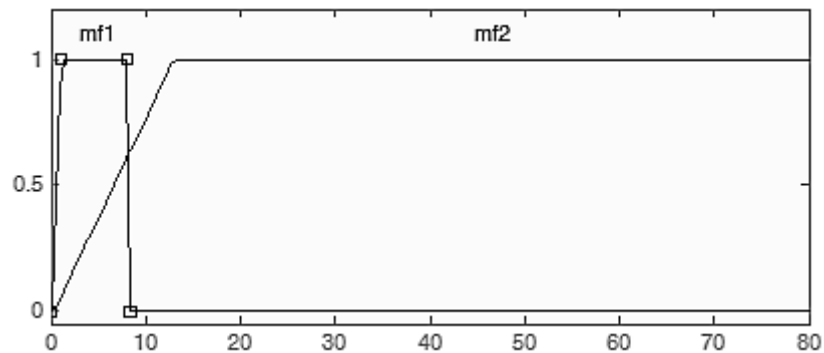


Рисунок 4.4 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению».

Две выходные лингвистические переменные с названиями «управление малыми перемещениями» и «управление большими перемещениями» формализуют понятия выходных сигналов внешнего каскада. Область определения в соответствии с алгоритмом вывода представляет собой набор

из двух констант $[0; 1]$. Базовое терм-множество лингвистических переменных содержит набор нечетких термов $T = \{mf0, mf1\}$, где $mf0 = 0$; $mf1 = 1$

База правил нечеткого регулятора Сугено осуществляющего функции определения величины входного сигнала и выбора управляющего воздействия для соответствующей зоны перемещений содержит два правила продукции вида:

Если «ошибка по положению» есть $mf1$, то $Output1 = 1, Output2 = 0$;

Если «ошибка по положению» есть $mf2$, то $Output1 = 0, Output2 = 1$;

На основании выбранного механизма вывода Сугено процесс дефаззификации осуществляется с использованием взвешенного среднего, как дискретного случая метода центра тяжести.

При выполнении настроек элементарных модулей внутреннего каскада целесообразно применять методику, основанную на получении желаемых характеристик с классических регуляторов.

Представленный на рисунке 4.5, нечеткий регулятор положения POL8, построенный с применением алгоритма вывода Сугено, имеет две лингвистические переменные на входе и выходе соответственно, которые формализуют понятия «управление малыми перемещениями» и «сигнал управления». Главным назначением такого интеллектуального модуля, расположенного во внутреннем каскаде, является реализация управляющего воздействия на выходе нечеткого многокаскадного регулятора для случаев функционирования системы управления технологическим процессом в номинальных режимах.

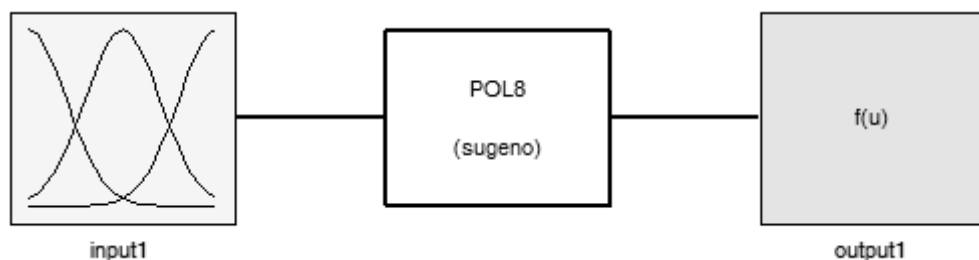


Рисунок 4.5 – Функциональная схема нечеткого контроллера POL8.

Понятие «сигнал ошибки по положению» формализовано при помощи лингвистической переменной с областью определения заданной на интервале $[-8; 8]$, который соответствует номинальным значениям изменения сигнала ошибки системы по положению. $T = \{mf1, mf2, mf3, mf4, mf5\}$ базовое терм-множество входной лингвистической переменной задается набором из пяти нечетких переменных с названиями: $mf1$ – «большое отрицательное значение»; $mf2$ – «среднее отрицательное значение»; $mf3$ – «нулевое значение»; $mf4$ – «среднее положительное значение»; $mf5$ – «большое положительное значение»;

На заданной области определения распределены функции принадлежности элементов базового терм-множества аппроксимированного вида, среди которых три центральные имеют треугольную форму, на краях диапазона расположены термы z-образного вида (рис. 4.6).

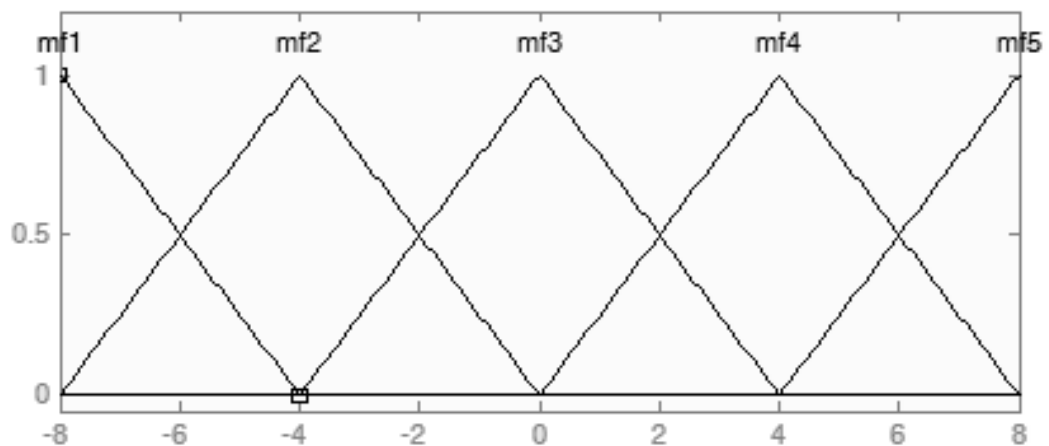


Рисунок 4.6 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению».

При формализации понятия «сигнал управления по положению при номинальных перемещениях» используется соответствующая выходная лингвистическая переменная с областью определения, заданной диапазоном, $[-6,5; 6,5]$. Базовое терм-множество этой лингвистической переменной, с учетом упрощенного алгоритма нечеткого логического вывода состоит из пяти постоянных коэффициентов: $T = \{mf1, mf2, mf3, mf4, mf5\}$, где $mf1 = -6,5$ – «большое отрицательное значение»; $mf2 = -3,5$ – «среднее

отрицательное значение»; $mf3 = 0$ – «нулевое значение»; $mf4 = 3,5$ – «среднее положительное значение»; $mf5 = 6,5$ – «большое положительное значение».

Для элементарного модуля внутреннего каскада POL8 с единственным входом и выходом набор нечетких продукционных правил можно представить следующим набором:

Если «ошибка_по_положению» есть $mf1$, то «сигнал_управления_положением» есть $mf1$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf2$, то «сигнал_управления_положением» есть $mf2$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf3$, то «сигнал_управления_положением» есть $mf3$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf4$, то «сигнал_управления_положением» есть $mf4$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf5$, то «сигнал_управления_положением» есть $mf5$.

Представленный на функциональной схеме 4.7, нечеткий модуль внутреннего каскада POL80 в своей основе имеет механизм нечеткого вывода Сугено и описывается единственной лингвистической переменной на входе и единственной лингвистической переменной на выходе, а также диапазоном изменения управляющей величины в интервале зоны больших перемещений. Особенность критерия настройки такого модуля заключается в простоте, а именно, в повторении настроек аналогичных модулей вложенного каскада, и схожести ряда параметров базовых терм-множеств лингвистических переменных входа и выхода. Основным функциональным назначением этого интеллектуального модуля структуры является формирование управляющего воздействия для случая больших перемещений.

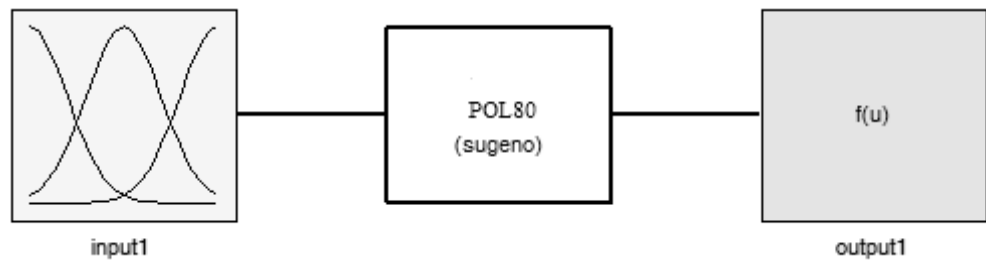


Рисунок 4.7 – Функциональная схема нечеткого контроллера POL80.

С учетом величины заданного диапазона изменения входного сигнала, лингвистической переменной будет формализовано понятие «сигнал ошибки по положению» (рис 4.8) с соответствующим интервалом изменения классических входных переменных $[-80; 80]$. По аналогии с нечетким модулем, настроенным на номинальные значения перемещений, задаются элементы базового терм множества и их нотации.

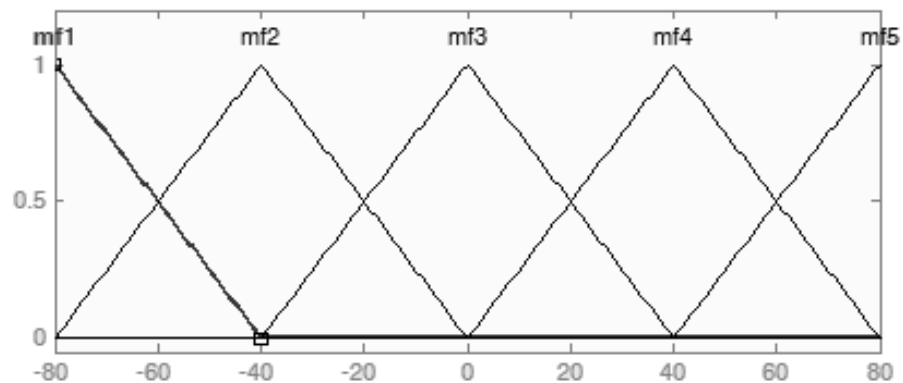


Рисунок 4.8 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению».

Выходная лингвистическая переменная «сигнал управления положением при больших перемещениях» задана с учетом перемещения объекта регулирования по желаемой траектории в области больших сигналов задания с интервалом $[-65; -35; 0; 35; 65]$. Как было определено ранее, и на основе одного из принципов заключенных в предлагаемую методологию нечеткого многокаскадного управления, базовое терм-множество выходной

лингвистической переменной регулятора POL80, задается аналогично элементам интеллектуального модуля настроенного на малые перемещения.

Таким образом, нечеткая продукционная база знаний модуля реализующего процедуры управления системой при больших значениях сигнала задания будет иметь вид:

Если «ошибка_по_положению» есть $mf1$, то «сигнал_управления_положением_при_больших_перемещениях» есть $mf1$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf2$, то «сигнал_управления_положением_при_больших_перемещениях» есть $mf2$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf3$, то «сигнал_управления_положением_при_больших_перемещениях» есть $mf3$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf4$, то «сигнал_управления_положением_при_больших_перемещениях» есть $mf4$;

Если «ошибка_по_положению» есть $mf5$, то «сигнал_управления_положением_при_больших_перемещениях» есть $mf5$.

Рассмотрим настройку второй части вложенного каскада. Представленный на рисунке 4.9 нечеткий регулятор SKR8 реализует процедуры управления технологическим объектом по скорости при номинальных значениях задающего воздействия. На его единственном входе задается лингвистическая переменная формализующая понятие ошибка системы по скорости. Единственный выход формируется другой лингвистической переменной реализующей понятие «сигнал управления скоростью». Механизмом вывода, по аналогии с частью каскада контролирующей положение системы, выбран алгоритм вывода Сугено, что обусловлено простотой настройки основных блоков и простотой интеграции элементарных модулей во внутренний каскад.

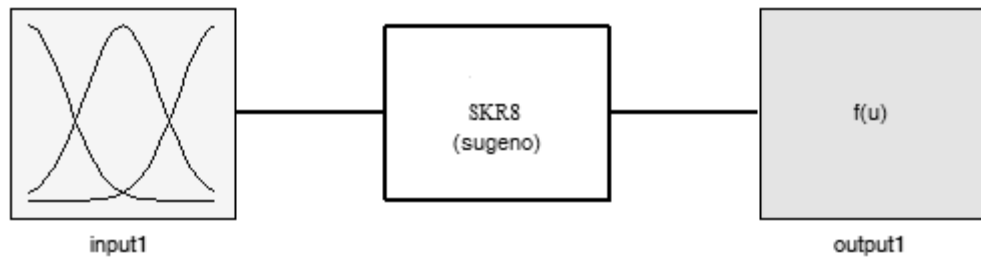


Рисунок 4.9 – Функциональная схема нечеткого контроллера SKR8.

Заданная на интервале изменения ошибки системы $[-7,5; 7,5]$ входная лингвистическая переменная «сигнал ошибки по скорости» показана на рисунке 4.10. По аналогии с нечетким регулятором положения, настроенным на номинальные значения задающего сигнала, лингвистическая переменная «сигнал ошибки по скорости» содержит пять нечетких переменных со следующими названиями: mf5 – «большое положительное значение»; mf4 – «среднее положительное значение»; mf3 – «нулевое значение»; mf2 – «среднее отрицательное значение»; mf1 – «большое отрицательное значение».

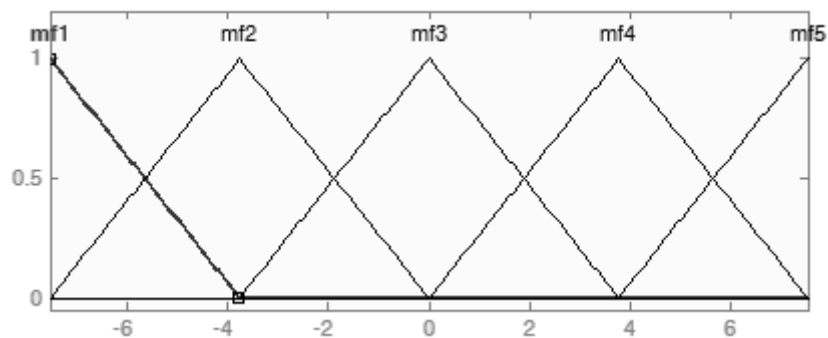


Рисунок 4.10 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по скорости».

Нотация нечетких переменных на выходе интеллектуального модуля скорости имеет пять заданных постоянных коэффициентов следующего содержания: mf1 = -9000 – «большое отрицательное значение»; mf2 = -5400 – «среднее отрицательное значение»; mf3 = 0 – «нулевое значение»; mf4 = 5400 – «среднее положительное значение»; mf5 = 9000 – «большое положительное значение».

значение». Диапазон регулирования, определяемый областью определения выходной лингвистической переменной, задан на интервале $[-9000; 9000]$. Выходной сигнал нечеткого логического регулятора «сигнал управления по скорости в случае номинальных перемещений» формализуется при помощи единственной лингвистической переменной.

База правил нечеткого модуля внутреннего каскада состоит из следующих пяти правил:

Если «ошибка_по_скорости» есть $mf1$, то «сигнал_управления_скоростью» есть $mf1$;

Если «ошибка_по_скорости» есть $mf2$, то «сигнал_управления_скоростью» есть $mf2$;

Если «ошибка_по_скорости» есть $mf3$, то «сигнал_управления_скоростью» есть $mf3$;

Если «ошибка_по_скорости» есть $mf4$, то «сигнал_управления_скоростью» есть $mf4$;

Если «ошибка_по_скорости» есть $mf5$, то «сигнал_управления_скоростью» есть $mf5$.

Аналогично для простоты интеграции этого модуля во внутренний каскад развитой нечеткой системы распространим на него все требования реализованные в предыдущих элементарных нечетких регуляторах. Вход и выход, нечеткого модуля SKR80, представленного на рисунке 4.11, формализуется соответствующими лингвистическими переменными. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечеткого логического вывода Сугено. Основным функциональным назначением этой структуры является формирование управляющего воздействия на выходе нечеткого многокаскадного регулятора в случае большой скорости.

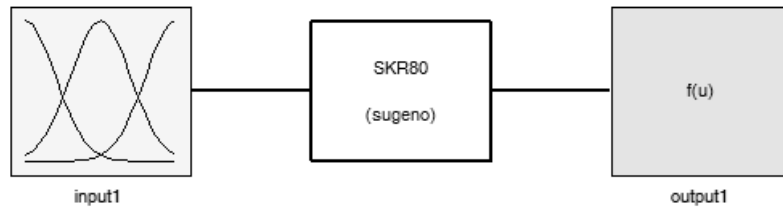


Рисунок 4.11 – Функциональная схема нечеткого контроллера SKR80.

Функционирование лингвистической переменной соответствующей понятию «сигнала ошибки скорости» (рис. 4.12) ограничивается областью определения на интервале высоких скоростей $[-75.27; 75.27]$. Базовый набор терминов входной лингвистической переменной содержит пять нечетких переменных: mf1 – «большое отрицательное значение»; mf2 – «среднее отрицательное значение»; mf3 – «нулевое значение»; mf4 – «среднее положительное значение»; mf5 – «большое положительное значение».

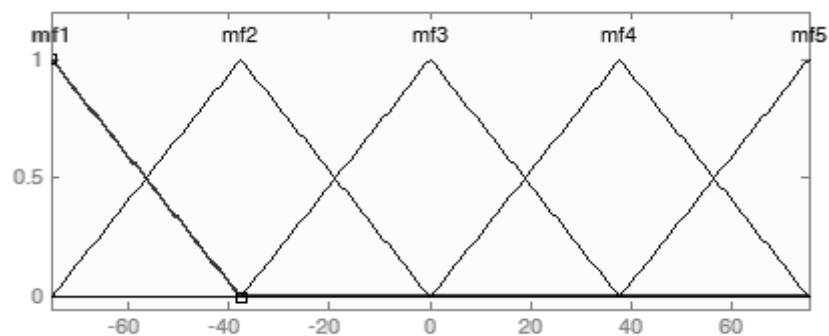


Рисунок 4.12 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по скорости».

Область определения лингвистической переменной соответствует интервалу, в котором наблюдаются максимальные отклонения сигнала управления по скорости системы, что соответствует определению понятия «сигнал управления скоростью при высоких значениях». Элементы mf5 = 90000 – «большое положительное значение»; mf4 = 54000 – «среднее положительное значение»; mf3 = 0 – «нулевое значение»; mf2 = -54000 – «среднее отрицательное значение»; mf1 = -90000 – «большое отрицательное

значение» представляют собой базовый набор терминов лингвистической переменной состоящей из пяти нечетких термов $T = \{mf1, mf2, mf3, mf4, mf5\}$.

Продукционная база правил нечеткого модуля внутреннего каскада, настроенного на регулирование системы при повышенных значениях скорости, основывается на общей тенденции формирования основных блоков МНЛР и представляет собой перечень из пяти правил и имеет следующий вид:

Если «ошибка_по_скорости» есть mf1, то «сигнал_управления_скоростью» есть mf1;

Если «ошибка_по_скорости» есть mf2, то «сигнал_управления_скоростью» есть mf2;

Если «ошибка_по_скорости» есть mf3, то «сигнал_управления_скоростью» есть mf3;

Если «ошибка_по_скорости» есть mf4, то «сигнал_управления_скоростью» есть mf4;

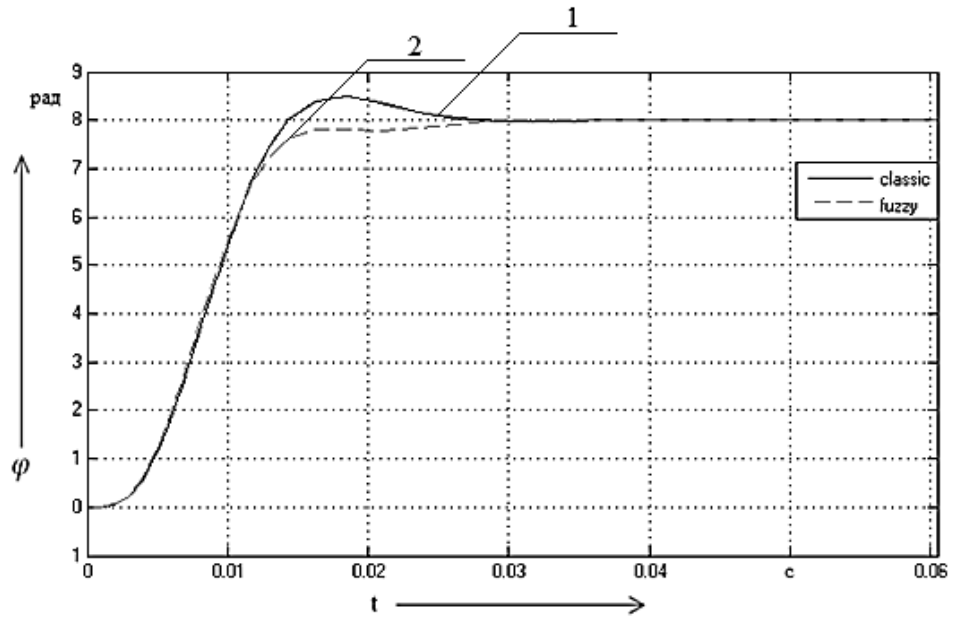
Если «ошибка_по_скорости» есть mf5, то «сигнал_управления_скоростью» есть mf5.

3.2 Анализ многокаскадного нечеткого регулятора с реализацией закона управления положение – скорость

Основной целью реализации развитой нечеткой системы управления на основе нечеткого многокаскадного регулятора, является улучшения основных показателей переходных процессов, а именно сокращение времени регулирования и снижение перерегулирования, по сравнению с классической системой управления технологическим процессом.

Проанализируем реакцию полученной модели системы управления с нечетким многокаскадным регулятором в режиме позиционирования при различных значениях задающего сигнала.

Сравним поведения развитой интеллектуальной системы управления с классической при подаче номинального входного сигнала величиной $U=8$ В (рис. 4.13).

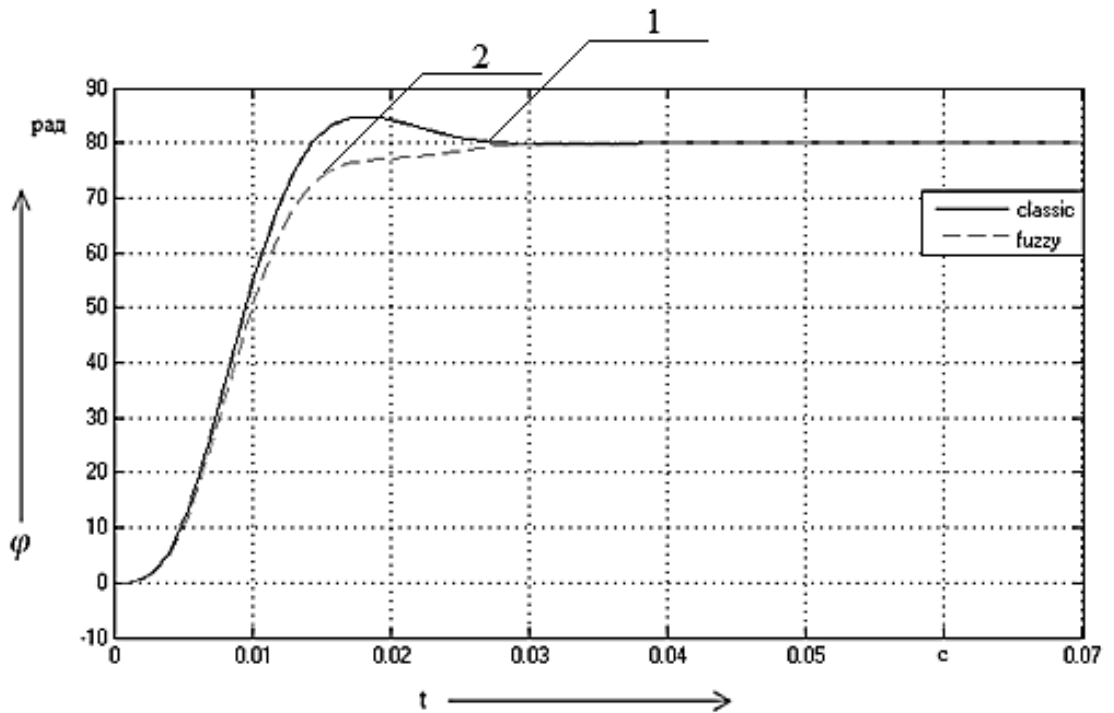


1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечетким регулятором.

Рисунок 4.13 – Реакция систем на входное воздействие.

Согласно рисунку 4.13 система с нечетким многокаскадным регулятором выходит на заданный уровень, при этом по сравнению с классической системой управления имеет лучшие основные показатели регулирования: перерегулирование отсутствует и время переходного процесса сокращается.

Исследуем реакцию многокаскадной нечеткой системы управления при сигнале задания десятикратно превышающем номинальный (рис. 4.14).

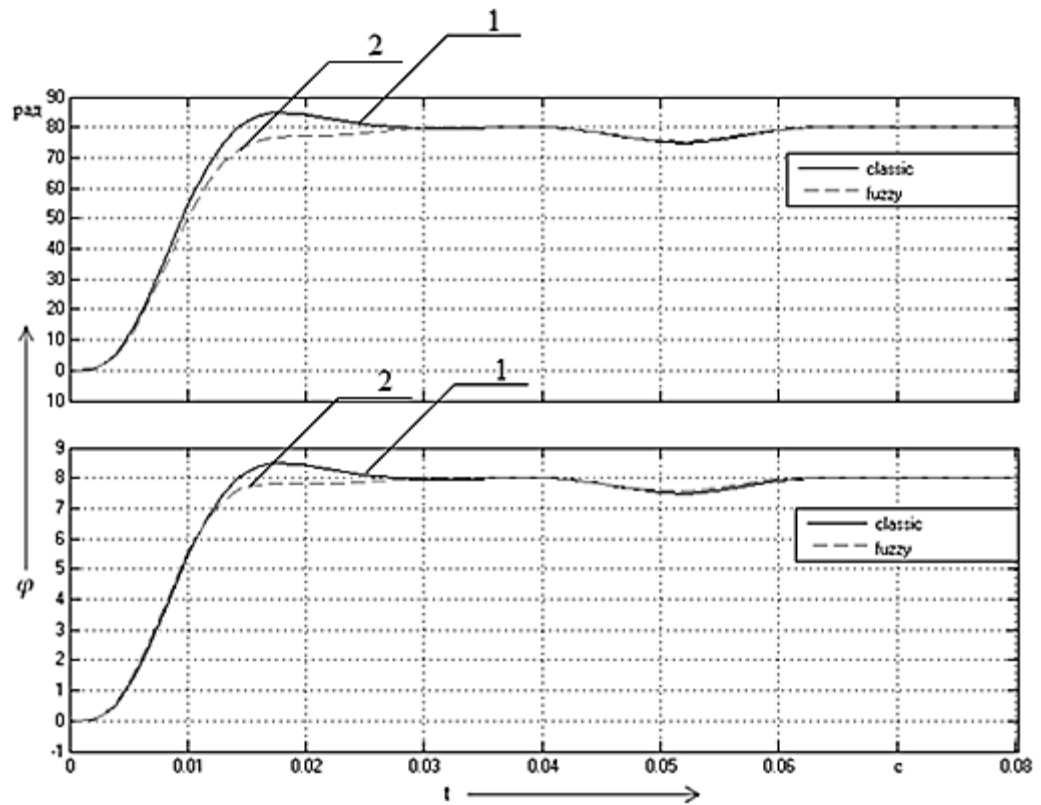


1 – система с классическим регулятором; 2 – система с нечетким регулятором.

Рисунок 4.14 – Реакция системы на входное воздействие.

Анализ переходных процессов представленных на рисунке 4.14 показал, что система с нечетким многокаскадным регулятором выходит на заданный уровень, также как и система с классическим, при этом имеет лучшие показатели регулирования: отсутствие перерегулирования и более высокое быстродействие.

Сравним реакцию систем при подаче и съеме нагрузки, при номинальном сигнале задания $U = 8$ В и сигнале задания, соответствующем большим перемещениям $U = 80$ В (рис. 4.15).



1 – система с классическим регулятором;

2 – система с нечетким регулятором.

Рисунок 4.15 – Реакция систем на подачу и съем нагрузки.

Из рисунка 4.15 видно, что система с нечетким многокаскадным регулятором обрабатывает возмущения на том же уровне, что и система с классическим регулятором.

Добавим в имеющуюся систему два регулятора POL08, SKR08, которые будут отвечать за малые перемещения и малый ток. Настройка которых производилась аналогичным образом, как и POL8, SKR8, отличие лишь в диапазонах областей определения *input1* и *output1*, которые соотносятся в отношении 1/10.

Произведем настройку нечеткого регулятора SWITCH, для корректной работы новой системы:

Нечеткий регулятор SWITCH, представленный на рисунке 4.16, имеет на своем входе одну лингвистическую переменную *input1*, выход регулятора формализуется тремя лингвистическими переменными *output1*, *output2* и

output3. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечеткого логического вывода Сугено. Основным функциональным назначением этой структуры является интеллектуальные оценка и выбор управляющего воздействия на нечеткие регуляторы второго каскада.

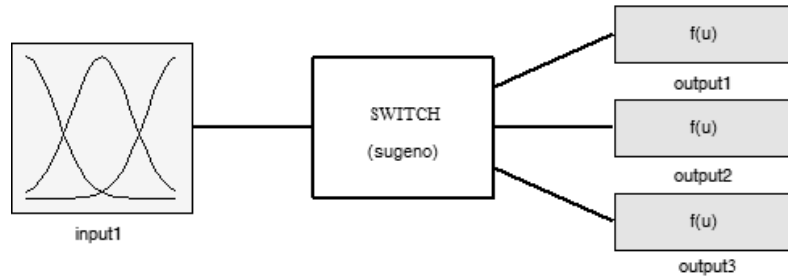


Рисунок 4.16 – Функциональная схема нечеткого контроллера SWITCH.

Лингвистическая переменная *input1* формализует понятия первого входного сигнала нечеткого регулятора – сигнал ошибки по положению. Область определения представляет собой диапазон $[0; 80]$. Базовое термножество T лингвистической переменной состоит из следующих элементов: $T = \{mf1, mf2, mf3\}$, где *mf1* – малое значение; *mf2* – среднее значение; *mf3* – большое значение; названия нечетких переменных лингвистической переменной *input1*.

По области определения базового термножества лингвистической переменной распределены три функции принадлежности нечетких переменных трапециевидного вида (рис. 4.17).

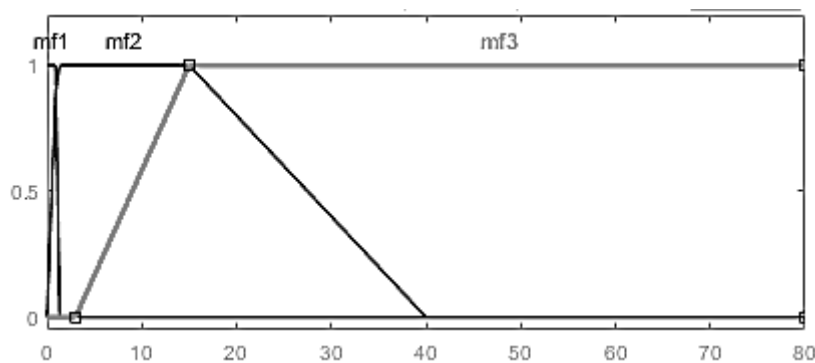


Рисунок 4.17 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению».

Лингвистические переменные $output1$, $output2$ и $output3$ формализуют понятия первого, второго и третьего выходного сигнала нечеткого регулятора соответственно. Область определения представляет собой диапазон $[0;1]$. Базовое терм-множество T лингвистических переменных состоит из следующих элементов: $T = \{mf0, mf1\}$, где $mf0$ – постоянная величина, равная нулю; $mf1$ – постоянная величина, равная единице; названия нечетких переменных лингвистических переменных $output1$, $output2$ и $output3$.

Нечеткая продукционная база знаний регулятора SWITCH представляет собой перечень из трех правил и имеет следующий вид:

Если «ошибка по положению» есть $mf1$, то $Output1 = 1$, $Output2 = 0$, $Output3 = 0$;

Если «ошибка по положению» есть $mf2$, то $Output1 = 0$, $Output2 = 1$, $Output3 = 0$;

Если «ошибка по положению» есть $mf3$, то $Output1 = 0$, $Output2 = 0$, $Output3 = 1$.

Приведение к четкости осуществляется вырожденным случаем центроидного метода, а именно средневзвешенным.

Ниже представлена структурная схема автоматического регулирования положения и скорости с нечетким многокаскадным регулятором, для новой системы (рис. 4.18).

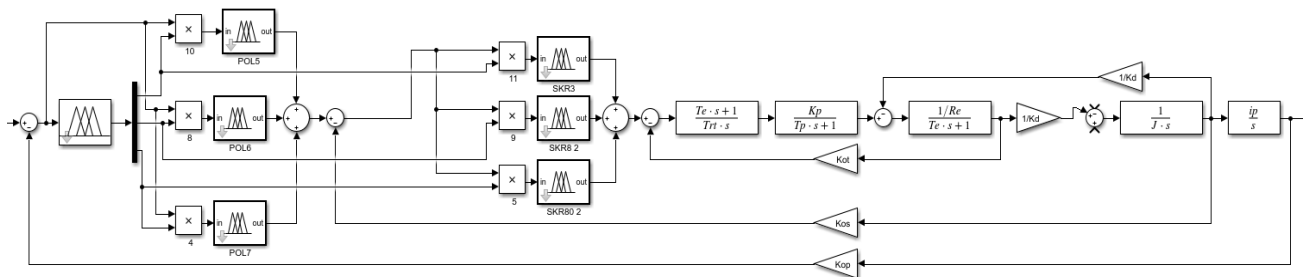


Рисунок 4.18 – Структурная схема системы автоматического регулирования положения и скорости с нечетким многокаскадным регулятором.

На реализованный нечеткий логический регулятор, также возлагается функция ограничения управляющего сигнала, показанная на структурной схеме рисунка 4.1. Нелинейный элемент выполнен с использованием элементарного нечеткого модуля POL7 и представляет собой простейший регулятор структуры развитой нечеткой системы управления с алгоритмом вывода Сугено, состоящий из единственных лингвистических переменных на входе и выходе. Лингвистическая переменная, формализующая входной сигнал, представляет собой набор из пяти нечетких переменных 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 $U = 0,8 \text{ В}$, $U = 8 \text{ В}$, $U = 80 \text{ В}$ при использовании классических и многокаскадных нечетких регуляторов представлены на рисунках (рис. 4.19 – 4.21). На рисунках цифрами обозначены: 1 – система с классическим регулятором, 2 – система с нечетким логическим регулятором.

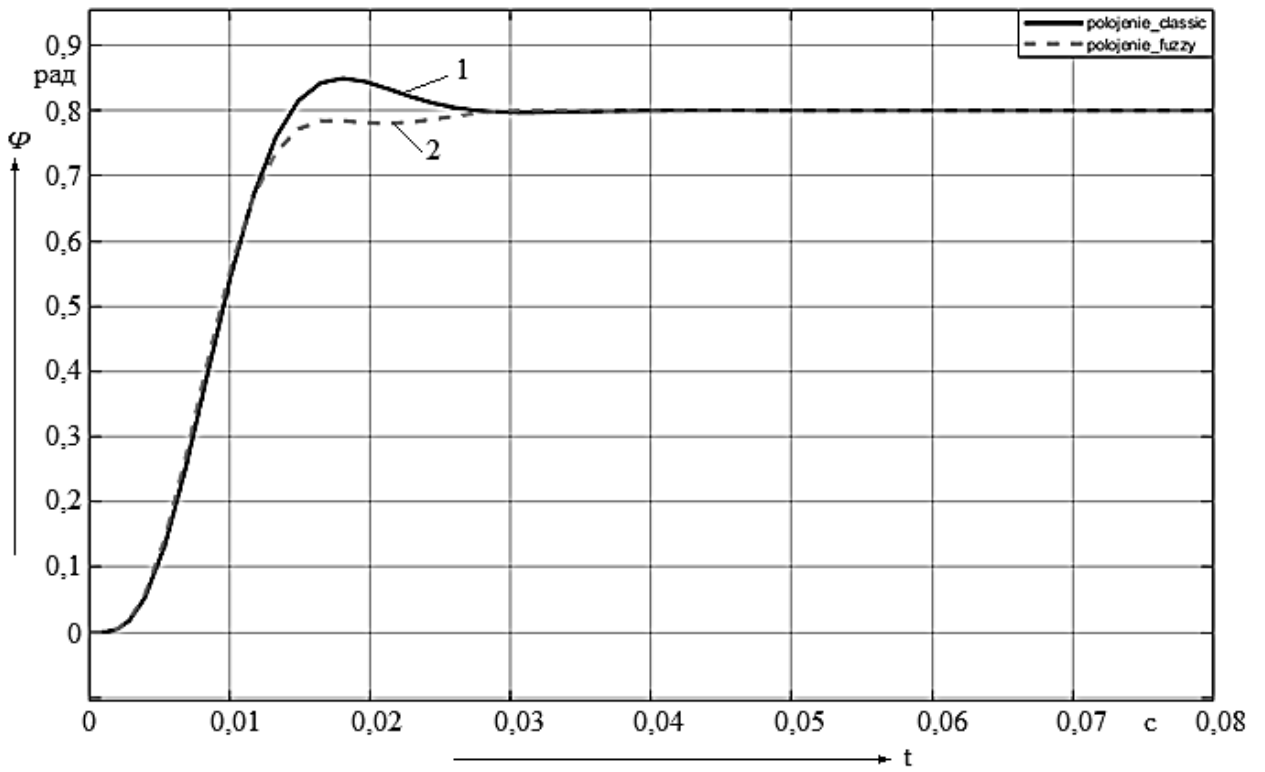


Рисунок 4.19 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=0,8 В$.

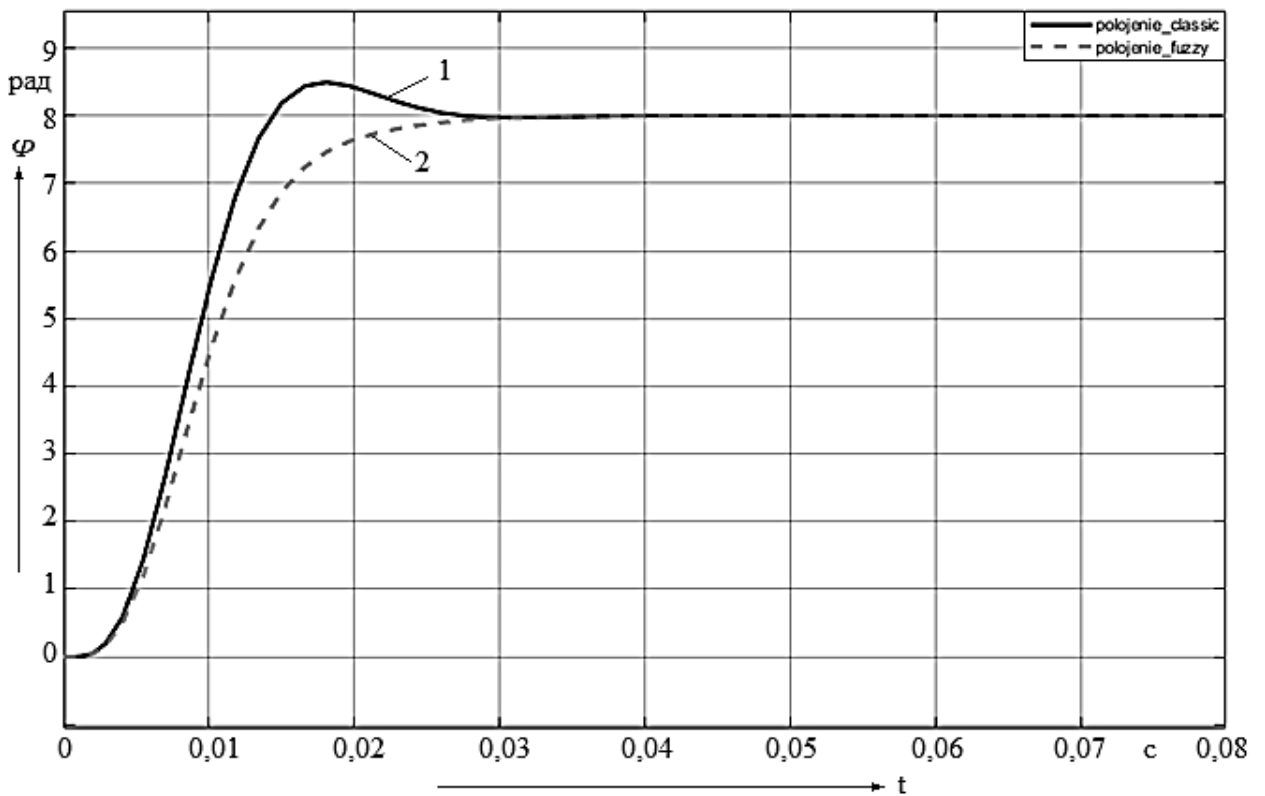


Рисунок 4.20 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=8 В$.

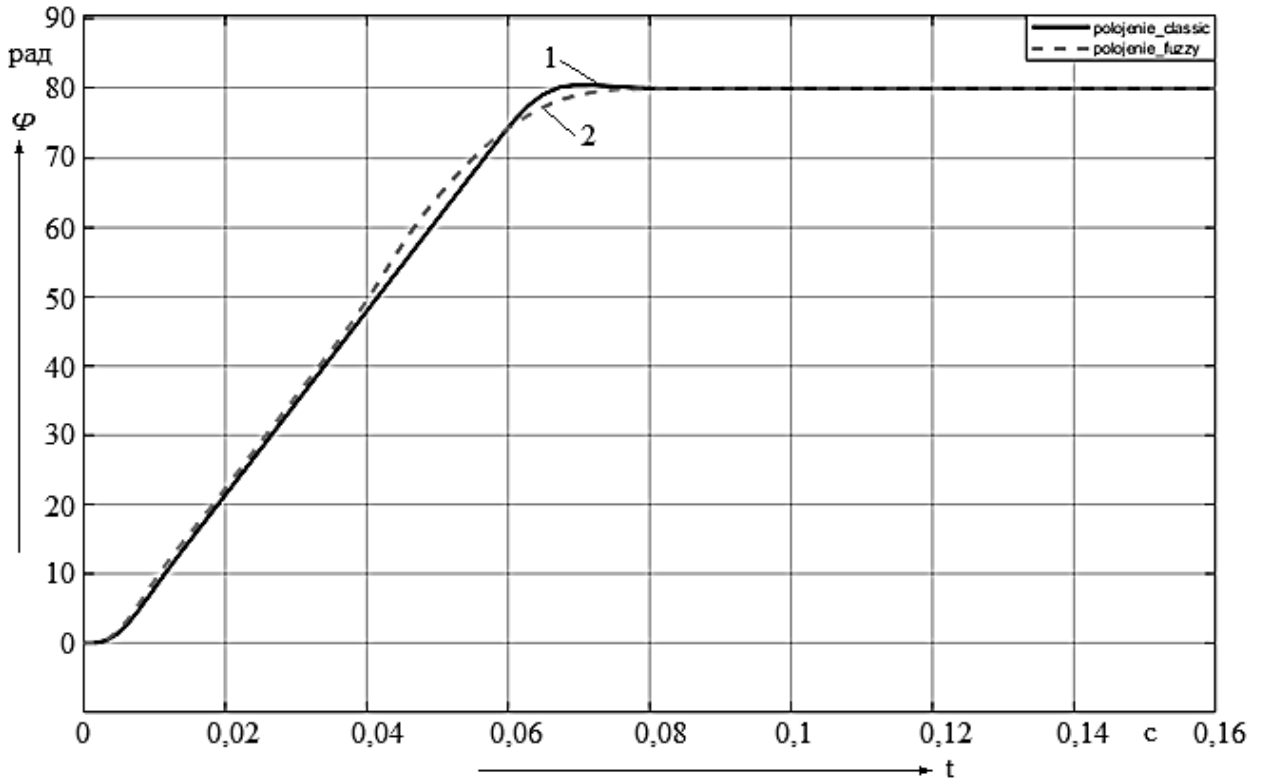


Рисунок 4.21 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=80\text{ В}$.

Как видно из характеристик, представленных на рисунках 4.19 – 4.21, система с нечетким регулятором выходит на заданный уровень, также как и с классическим, имеет лучшие показатели регулирования: меньшее время регулирования и отсутствие перерегулирования.

Анализ изменения сигнала в контуре скорости (рисунки 4.22 – 4.24) свидетельствует о совпадении основных показателей.

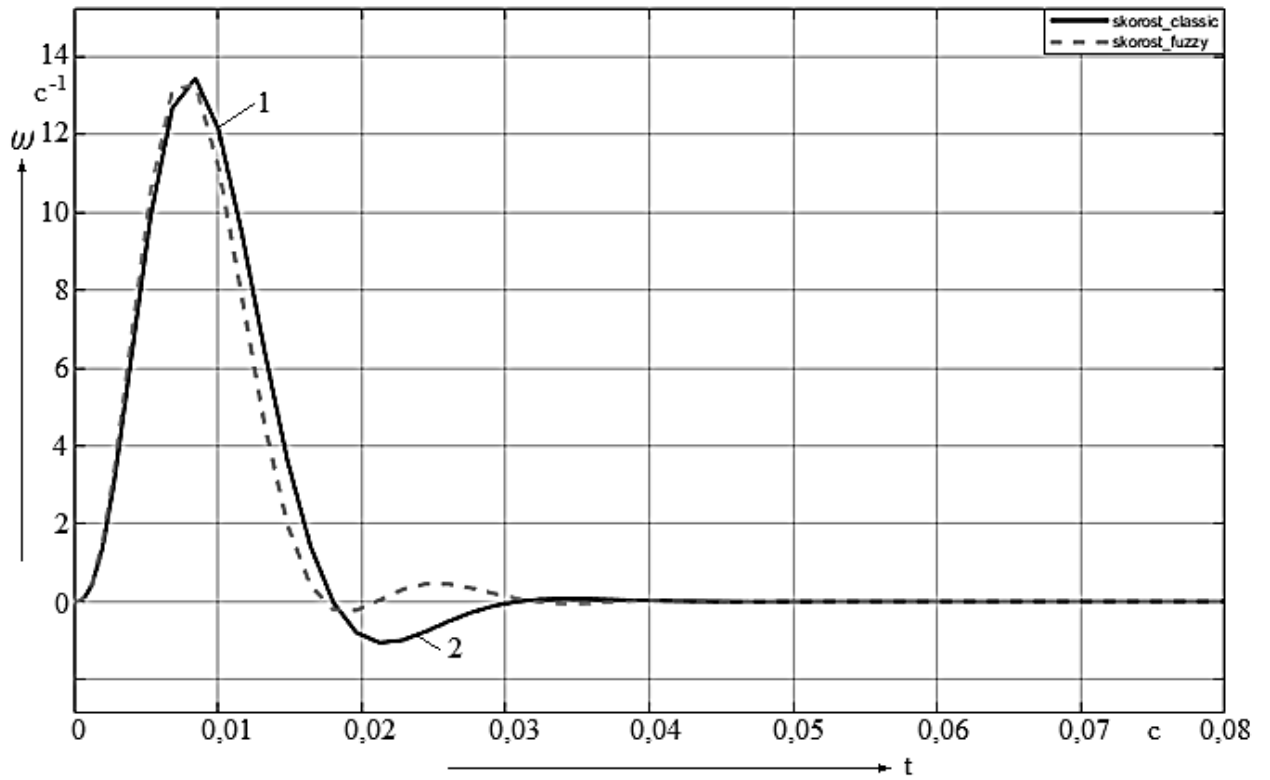


Рисунок 4.22 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=0,8 \text{ В}$.

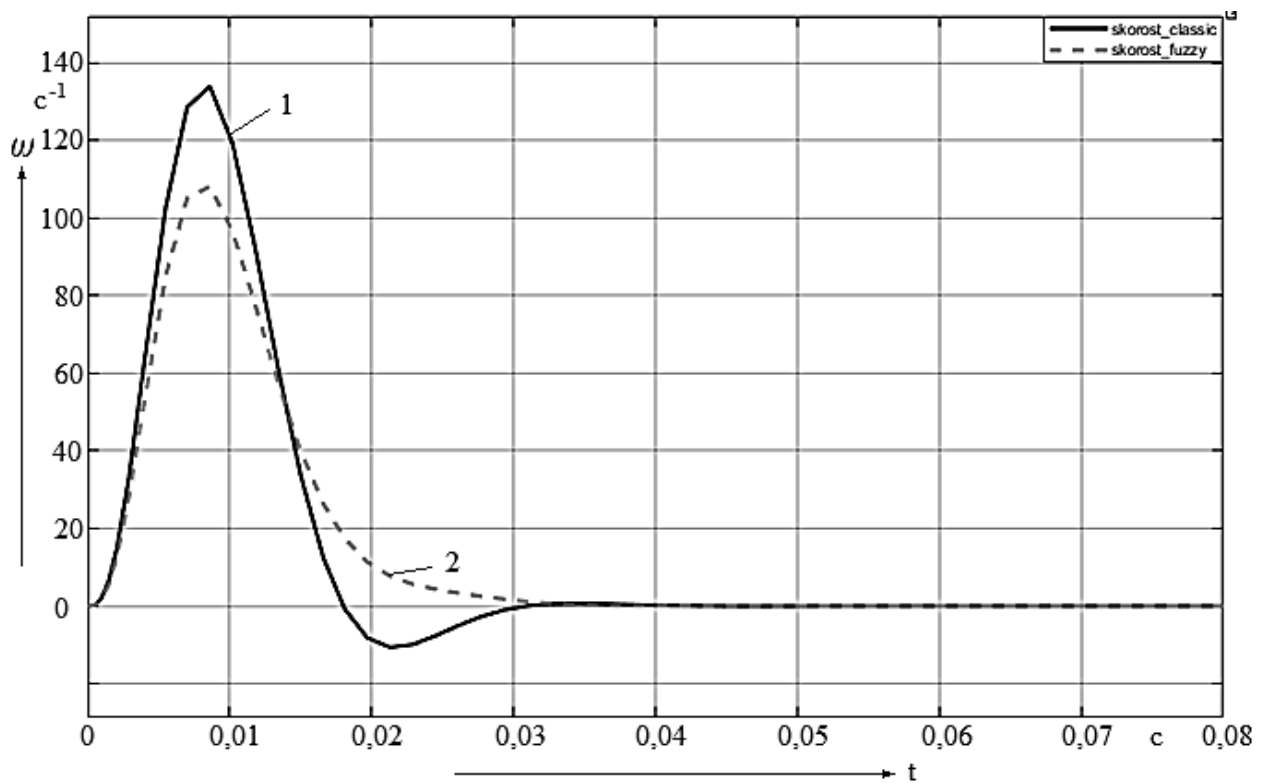


Рисунок 4.23 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=8 \text{ В}$.

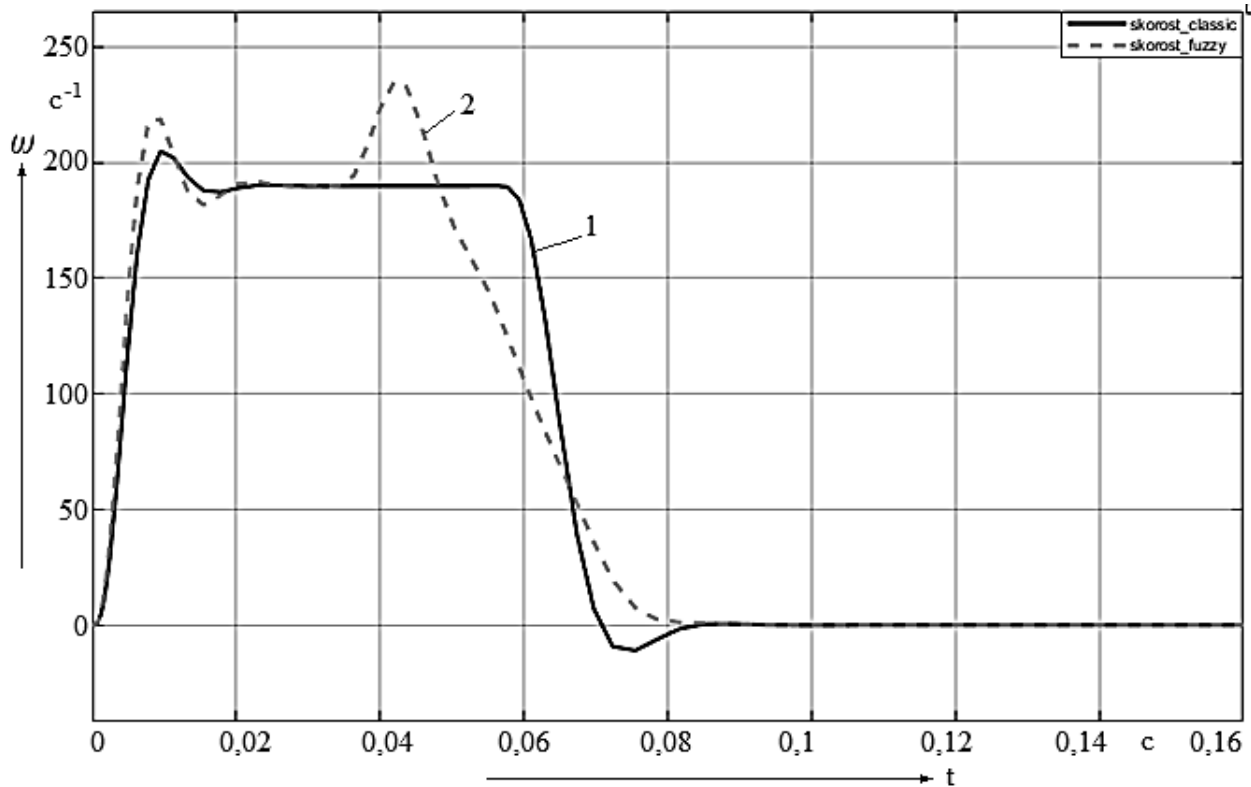
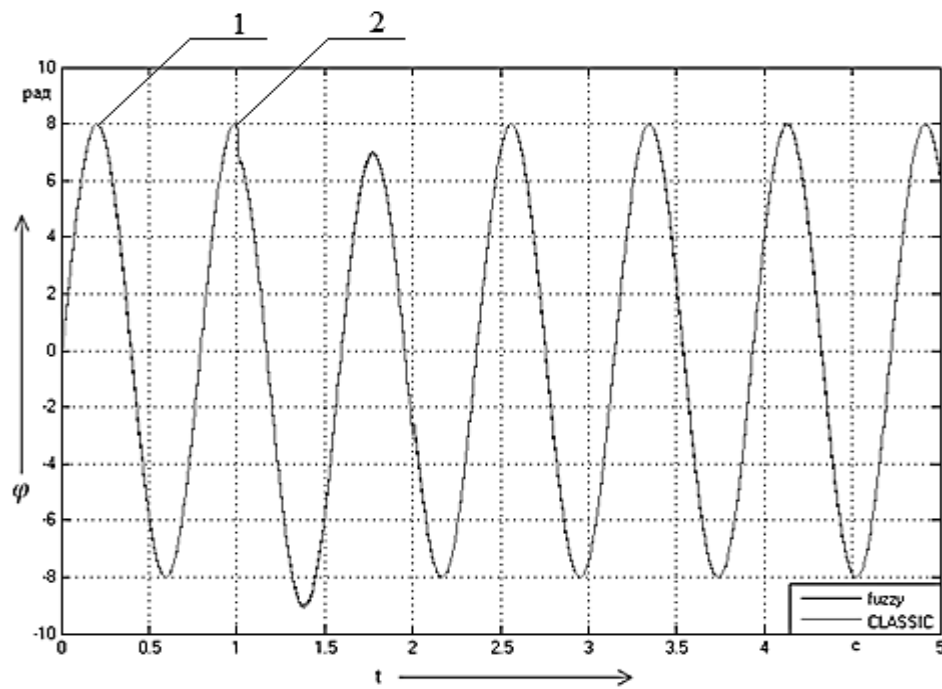


Рисунок 4.24 – Динамические характеристики системы при задающем воздействии $U=80 В$.

Наиболее характерно адаптивные свойства можно проследить по динамическим характеристикам, представленным на рисунке 4.24. 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. 4.25).



1 – система с классическим регулятором;

2 – система с нечетким регулятором.

Рисунок 4.25 – Реакция систем на подачу возмущающего воздействия.

Как видно из рисунка 4.25, 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, представленного на рисунке 4.18, 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.

Нечеткая логика обеспечивает эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реальных объектов. Наличие математических средств отражения нечеткости исходной информации позволяет построить модель, адекватную реальности без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для классического метода управления. Нечеткое управление показывает лучшие результаты, по сравнению с получаемыми при общепринятых алгоритмах управления. Результаты моделирования наглядно показывают правомерность применения нечеткой многокаскадной системы управления электроприводом постоянного тока.

Выводы по четвертой главе

Применяемый в предложенном оригинальном подходе принцип модульного построения нечетких многокаскадных систем управления позволяет проводить более гибкую настройку интеллектуальных систем управления. Показано, что система управления может быть настроена на целый ряд различных критериев, например, быстродействие и точность за счет разделения внутреннего каскада на две части. При этом необходимо отметить, что такая настройка возможна даже в случае взаимного влияния элементарных модулей второго каскада друг на друга, как в случае системы подчиненного регулирования.

Дополнительно одна из частей внутреннего каскада реализует функции нелинейного элемента, что позволяет ограничивать любой заданный сигнал в системе управления технологическим процессом для повышения адекватности модели сложного объекта регулирования и качества формирования процедур управления.

Кроме того, простота расширения диапазона регулирования в многокаскадной нечеткой системе управления внедрением дополнительных простейших интеллектуальных модулей позволяет существенно расширить ее возможности в части адаптивных и робастных свойств, качества реализации процедур управления сложным технологическим объектом с точки зрения предъявляемых требований и гибкой коррекции или замены самих критериев регулирования

Глава 5 Структурная и функциональная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для систем управления с пространственной формой функций принадлежности

Огромный объем научных публикаций, появившихся в последнее десятилетие, в области исследования и проектирования нечетких систем управления различными технологическими процессами объясняется неподдельным интересом исследователей и инженерного сообщества к разрешению имеющихся противоречий сложных технологических объектов управления, связанных с их спецификой: неопределенностью и неполнотой знаний, нечеткостью в математическом описании. При этом направленность исследований ориентирована не только в область анализа и синтеза нечетких регуляторов и систем управления технологическими объектами, но охватывает вопросы нечеткого представления специфики объекта. В качестве одного из таких специфических свойств можно отметить многопараметрическую связь между координатами объекта. В качестве альтернативы, позволяющей упростить математическое описание такого нечеткого объекта, предложено использовать пространственные функции принадлежности [25, 60, 62, 135]. Одним из возможных вариантов технической реализации нечеткой системы управления технологическим объектом, в математическом описании которого используются пространственные функции принадлежности в [42, 61], предложено использовать нейронечеткую систему с переключениями.

Актуальность рассмотренной технологии 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. Однако такой подход не отличается универсальностью, и приемлем только для объектов, характеризующихся дискретизацией процесса управления.

В данной 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 [135, 42].

Для разработки управления системы будет использовано моделирование технологического процесса и непрерывно-детерминированный подход [82, 91, 109].

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 одновременно от двух параметров: задающего сигнала и энергопотребления. Данную зависимость, формируемую набором параметров независимых друг от друга функционально, можно интерпретировать пространственными функциями принадлежности, приведенными на рисунке 5.1 (на основе стандартных функций принадлежности аппроксимированного вида).

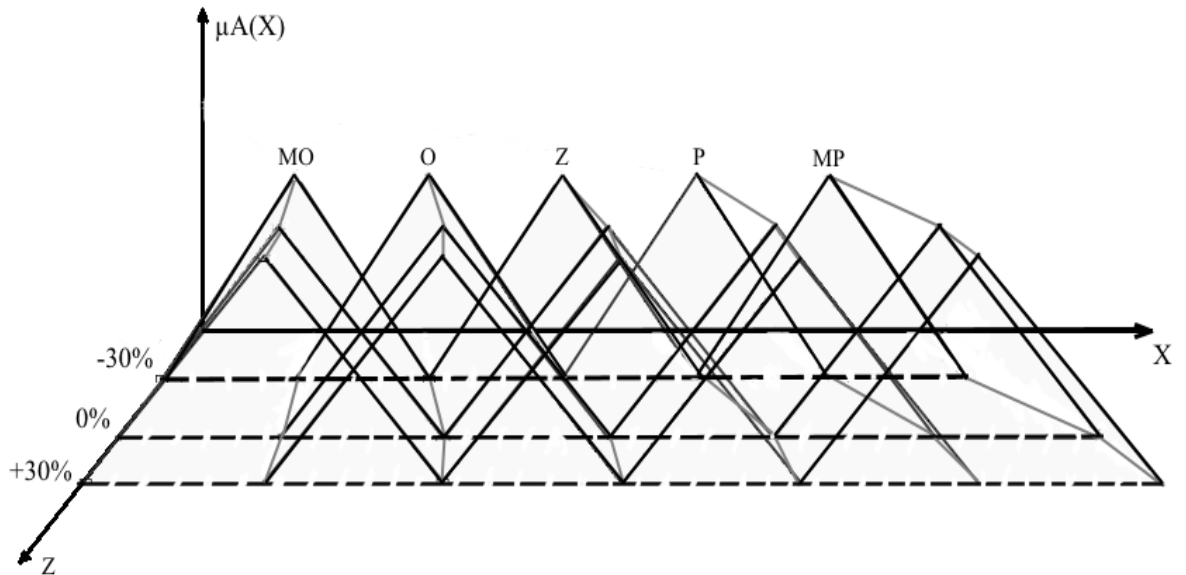


Рисунок 5.1 – Расположение пространственных функций принадлежности в заданном диапазоне регулирования.

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 [42, 60, 135]. При таком подходе переключение между элементами такой пространственной функции происходит 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 механизма вывода Сугено, так и в непрерывном варианте при условии использования регулятора Мамдани.

Структура нечеткой системы управления некоторым абстрактным технологическим объектом может быть представлена в виде, показанном на рисунке 5.2.

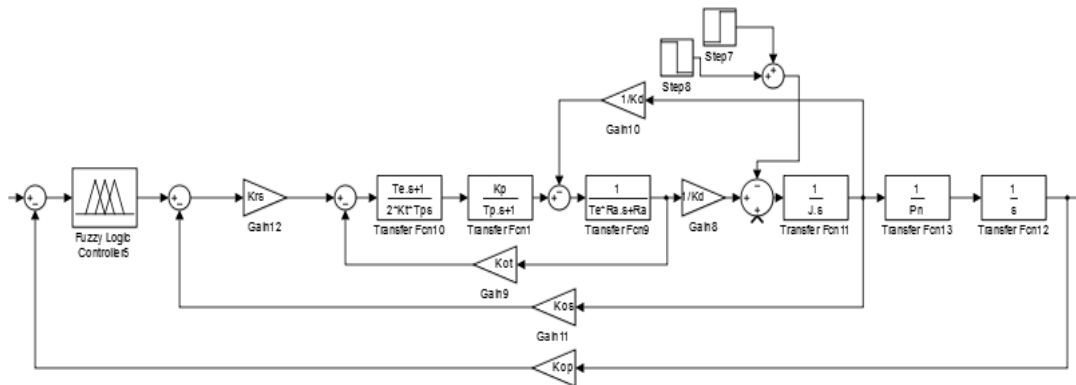


Рисунок 5.2 – Структурная схема нечеткой системы управления технологическим объектом.

Выбор области определения лингвистических переменных нечеткого регулятора проще всего выполнить на основании изменения входных и выходных сигналов классического регулятора. Кроме того, в заданной области определения лингвистической переменной распределен набор нечетких термов с пятью аппроксимированными функциями принадлежности треугольной формы.

В соответствии с формулой (22), для реализации модели регулятора, основанного на мягких вычислениях и оперирующего функциями принадлежности пространственной формы, необходимо реализовать имитационную модель сложной многокаскадной нечеткой системы, состоящей из набора элементарных регуляторов с механизмом Мамдани, имеющих единственные лингвистические переменные на входе и выходе, и интеллектуальное переключающее устройство на основе алгоритма нечеткого вывода Сугено, обладающее единственной лингвистической переменной на входе и целым набором информационных выходов [292, 293].

При моделировании основных параметров нечетких модулей вложенного каскада развитой интеллектуальной системы необходимо учитывать, тот фактор, что один внутренний регулятор должен обеспечивать управление системой в номинальном диапазоне регулирования, а второй регулятор - в расширенном на 30%.

При этом базу знаний при использовании продукционной системы представления знаний с консеквент выводимой структурой можно представить следующим набором, который остается постоянным для всех нечетких модулей внутреннего каскада:

Если «ошибка системы» есть Z, то «управляющее воздействие» есть Z;

Если «ошибка системы» есть MP, то «управляющее воздействие» есть MP;

Если «ошибка системы» есть P, то «управляющее воздействие» есть P;

Если «ошибка системы» есть O, то «управляющее воздействие» есть O;

На основании выражения (22), регулятор реализующий внешний каскад должен обеспечивать выбор и плавное переключение с одного внутреннего

модуля на другой. Основной функцией внешнего интеллектуального переключающего устройства является сканирование состояния предметной области и объединение набора стандартных функций принадлежности в пространственную форму. Структурно такое переключающее устройство будет состоять из нечеткого логического регулятора Сугено нулевого порядка и набора элементов умножения (рис 5.3).

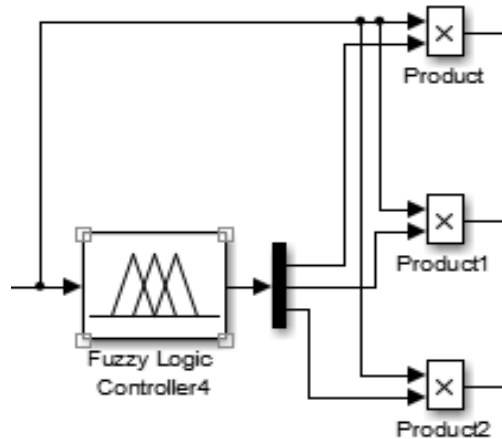


Рисунок 5.3 – Модель интеллектуального переключающего устройства.

Функциональная схема НЛР, показанная на рисунке 5.4, выполняет анализ сигнала ошибки системы управления, единственный вход формализуется лингвистической переменной «*input1*», выход регулятора содержит набор из трех лингвистическими переменными «*output1*», «*output2*», «*output3*». В основе функционирования данного интеллектуального переключающего устройства применяется алгоритм нечеткого логического вывода Сугено.

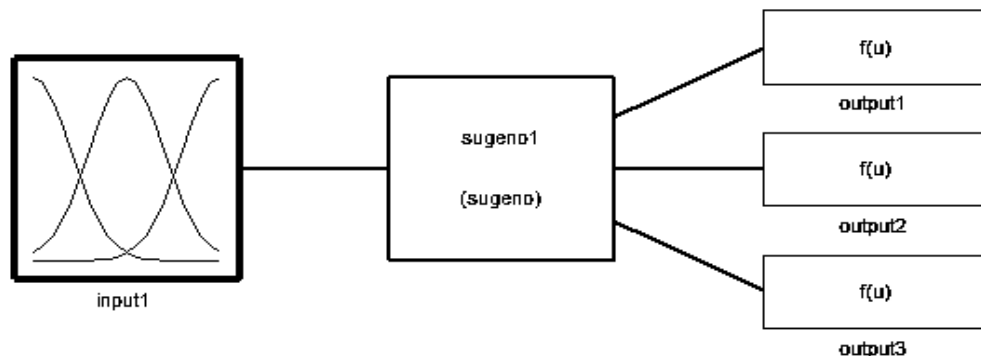


Рисунок 5.4 – Функциональная схема нечеткого логического регулятора.

Единственная входная лингвистическая переменная соответствует первому входному сигналу нечеткого регулятора и формализует понятия «сигнал ошибки отработки выходной координаты». Область определения заданной интервалом $[0; 10,4]$ распределены три элемента базового термножества входной лингвистической переменной, которые описываются аппроксимированными функциями принадлежности трапециевидной формы. Одна из выходных лингвистических переменных $output1$ задает понятие «сигнал управления модулем1» выходного сигнала нечеткого регулятора с область определения заданной диапазоном $[0;1]$. С учетом применяемого механизма нечеткого вывода базовое термножество лингвистической переменной будет состоять из двух констант: $T = \{ Z,P\}$, где $Z = 0$ и $P=1$.

База нечетких импликационных правил нечеткого регулятора Сугено формирующего внешний управляющий каскад будет содержать набор из трех элементов. Главной особенностью такой базы является наличие конъюнктивных связей в консервантах управляющих премил.

Если «input1» есть Z , то «output1» = 0, «output2» = 1, «output3» = 0;

Если «input1» есть P , то «output1» = 1, «output2» = 0, «output3» = 0;

Если «input1» есть MP , то «output1» = 0, «output2» = 0, «output3» = 1.

Модель интеллектуальной системы управления технологическим процессом построенной с применением предложенного выше структурного решения, основанного на многокаскадной нечеткой системе, оперирующей с пространственными функциями принадлежности представлена на рисунке 5.5.

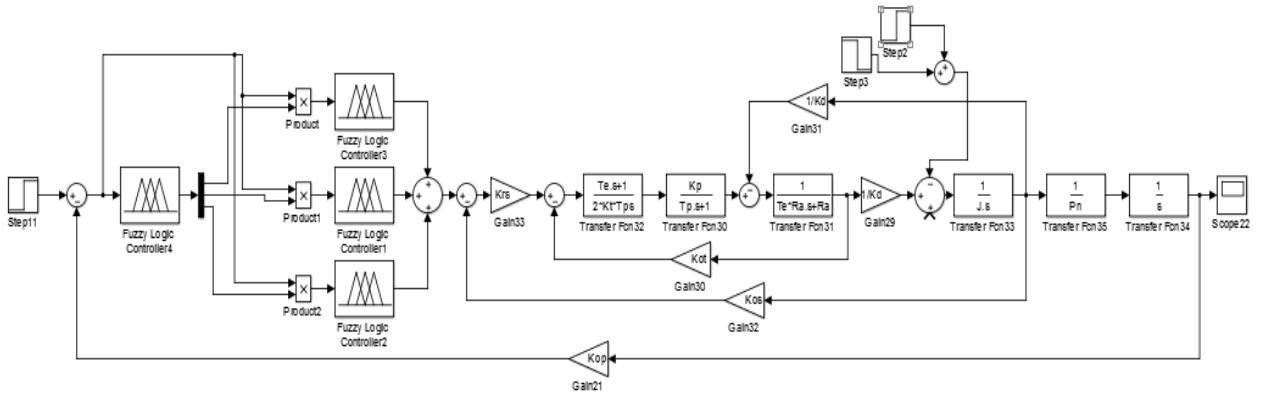
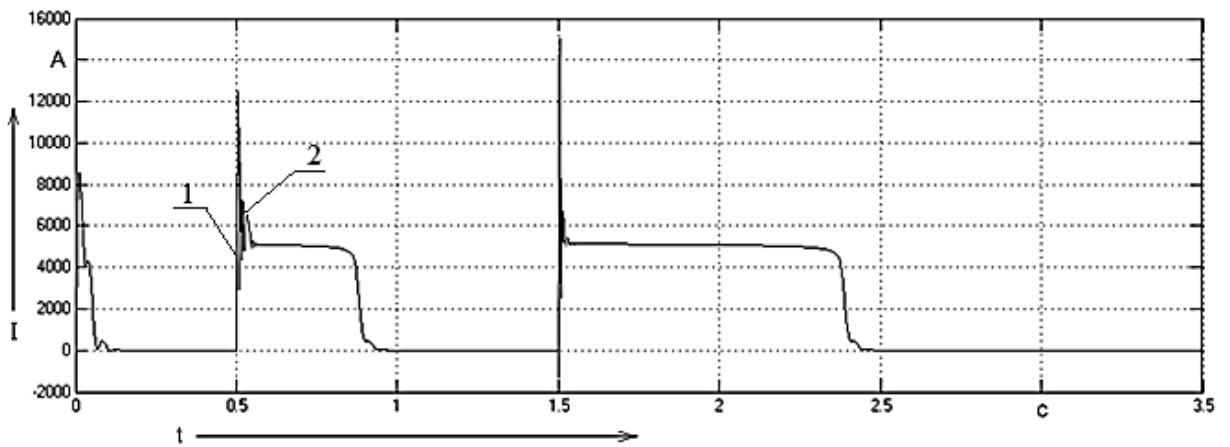


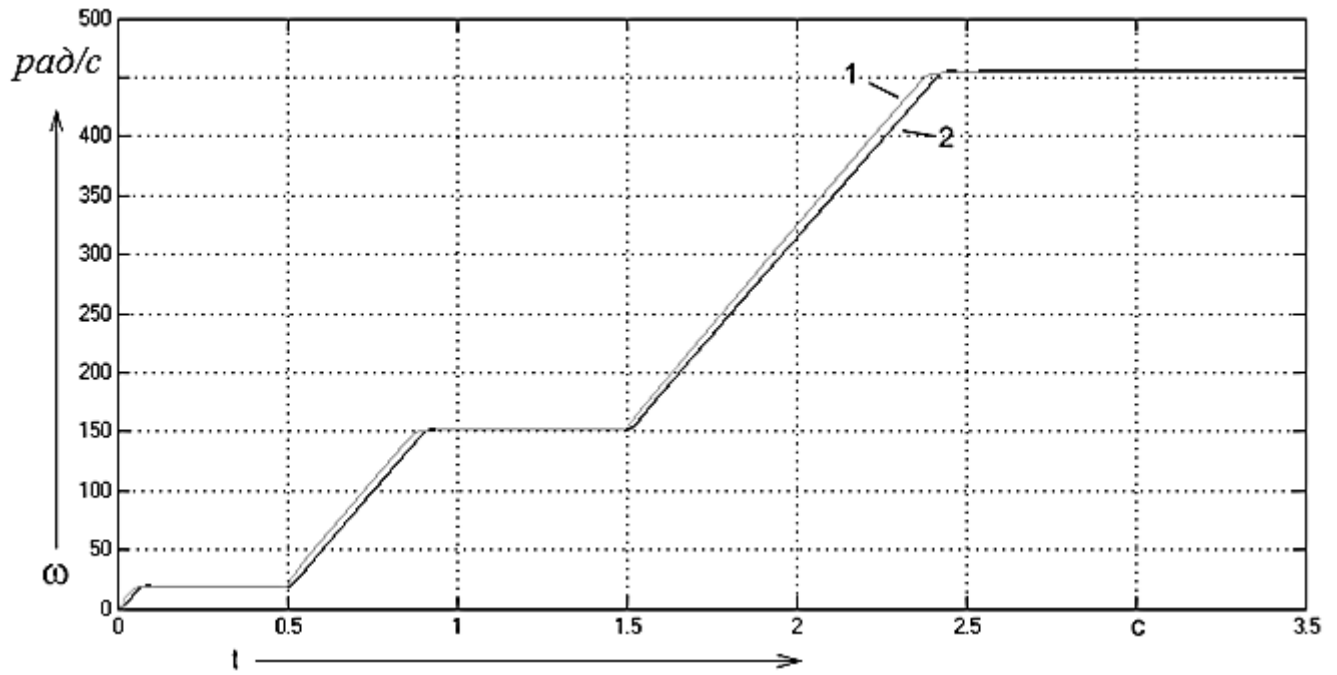
Рисунок 5.5 – Модель интеллектуальной системы управления с МНЛР.

Анализ работоспособности системы проводился при обработке задающего сигнала, имеющего резко переменную форму на имитационной модели системы управления технологическим процессом приведенной выше. На рисунках 5.6 - 5.8 представлены результаты моделирования полученной развитой нечеткой системы управления.



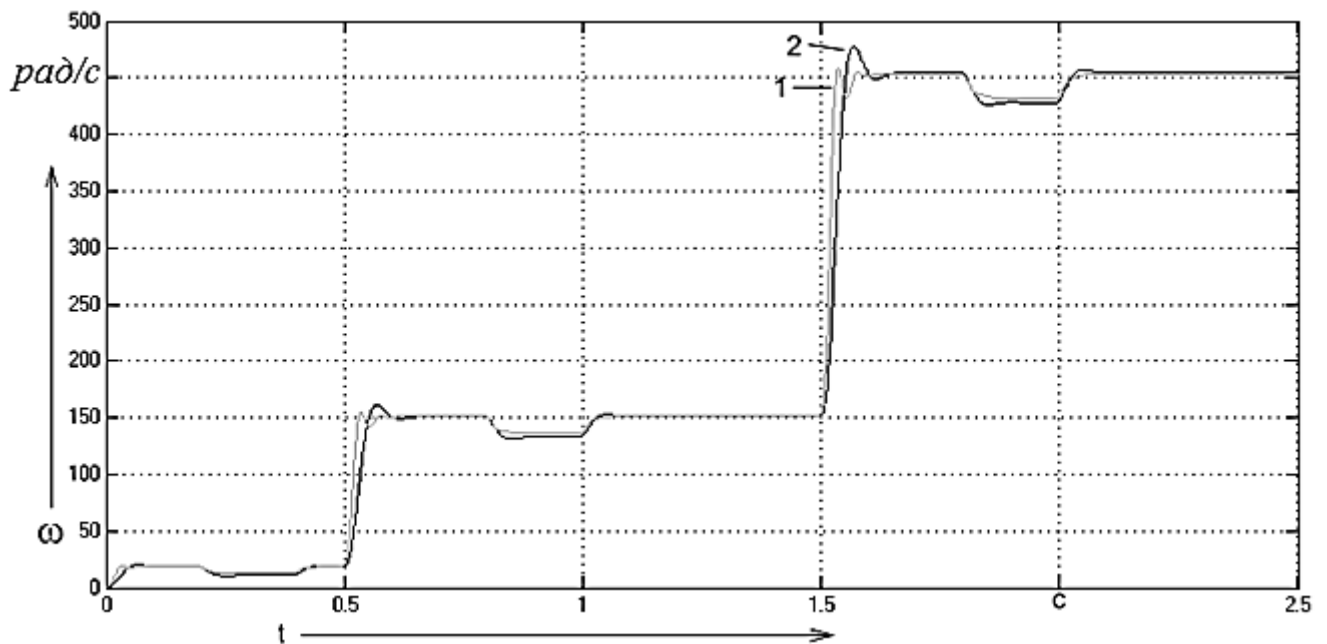
1. - интеллектуальная система, 2. - классическая система.

Рисунок 5.6 – Динамические характеристики координаты внутреннего контура.



1. - интеллектуальная система, 2. - классическая система.

Рисунок 5.7 – Динамические характеристики в системе при обработке сигнала задания, имеющего резко переменный характер.



1. - интеллектуальная система, 2. - классическая система.

Рисунок 5.8 – Динамические характеристики в системе управления при действии внешнего возмущающего воздействия.

Таким образом, на основе многокаскадного нечеткого регулятора получим функции принадлежности пространственной (рис. 5.9).

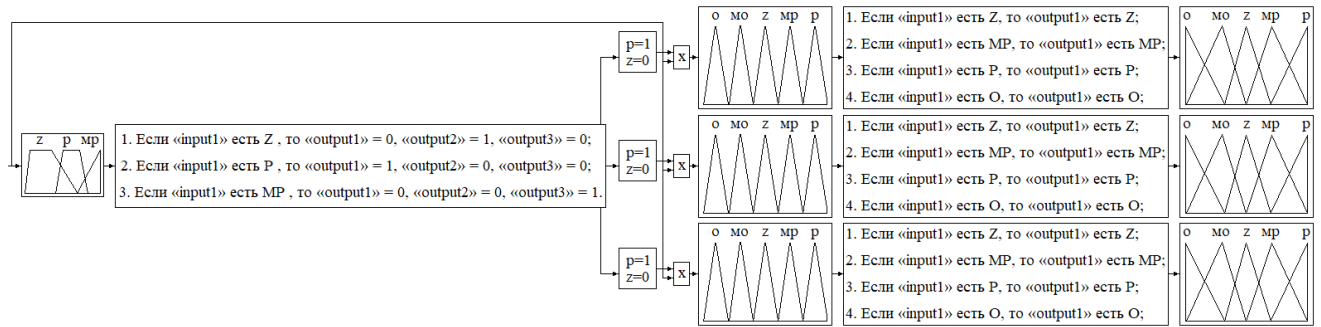


Рисунок 5.9 – Функциональная схема МНЛР с пространственными функциями принадлежности.

На основании всего сказанного выше, можно сделать вывод, что основным преимуществом многокаскадной нечеткой системы управления является ее адаптивность и робастность по целому ряду как внешних, так и внутренних возмущающих воздействий, зачастую носящих недетерминированный характер. Такие свойства нечетких систем управления технологическими процессами позволяют объединять их в более сложные конструкции, позволяющие решать задачи управления, для объектов, имеющих существенное количество координат со сложными внутренними связями.

Для сложных технологических процессов характеризуемых достаточно большим количеством координат, зависимость которых между собой зачастую определяется в виде неоднозначного отображения целесообразно реализовать интеллектуальную систему управления, оперирующую функциями принадлежности пространственной формы. Например, объектом управления такого типа является процесс пиролиза, протекающий в мобильной углевыжигательной печи (глава 6, рисунок 6.1).

При реализации управления, таким технологическим процессом, стандартно контролю подвергается соотношение температуры у пода и свода установки, количество отводимых газов. Кроме того, на систему

накладывается ряд ограничений, например, нагрев происходит равномерно по всей площади пода, материал сугливания представляет собой однородный куб заданной плотности, теплота сгорания древесины и ее влажность одинакова по всему объему. Соотношение ряда указанных параметров выразить функционально не представляется возможным, при этом их степень влияния на качество конечного продукта и длительность технологического процесса весьма существенны. В таких случаях взаимное влияние ряда параметров переводится в область нечетких отношений.

Параметры технологического процесса, такие как теплота сгорания топлива, можно описать только на основании множества факторов, среди которых можно выделить: породу древесины, сортность, жаропроизводительность, влажность, плотность загрузки и т.п. Таким образом, в координатной системе можно определить базовое терм-множество «Теплота сгорания» $T[N^-, N, N^+]$. Значения термов лингвистически соответствуют выражениям N – удельная теплота сгорания древесины преобладающей породы, N^- - сниженная теплота сгорания древесины (высокая влажность сырья), N^+ - повышенная теплота сгорания древесины (наличие элементов с повышенной жаропроизводительность в объеме сугливания). Количество и форма функций принадлежности пространственной формы определяется экспертно и зависят от качества исходного сырья и аппаратной реализации многокаскадного нечеткого регулятора. Учет соотношения указанных параметров в базовом терм-множестве T может быть учтен введением дополнительной вложенности. В рассматриваемом случае, отображение функций принадлежности можно изобразить в представить в пространственной форме, распределение которых показано на рисунке 5.10.

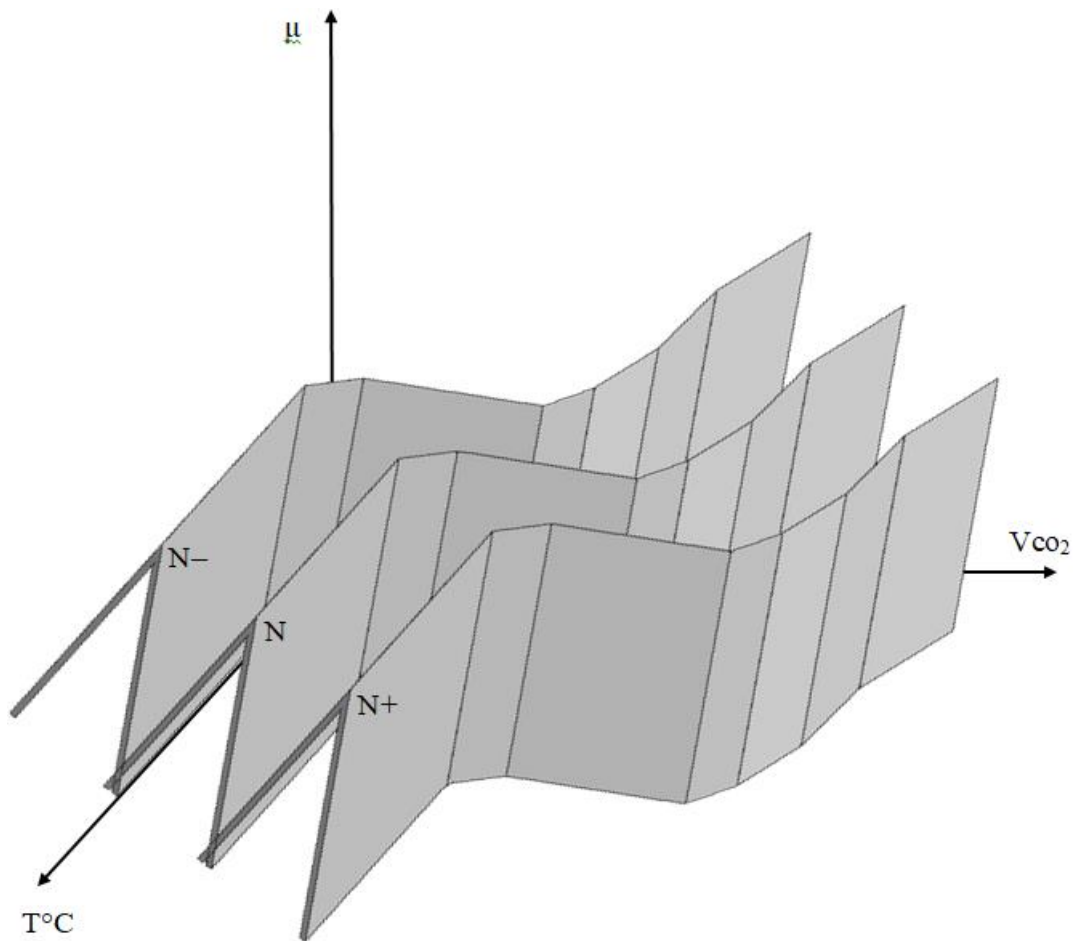


Рисунок 5.10 – Распределение пространственных функций принадлежности

Оперирование информацией функций принадлежности пространственной формы, реализация механизма вывода, очевидно, требуют специального подхода с применением дополнительного инструментария, описание и использование которого выходит за рамки данной диссертационной работы.

Выводы по пятой главе

Впервые предложенный алгоритм формирования нечетких логических регуляторов позволяет сформировать выходные функции принадлежности в многомерном пространстве. Выше показаны возможности развитой интеллектуальной системы на базе теории нечетких множеств по формированию таких функций в трехмерном пространстве. При реализации подобных модулей в гиперпространственной форме необходимо либо увеличение степени вложенности, либо внедрения в модули внутреннего каскада дополнительных выходных лингвистических переменных, что приведет к определенным сложностям в их представлении и как следствие синтезе и настройке.

Необходимо отметить, что предложенный автором подход обладает рядом ограничений, основными из которых являются алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани для всех вложенных модулей, подобие реализации их блоков дефаззификации, особенно в части типа и распределения выходных функций принадлежности, а также однотипность построения базы нечетких продукционных правил вложенных модулей.

Реализация моделей многокаскадных нечетких систем с помощью предложенной методики для формирования интеллектуальных регуляторов с пространственной формой функций принадлежности позволяет применять стандартное программное обеспечение и общепринятые языки инженерных вычислений.

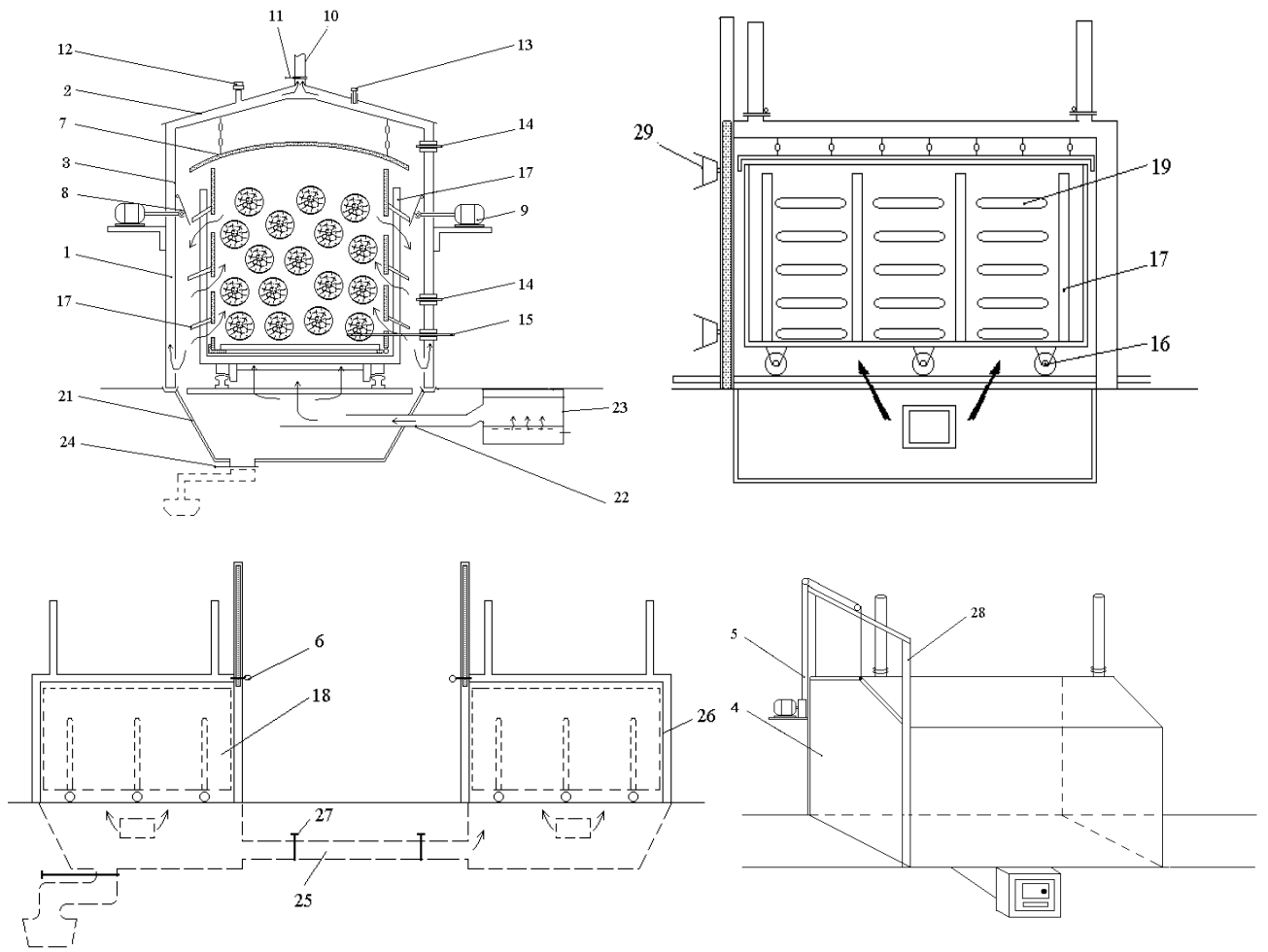
Глава 6 Построение многокаскадных нечетких логических регуляторов с гомогенной и гетерогенной структурой

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.

Процессы, протекающие в пиролизных установках мобильного типа, представляют собой сложные процессы, которые можно охарактеризовать как существенно нестационарные и нелинейные. Постоянный дрейф параметров в сочетании с наличием большого количества элементов с транспортным запаздыванием затрудняют процесс реализации управляющих процедур. Применение многокаскадного регулирования с применением гетерогенной структуры внутреннего каскада позволит сформировать необходимые законы регулирования с учетом целого ряда внешних и внутренних возмущающих воздействий детерминированного и недетерминированного характера.

Объектом регулирования является пиролизная установка мобильного типа, показанная на рисунке 6.1. Технологический процесс пиролиза древесины можно охарактеризовать, как сложный теплообмен, формализуемый математически системой дифференциальных и интегродифференциальных 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 [134, 141].



1 – межкорпусное пространство; 2 – внешний кожух; 3 – корпус; 4 – дверь; 5 – подъемное устройства; 6 – пальцы; 7 – отражатель; 8 – подвижные шторы; 9 – электродвигатель; 10 – отводная труба; 11 – задвижка; 12 – клапан; 13 – датчик газа; 14- термодпары; 15 – щуп; 16 – тележка; 17 – стойки; 18 – контейнер; 19 – технологические отверстия; 20 – неподвижные шторы; 21 – сборник; 22 – подводная труба; 23 – топка; 24 – задвижки; 25 – соединительная труба; 26 – исполнение с двумя печами; 27 – задвижка; 28 – направляющие; 29 – протяжные штурвалы.

Рисунок 6.1 – Мобильная углевыжигательная установка.

Система уравнений, позволяющая описать процессы [59, 64, 67, 69, 74], протекающие в мобильной установке пиролиза древесины в общем случае основывается на некоторых ограничениях связанных с отсутствием возмущающих воздействий, как внешнего, так и внутреннего характера, требующих существенной адаптации к условиям внешней среды.

Следовательно, для реализации адекватного математического описания процессов, протекающих внутри технологического процесса пиролиза с реализацией интеллектуальных алгоритмов управления, необходимо учитывать целый ряд ограничений и допущений. При непосредственной реализации математической модели затруднительно учитывать наличие существенного количества элементов, входящих в структуру объекта регулирования, и сложность внутренних связей между этими элементами, присутствие внутренних источников тепла (результат экзотермической реакции на определенном этапе процесса пиролиза). Таким образом, учесть наличие целого ряда факторов в таких сложных нелинейных технологических объектах не представляется возможным, даже с учетом современного развития методов и средств моделирования, как аппаратных, так и программных.

Математическое описание объекта управления представлено в виде структурной схемы [114], показанной на рисунке 6.2 и имеет ряд допущений

- все дно камеры является источником тепла с равномерным распределением теплового потока по всей площади;
- сплошной однородный параллелепипед является объектом сугливания и обладает постоянными значениями плотности и коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости;
- термические сопротивления между контактными поверхностями внутри установки отсутствуют.

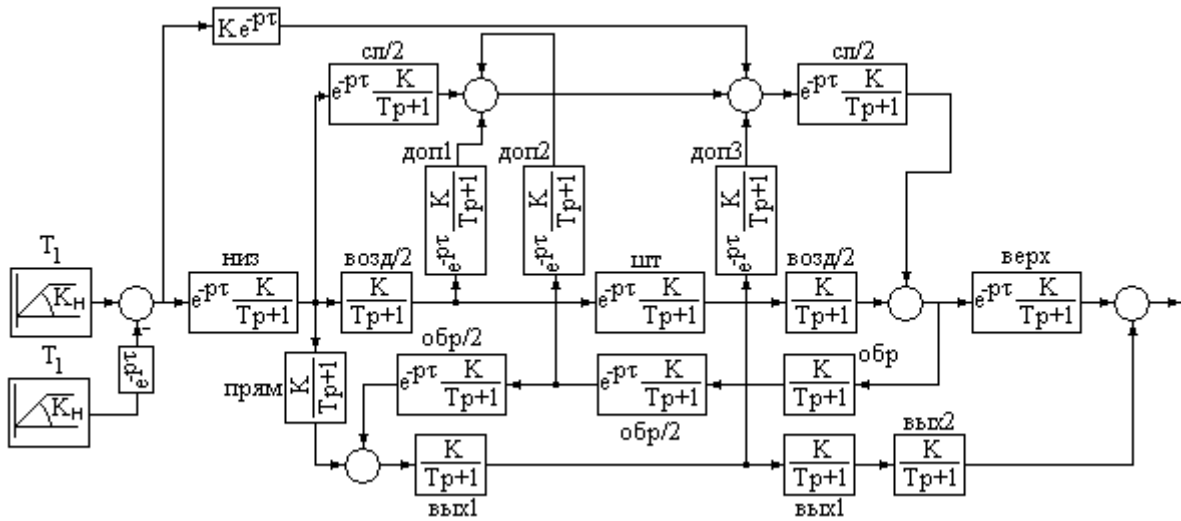


Рисунок 6.2. – Структурная схема пиролизной установки мобильного типа.

На структурной схеме приняты следующие обозначения: низ – элемент моделирующий распределение температуры у пода пиролизной установки, верх – элемент, моделирующий распределение температуры у пода пиролизной установки, возд/2 – распределение тепловых полей в воздушных зазорах между контейнером с сырьем и подом и сводом установки, шт – элемент моделирующий объем загруженного сырья, канал состоящий из звеньев прям, вых1, вых2 соответствует теплопередаче от конвективных потоков при их движении вверх от пода установки к ее своду, канал образованный набором элементов обр, обр/2 – моделирует процесс передачи тепла от конвективных потоков перемещающихся внутри камеры сгорания от свода установки к ее поду, элементы доп1 – доп3, сл/2 – моделируют процессы передачи тепла от конвективных потоков, а также от внутренних источников экзотермической реакции.

Модель технологического процесса, представленная на рис. 6.2, показывает связи и направления взаимодействия тепловых потоков и элементов системы, что позволяет получить необходимые параметры и характеристики в заданных узлах в любой момент времени [7, 8, 319]. Результаты моделирования показаны на рис. 6.3

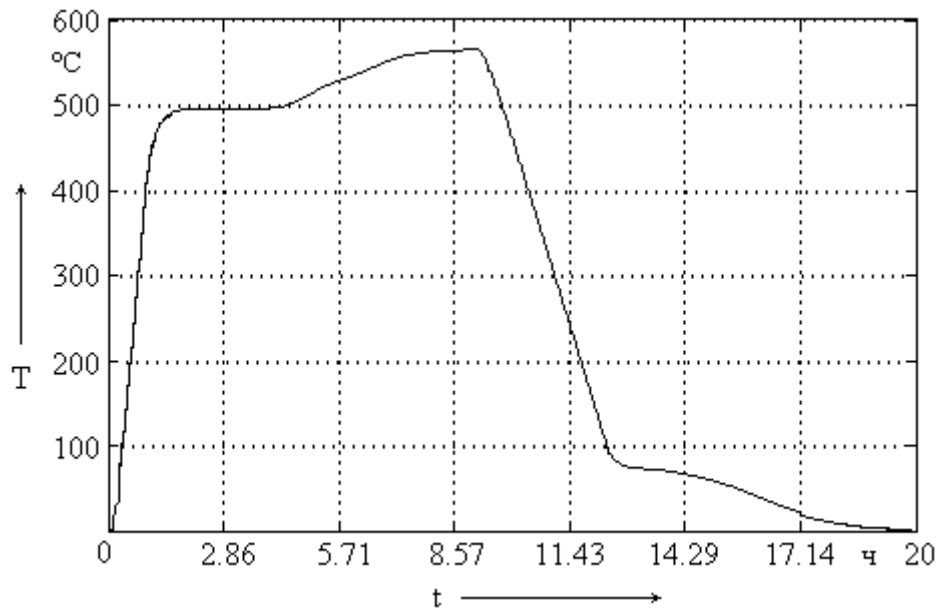


Рисунок 6.3 – Динамические характеристики процесса пиролиза.

На представленном графике переходного процесса можно увидеть ряд характерных областей, обусловленных особенностями самого технологического процесса. На начальном этапе наблюдается наличие некоторого запаздывания, которое связано с начальным поглощением тепла, как самой установкой, так и некоторым объемом сырья, находящегося внутри камеры сгорания. Еще одной характерной точкой на рисунке является точка возникновения внутреннего источника тепла, что является следствием экзотермической реакции и воспламенением сырья по всему объему сугливания. Следующей характерной зоной является процесс остывания, который характеризуется плавным падением температуры всех элементов технологического процесса.

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 (горизонтальные участки рис 6.2).

Интеллектуальная система управления с использованием многокаскадного нечеткого логического регулятора может быть построена следующим образом (рис. 6.4)

На структурной схеме 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. На структурной схеме рис. 6.4 элементы шт1 и шт2 соответствуют управляющим шторам, внедренным в стенки контейнера с сырьем [60].

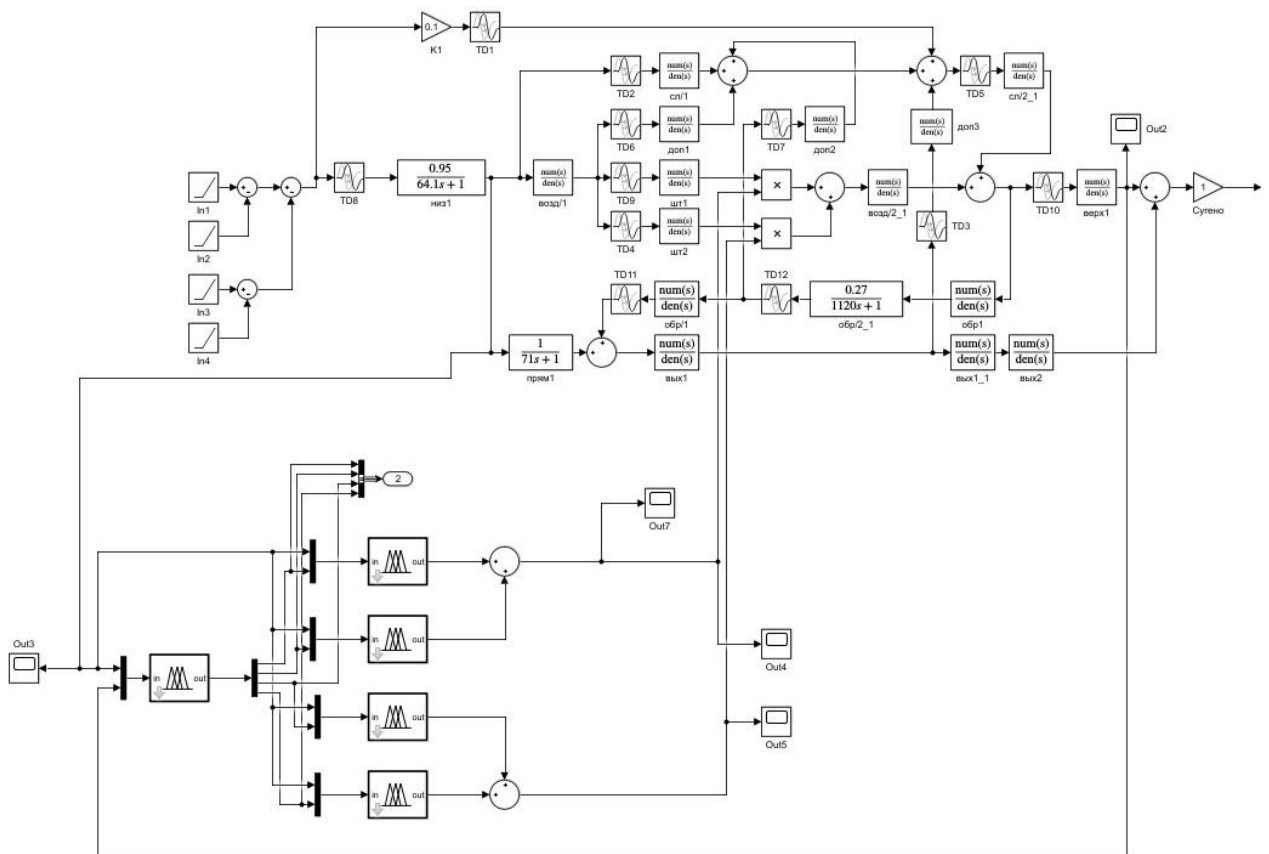


Рисунок 6.4 – Структурная схема интеллектуальной системы управления пиролизной установкой мобильного типа.

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: первая – стабилизация температуры у пода печи, а именно ее «выравнивание», и вторая – 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 (рис. 6.1). Функции, возлагаемые на нечеткий модуль с алгоритмом вывода Сугено, связаны с большими перемещениями штор контейнера дискретно, а модули, использующие алгоритм вывода Мамдани, за малые изменения угла поворота – плавно.

Структурно модели многокаскадных нечетких логических регуляторов, в зависимости от выбранного механизма нечеткого логического вывода во внешнем каскаде, могут быть реализованы, как показано на рис. 6.5 и 6.6.

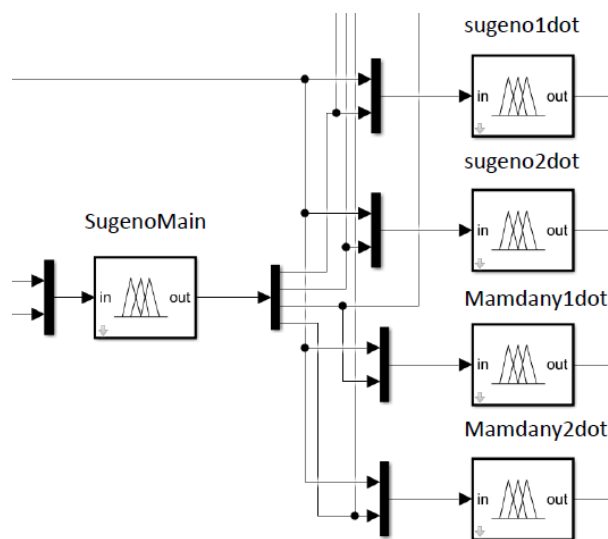


Рисунок 6.5 – Структурная схема многокаскадного МНЛР с алгоритмом вывода Сугено во внешнем каскаде.

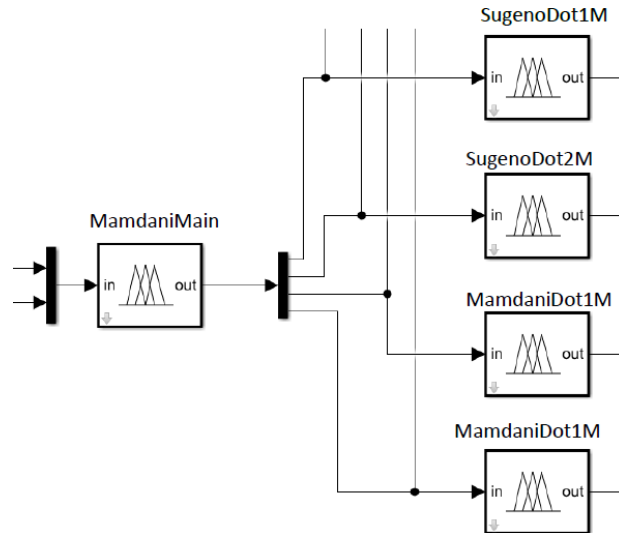


Рисунок 6.6 – Структурная схема МНЛР с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде.

Имитационная модель внешнего каскада нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани (рис 6.6) показана на рисунке 6.7. Блок фаззификации реализуется на основе двух лингвистических переменных, содержащих по пять нечетких термов в базовом термножестве, механизм нечеткого вывода организован набором продукционных правил в количестве семи. Дефаззификация выходных переменных формируется четырьмя лингвистическими переменными аналогичного вида с пятью термами треугольного вида каждая.

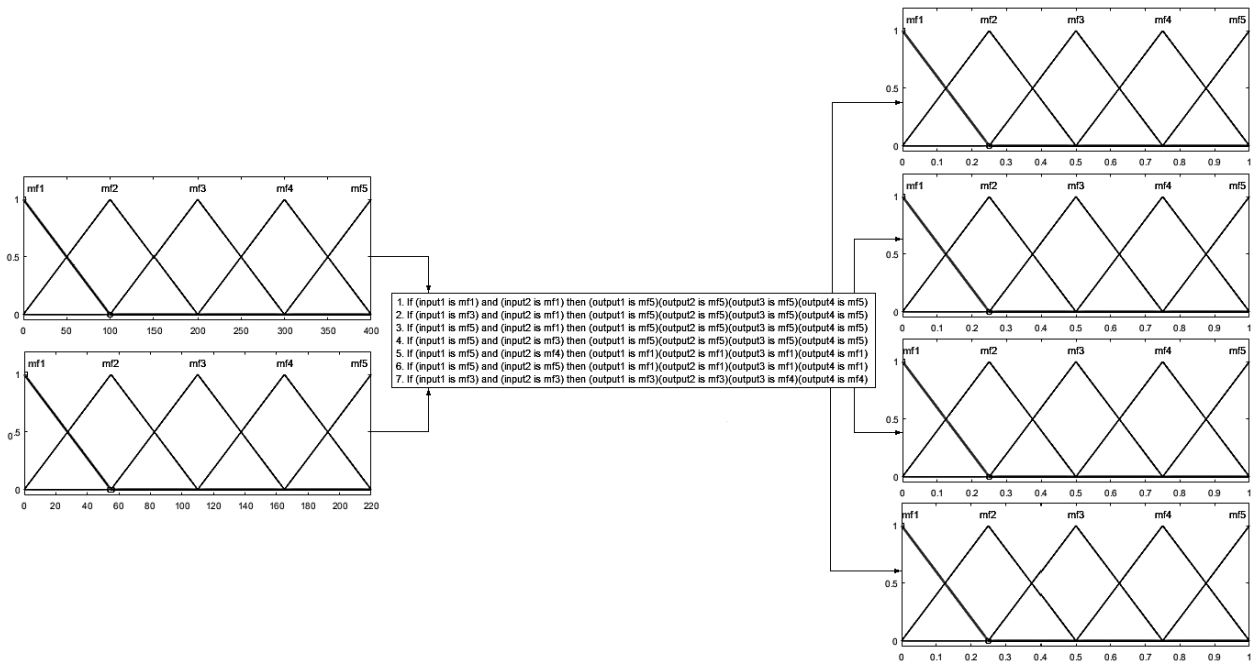


Рисунок 6.7 – Функциональная схема МНЛР с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде.

Имитационная модель внешнего каскада нечеткого логического регулятора показана на рисунке 6.7. Блок фаззификации реализуется на основе двух лингвистических переменных, содержащих по пять нечетких термов в базовом терм-множестве, механизм нечеткого вывода организован набором продукционных правил в количестве семи. Дефаззификация выходных переменных формируется четырьмя лингвистическими переменными аналогичного вида с пятью термами треугольного вида каждая.

Внутренний каскад содержит набор простейших нечетких модулей, которые построены на основании алгоритмов вывода Сугено и Мамдани, и содержат по одной лингвистической переменной на входе и выходе соответственно. Подключение простейших модулей к внешнему управляющему каскаду осуществляется попарно. Функциональные схемы нечетких регуляторов, организующих внутренний каскад, показаны на рисунках 6.8 и 6.9. Все нечеткие логические регуляторы Сугено содержат одинаковый набор постоянных коэффициентов базовом терм-множестве $[-0,5; -0,25; 0; 0,25; 0,5]$

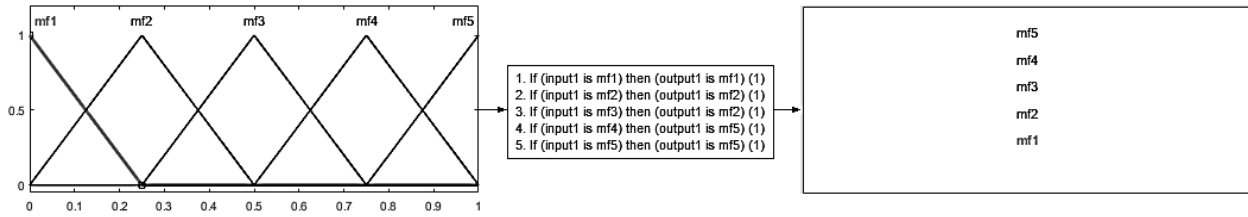


Рисунок 6.8 – Функциональная схема нечеткого регулятора Сугено первой пары внутреннего каскада.

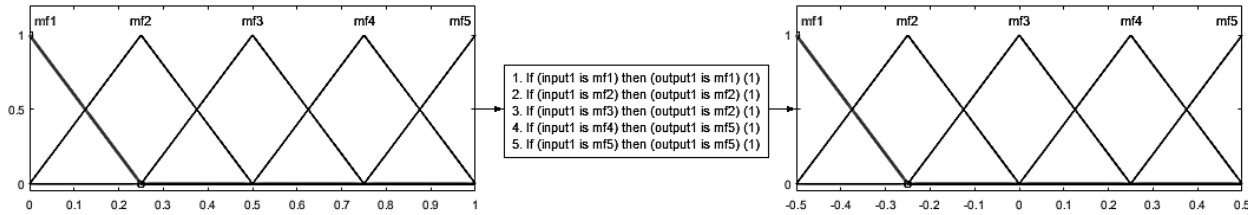


Рисунок 6.9 – Функциональная схема нечеткого регулятора Мамдани первой пары внутреннего каскада.

Настройки второй пары нечетких модулей будут аналогичны, с той лишь разницей, что процедура управления, реализуемая ими будет ориентирована на управление верхней шторой контейнера мобильной пиролизной установки (рис. 6.1). Особенности настройки гетерогенных модулей внутреннего каскада, в общем случае, могут существенно отличаться и зависеть от управляемых координат, особенностей функционирования технологического объекта, а также от выбранных критериев регулирования.

При реализации внешнего каскада развитой нечеткой системы управления технологическим процессом с использованием алгоритма вывода Сугено необходимо учитывать особенности формирования выходной переменной, введением дополнительных информационных сигналов (рис 6.3). Внешний нечеткий контроллер, с учетом текущей ситуации, возникающей в результате функционирования технологического процесса, формирует на своем выходе набор сигналов, состоящий из 0 и 1, тем самым подключая регуляторы внутреннего каскада. На рисунке 6.10 представлена

функциональная схема внешнего нечеткого контроллера с алгоритмом Сугено.

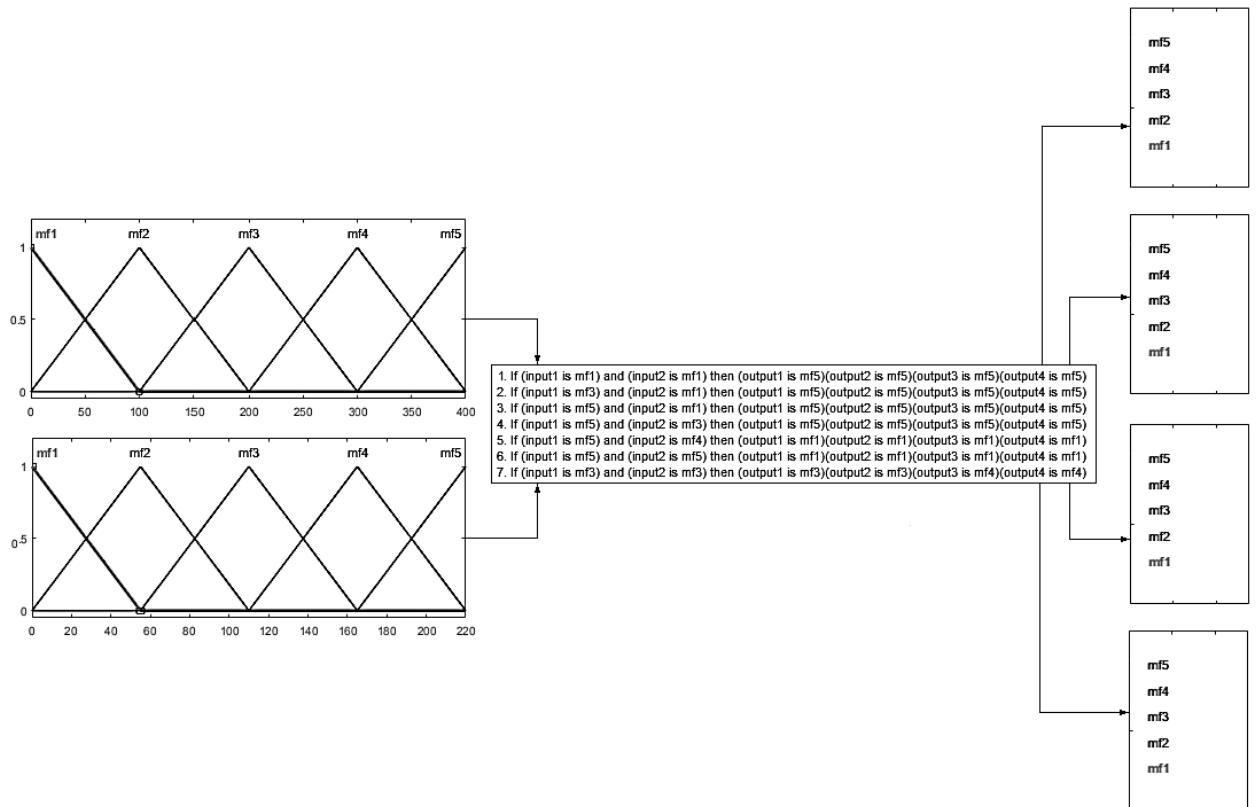


Рисунок 6.10 – Функциональная схема внешнего нечеткого контроллера с алгоритмом Сугено.

Диаграммы, иллюстрирующие сигналы управления, формируемые нечеткими контроллерами внешнего каскада с различными алгоритмами вывода, показаны на рисунках 6.11 и 6.12.

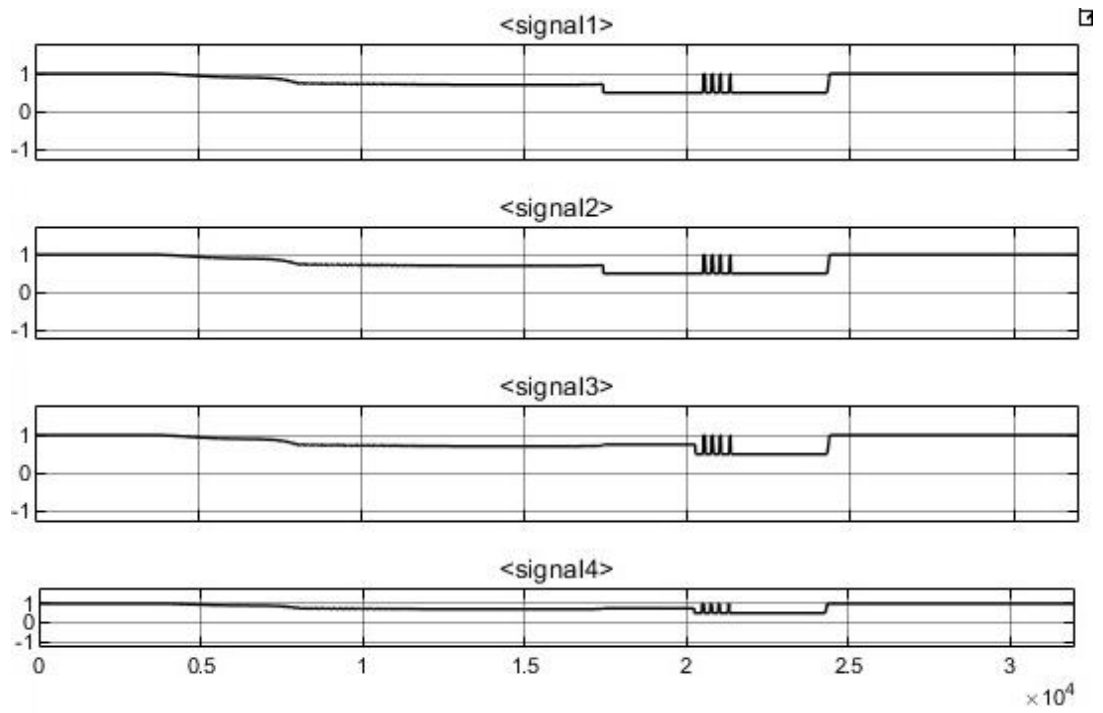


Рисунок 6.11 – Сигнал переключения сформированный внешним каскадом с алгоритмом вывода Сугено.

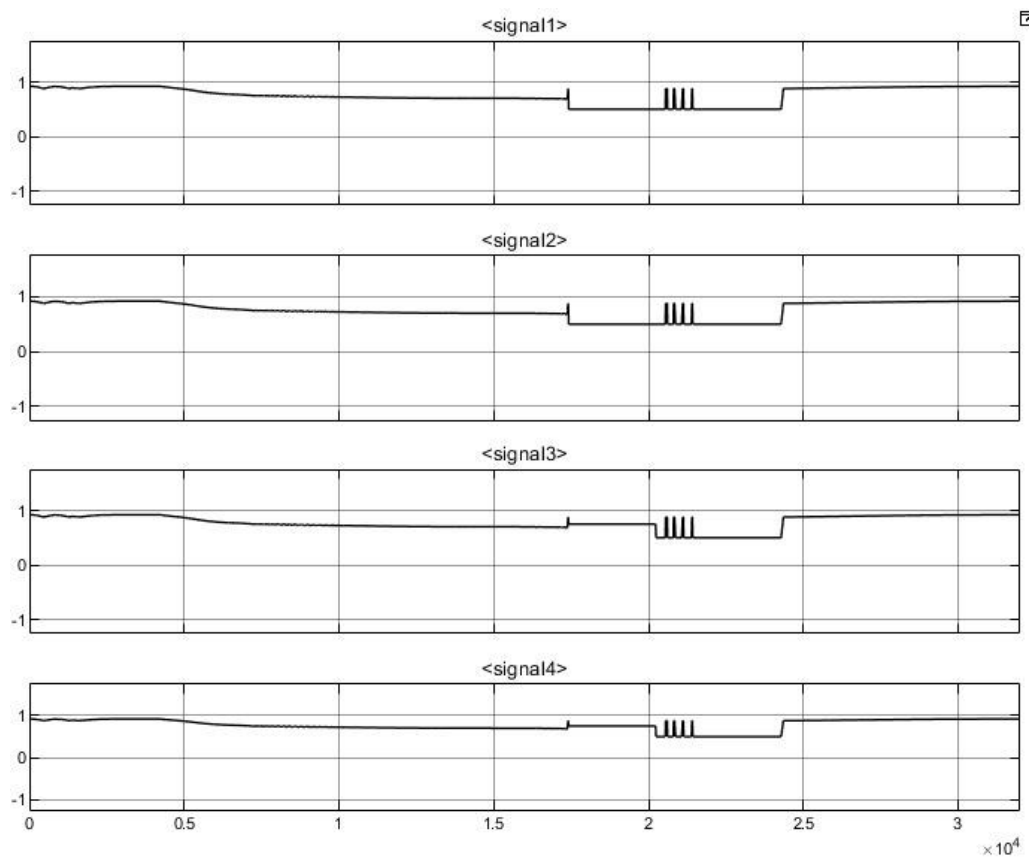
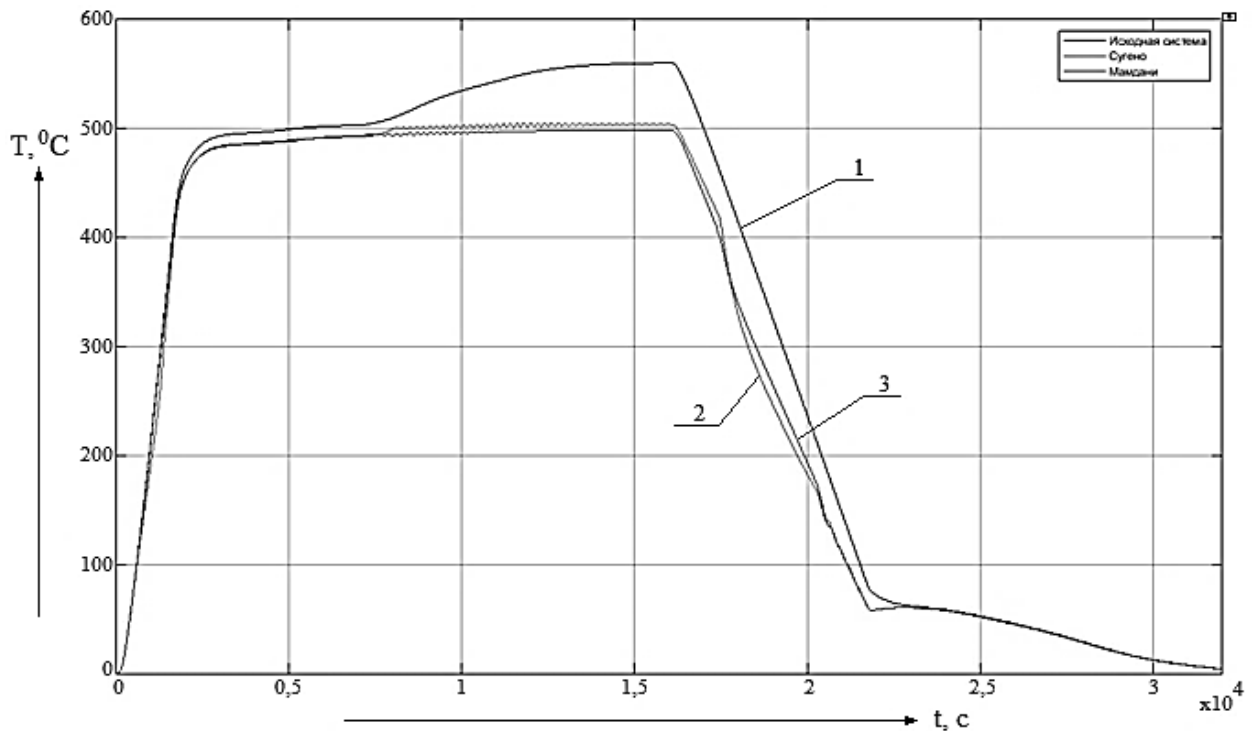


Рисунок 6.12 – Сигнал переключения сформированный внешним каскадом с алгоритмом вывода Мамдани.

Анализируя графики изменения управляющих сигналов, можно сделать выводы о том, что наблюдается подобие в поведении обеих нечетких развитых систем. Однако применение алгоритма основанного на механизме нечеткого 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 $1,7 \cdot 10^4$ с. 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 6.13 – 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.6.2) моделирующего изменения температуры пода пиролизной установки. Семейство характеристик для классической системы и интеллектуальных систем с алгоритмами вывода Сугено и Мамдани показаны на рисунках 6.11 – 6.13.

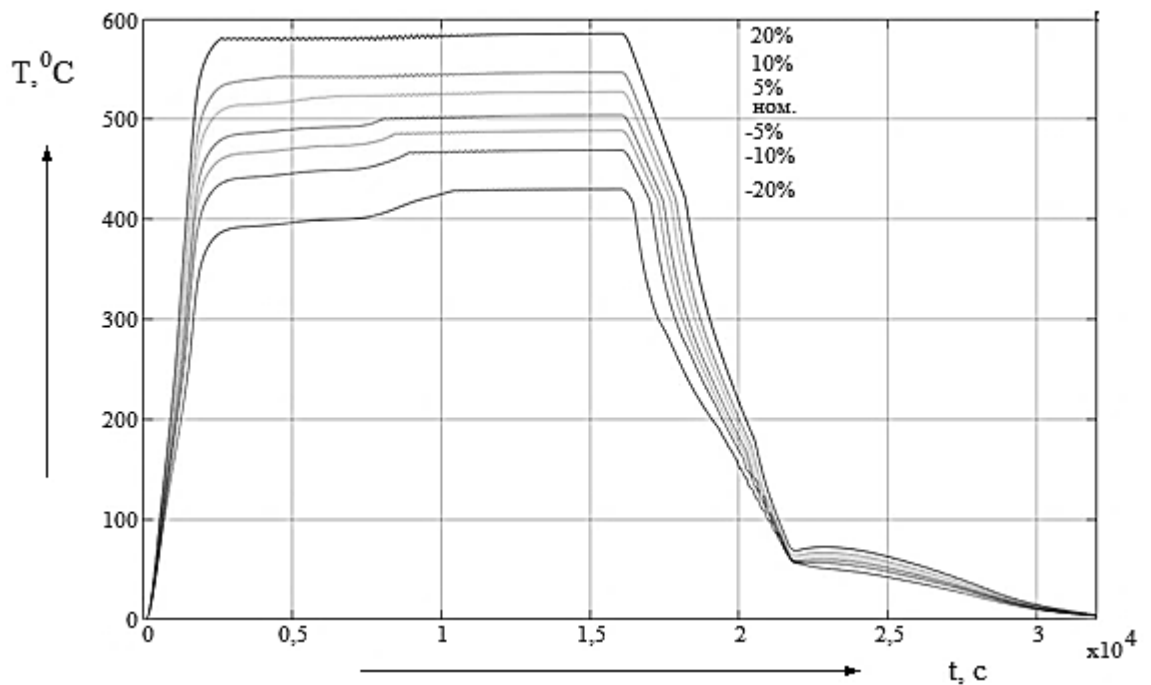


Рисунок 6.11 – Переходные процессы в системе с МНЛР с алгоритмом вывода Сугено во внешнем каскаде при изменении коэффициента усиления в пределах $[-20\%; +20\%]$ от номинального значения.

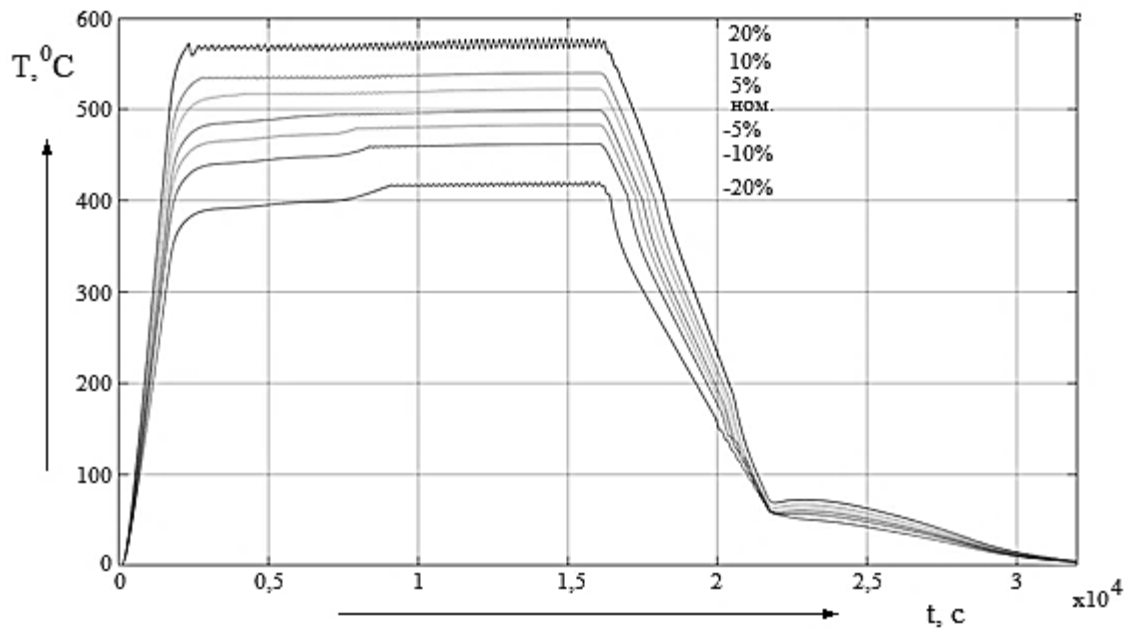


Рисунок 6.12 – Переходные процессы в системе управления с МНЛР с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде при изменении коэффициента усиления в пределах $[-20\%; +20\%]$ от номинального значения.

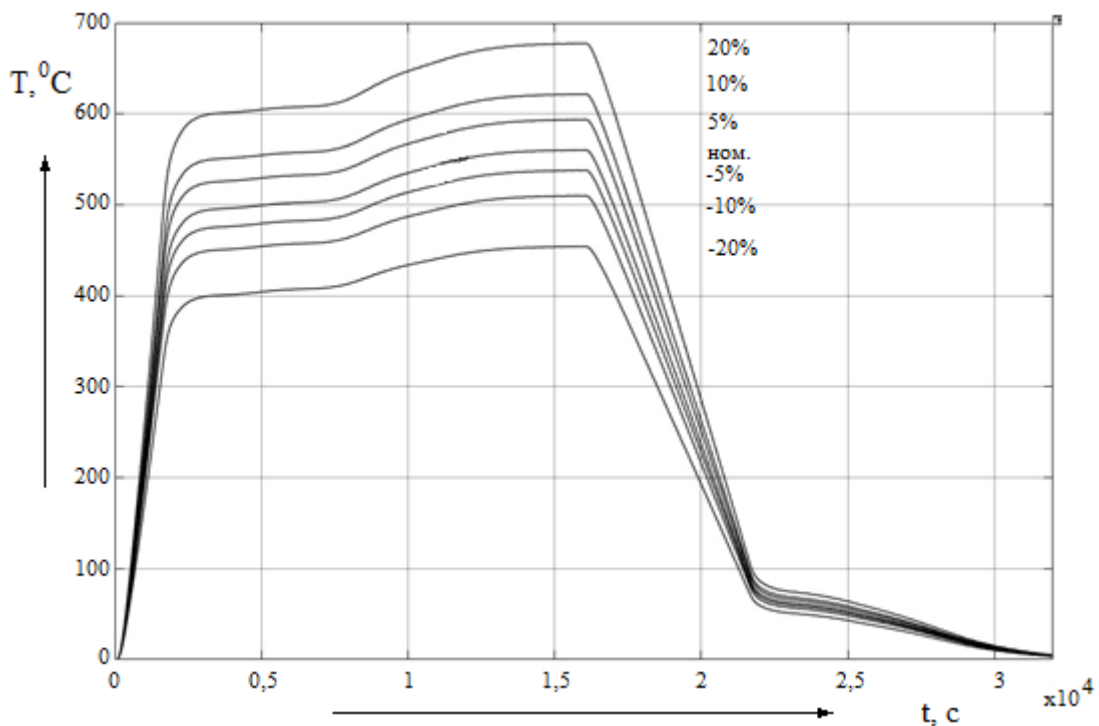


Рисунок 6.13 – Переходные процессы в классической системе при изменении коэффициента усиления в пределах $[-20\%; +20\%]$ от номинального значения.

Аналогичным образом построим семейство характеристик в системах управления технологическим процессом для различных видов организации законов регулирования (рис. 6.14 – 6.16)

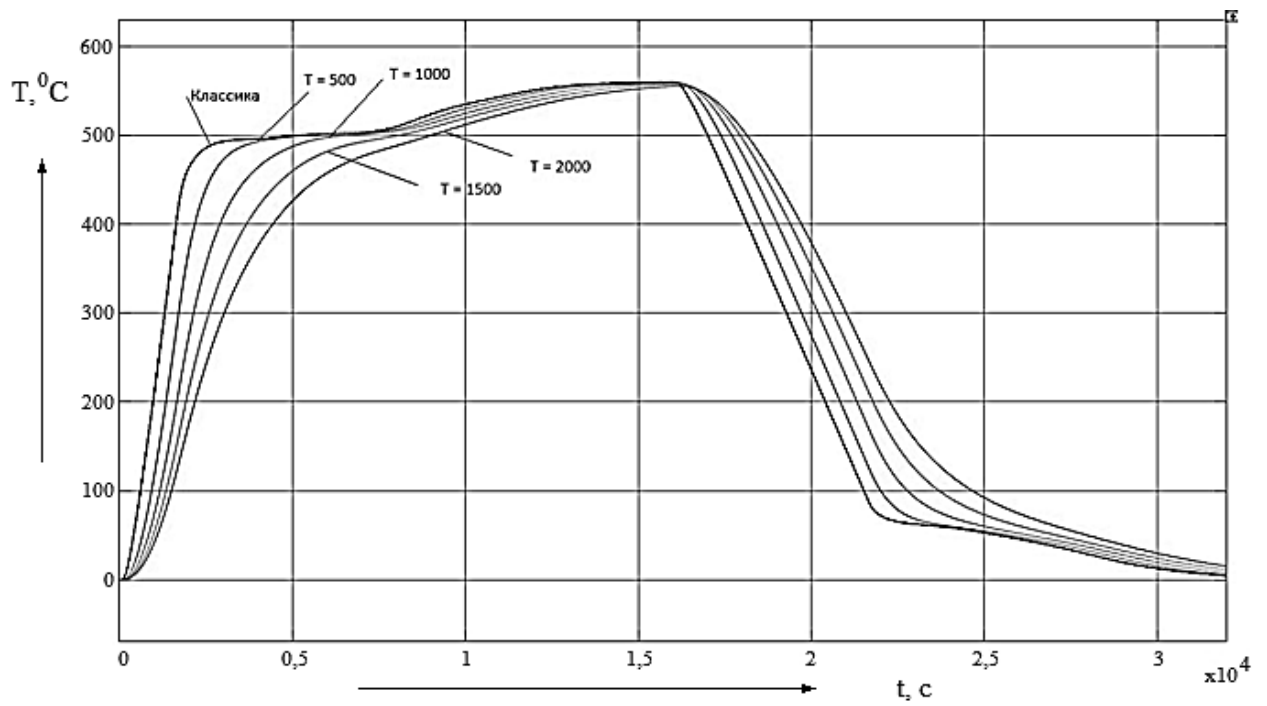


Рисунок 6.14 – Переходные процессы в классической системе при изменении постоянной времени.

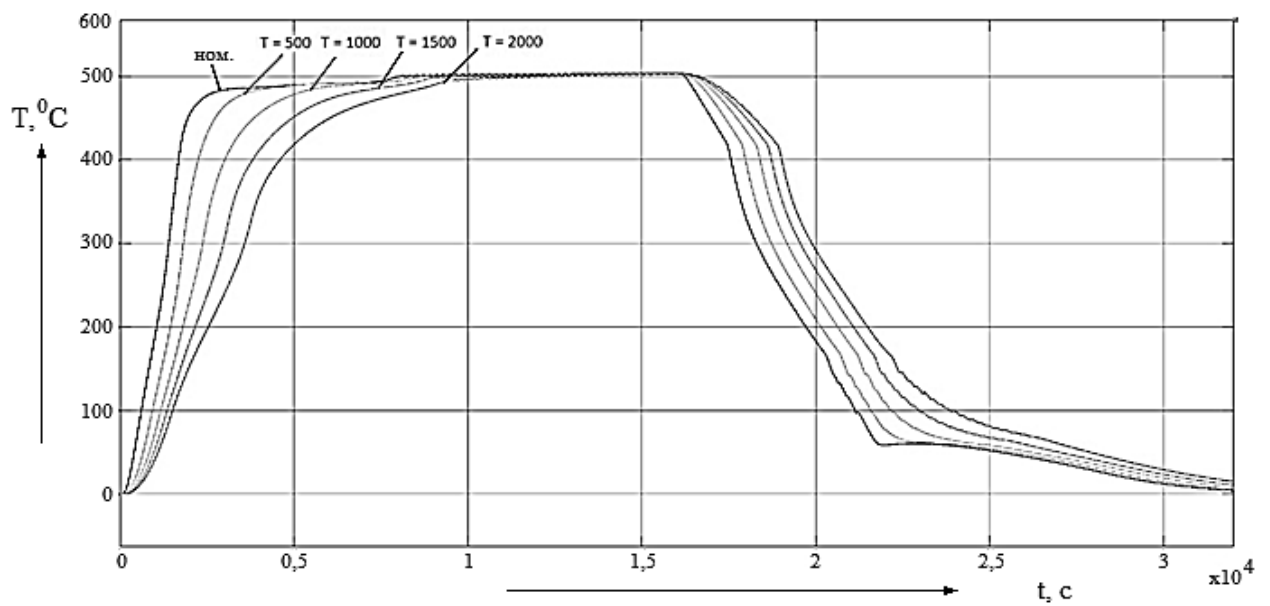


Рисунок 6.15 – Переходные процессы в нечеткой системе управления с регулятором Сугено во внешнем каскаде при изменении постоянной времени.

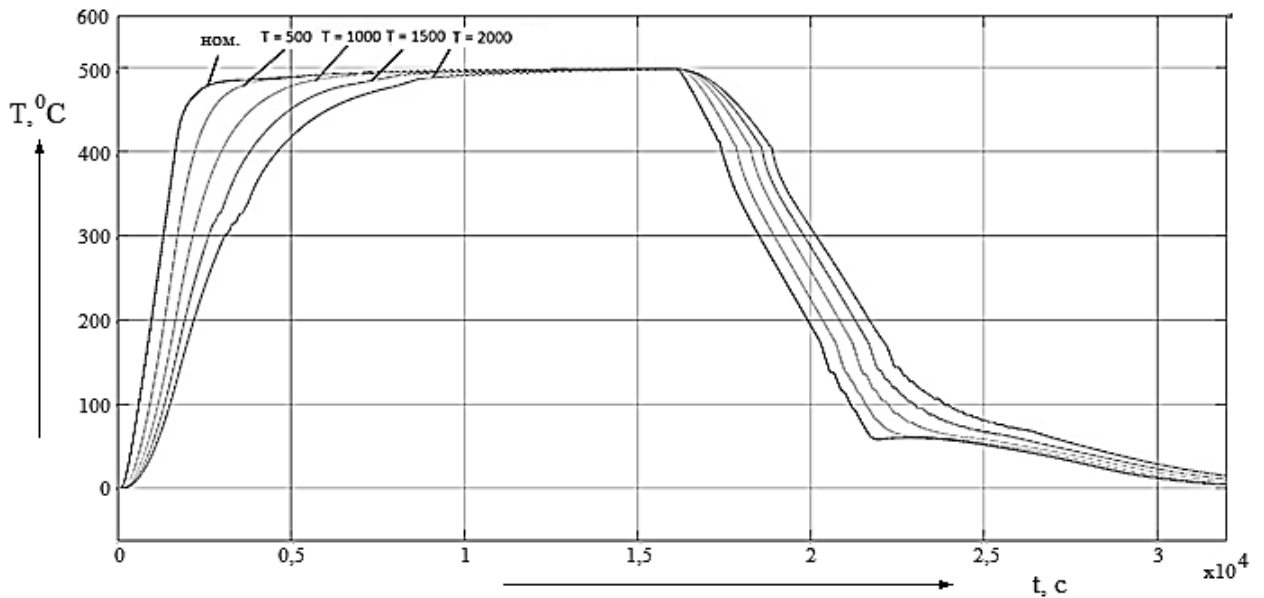


Рисунок 6.16 – Переходные процессы в нечеткой системе управления с регулятором Мамдани во внешнем каскаде при изменении постоянной времени.

Фиксируя положение системы управления в момент времени равный $0,5 \times 10^4$, построим интегральные характеристики, приведенные на рис. 6.17 и 6.18, при изменении внутренних параметров системы.

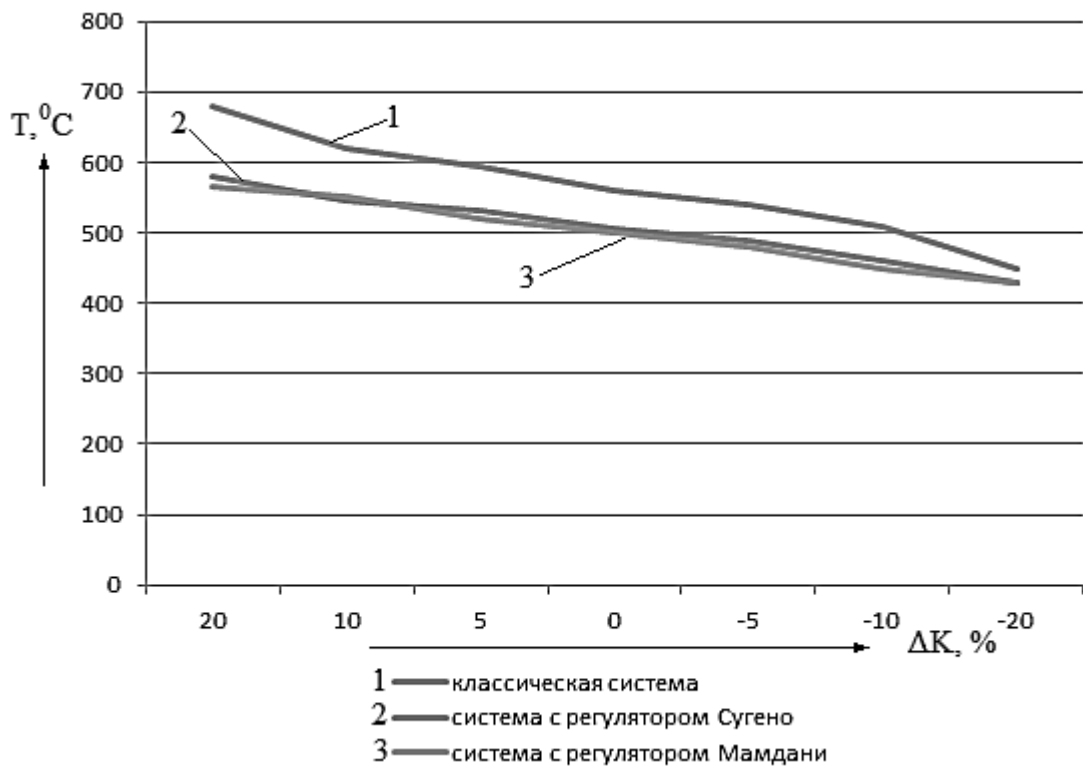


Рисунок 6.17 – Интегральные характеристики при изменении коэффициента усиления в пределах $[-20\%; 20\%]$.

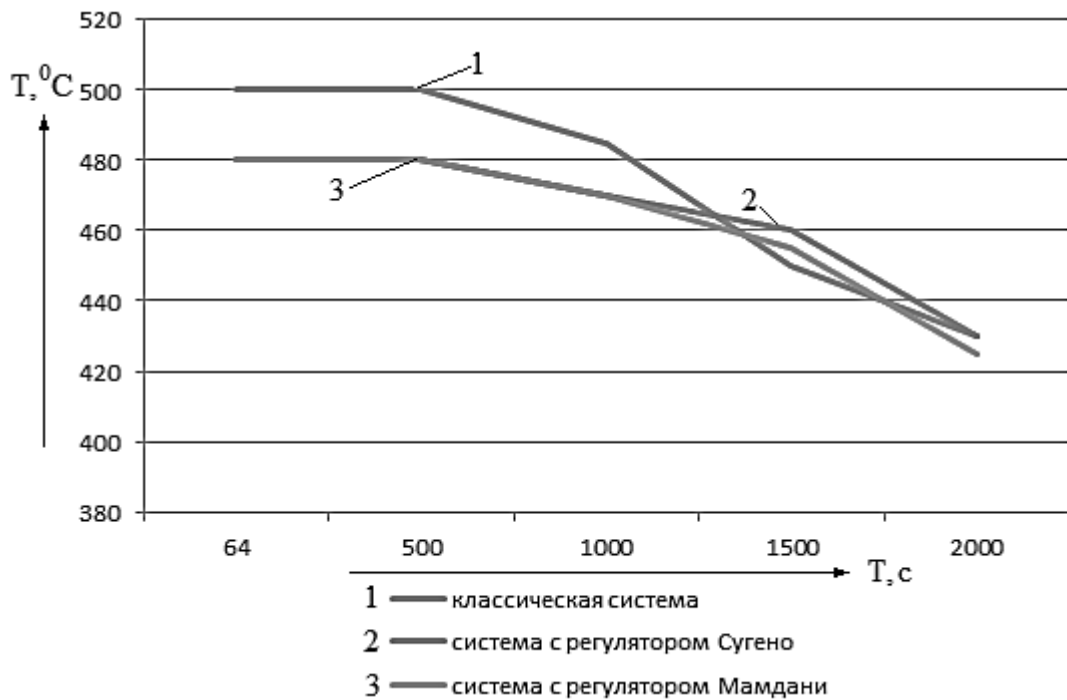


Рисунок 6.18 – Интегральные характеристики при изменении постоянной времени в пределах от номинального значения до 2000.

Анализ интегральной характеристики (рис. 6.17) 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 несущественные отклонения в переходной характеристике интеллектуальной системы управления (рис. 6.10), для классической системы отклонения от заданной траектории характеризуются достаточно большими значениями (рис. 6.18).

Выводы по шестой главе

Гетерогенный состав модулей вложенного каскада позволяет решать задачу по управлению технологическим процессом в условиях многокритериальности. При таком подходе с произвольным набором внутренних модулей внешнее интеллектуальное переключающее устройство решает не только задачу по выбору необходимого модуля в рамках реализации сложного закона управления, но и необходимого сочетания этих законов управления с учетом взаимодействия и взаимного влияния критериев, формирующих требуемое положение системы в целом (сочетание этих законов).

Более того, наделение модулей, составляющих внутренний каскад регулятора, различными функциональными свойствами позволяет решить целый класс дополнительных различных задач, среди которых можно выделить, например, повышение быстродействия вследствие применения набора стандартных настроек, реализацию законов управления при формировании частей внутреннего каскада на различные критерии, интеграция ряда уже существующих локальных систем, как классических, так и нечетких, в одну развитую интеллектуальную систему.

Глава 7 Экспериментальное исследование систем управления технологическими объектами на базе многокаскадного нечеткого подхода

Реализация нечетких интеллектуальных систем на сегодняшнее время представляется затруднительным в силу целого ряда причин, среди которых можно отметить, как отказ ряда основных производителей средств автоматизации от специализированных линеек контроллеров, так и последствия санкционной политики. Применение классического подхода с применением универсальных промышленных контроллеров наталкивается на некоторые проблемы, связанные, как с быстродействием таких систем с учетом обработки существенного числа информации организованной в виде массивов продукционных правил, так и сама реализация развитых нечетких систем требует высоких навыков и знаний в программировании с применением специализированного программного обеспечения, которое, чаще всего, строго ориентированно производителем на определенные линейки аппаратных средств.

Применение многокаскадности при реализации нечетких систем позволяет не только повысить интеллектуальные возможности систем управления, но, за счет модульного построения такой системы, упростить их реализацию на стандартных аппаратных платформах. Формирование многокаскадной нечеткой системы управления технологическим процессом аппаратно может быть выполнено в нескольких вариациях: непосредственно путем прямого программирования интеллектуального регулятора с применением специализированного программного обеспечения, аппаратная реализация нечетких регуляторов помодульно и программная реализация всего многокаскадного регулятора с использованием универсальных средств структурного моделирования с последующей выгрузкой в программируемый логический контроллер. Любой из предложенных вариантов не лишен недостатков. В первом случае к недостаткам можно отнести достаточно большие объемы программного кода, особенности программирования,

связанные с программным обеспечением конкретных производителей, и сложности по перенастройке итогового варианта интеллектуальной системы управления. Во втором случае существует необходимость использования дополнительного модуля, реализующего функции сбора и суммирования сигналов, поступающих с модулей внутреннего каскада системы управления технологическим процессом. Недостатками третьего подхода являются особенности программирования и архитектуры программируемого логического контроллера, определяемого непосредственно производителем, в связи, с чем возникает ряд трудностей с выгрузкой готового программного кода, формируемого универсальными средами инженерных вычислений.

Для оценки работоспособности предложенных подходов и подтверждения полученных теоретических результатов в качестве объекта управления будем использовать классическую систему управления двигателем постоянного тока последовательного возбуждения в составе учебно-исследовательского стенда (рисунок 7.3). Оборудование стенда позволяет проводить исследование системы управления электроприводом в различных режимах работы, практически во всех четырех квадрантах.

На рисунке 7.1 представлена имитационная модель объекта управления с классической системой управления.

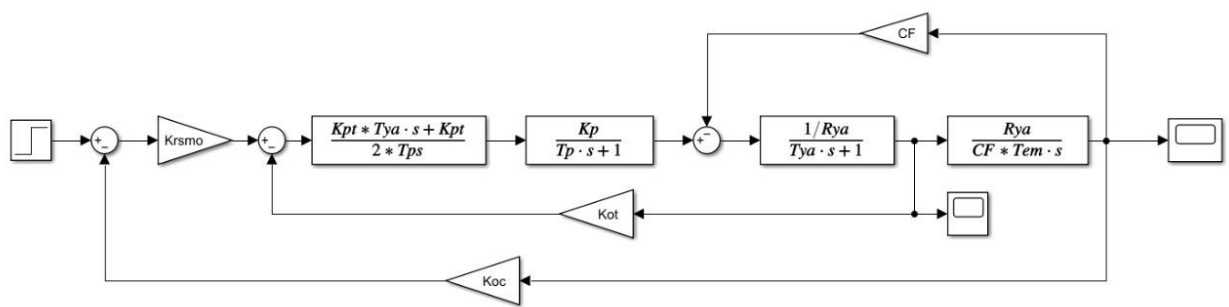


Рисунок 7.1 – Структурная схема электропривода постоянного тока.

Аппаратная реализация нечеткого многокаскадного регулятора производилась в соответствии с функциональной схемой, представленной на рис. 2.5, технические характеристики элементов приведены в приложении 5.

Структурная схема многокаскадной нечеткой системы управления для экспериментального стенда представлена на рисунке 7.2

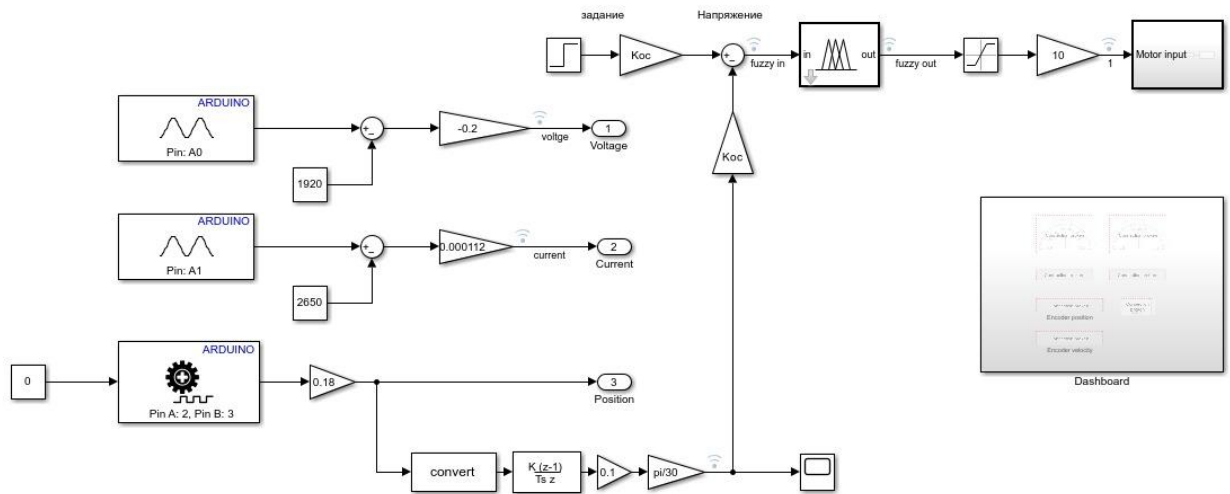


Рисунок 7.2 – Имитационная модель интеллектуальной системы управления.

Функционально реализация многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока может быть выполнена в виде следующих звеньев структуры: блок, который реализует развитую нечеткую систему управления с внешним интеллектуальным переключающим устройством и внутренним каскадом из двух вложенных модулей, выходного блока нечеткой системы управления, реализуемой контроллером SAM3X8E ARM Cortex-M3, в задачу которого входит формирование итогового сигнала, соответствующего заданному закону управления, блока передачи данных в аппаратную часть системы и панель контроля основных параметров электропривода [102].

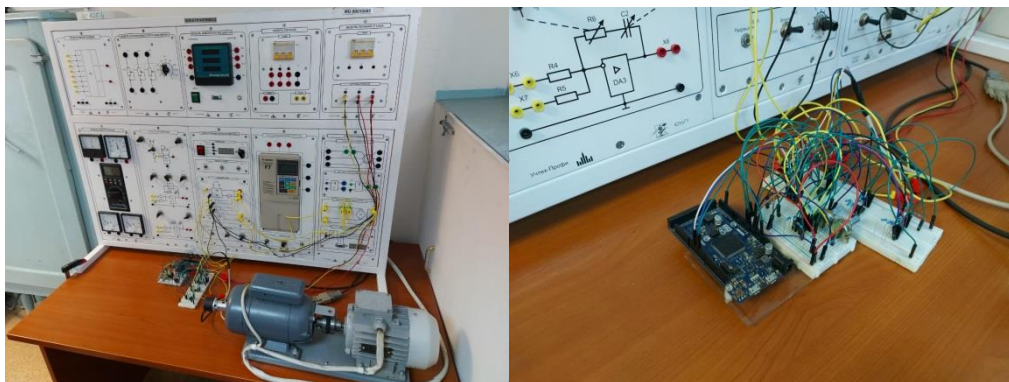
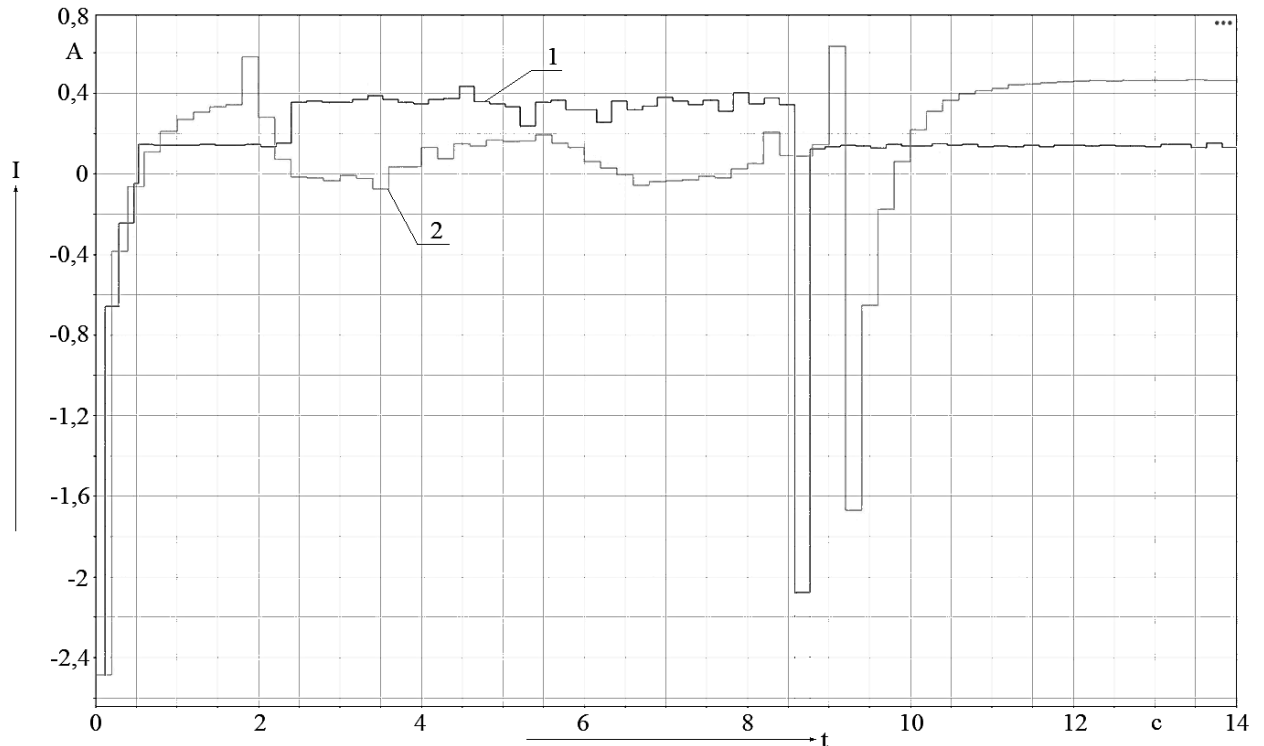


Рисунок 7.3 – Внешний вид испытательного стенда.

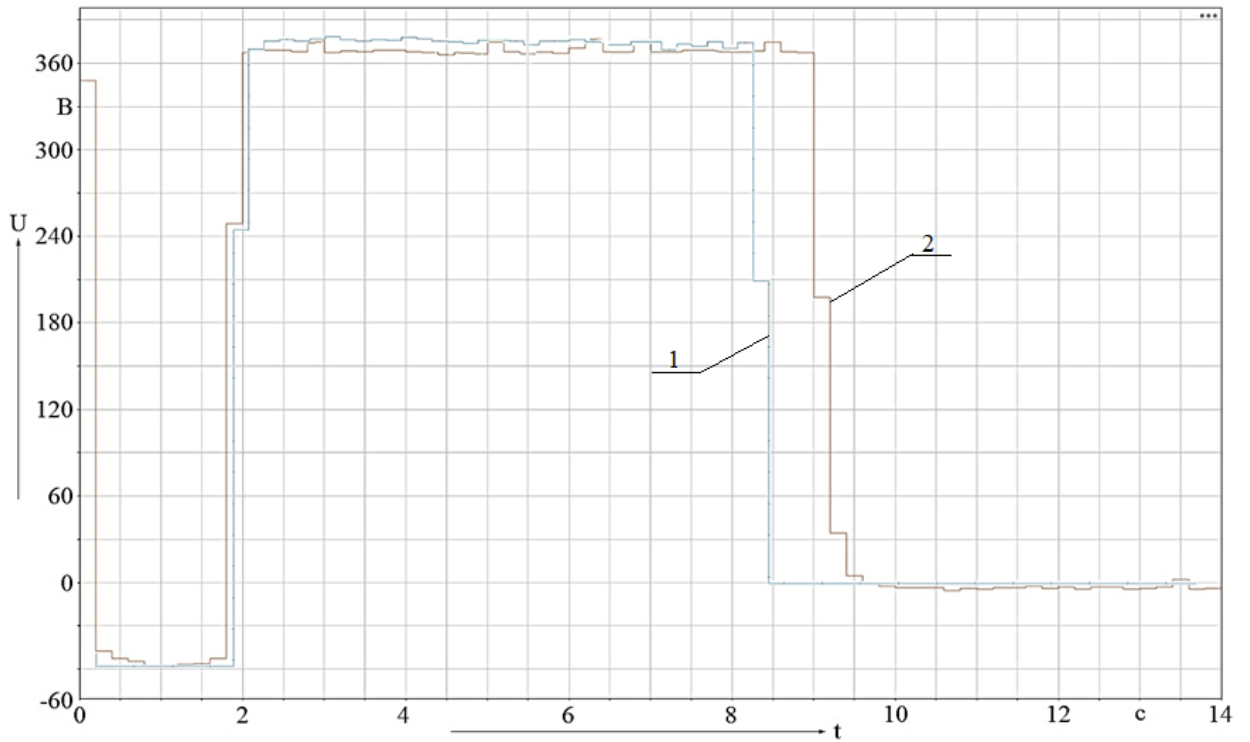
Результаты экспериментальных исследований, при обработке скачка задающего и возмущающего воздействий, приведены на рисунках 7.4 - 7.6.

Динамические характеристики, показанные ниже, иллюстрируют изменение основных параметров систем управления при ее реализации в классическом варианте и с применением многокаскадного нечеткого регулятора. Необходимо отметить, что отклонение выходной координаты не превышает 2%, параметры тока укладываются в стандартный диапазон отклонений и не превышают 5%. Для удобства сравнения на тех же рисунках показаны аналогичные кривые при обработке сигналов системой с классическим регулятором.



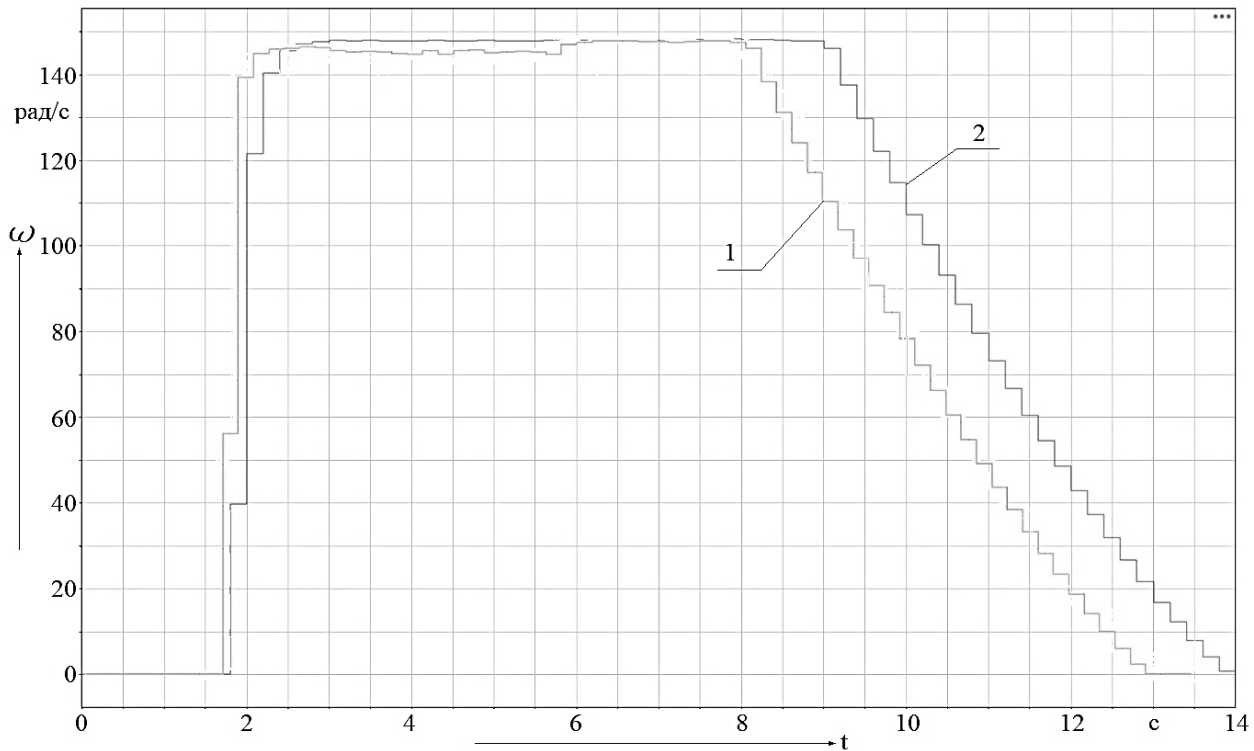
1- классическая система; 2- система с МНЛР.

Рисунок 7.4 – Переходный процесс по току в системе с МНЛР.



1- классическая система; 2- система с МНЛР.

Рисунок 7.5 – Переходный процесс по напряжению в системе с МНЛР.



1- классическая система; 2- система с МНЛР.

Рисунок 7.6 – Переходный процесс по скорости.

Практическую реализацию многокаскадной нечеткой системы управления технологическим объектом по второму варианту

продемонстрируем на примере вычислительного эксперимента, в котором оценивается возможность технической реализации многокаскадного нечеткого регулятора с гетерогенной структурой и подтверждение результатов теоретических исследований. В качестве объекта будет выступать мобильная пиролизная установка, представленная на рисунке 6.1.

Данные с моделей нечетких систем, полученных с использованием языка инженерных вычислений Matlab и пакета по проектированию интеллектуальных регуляторов Fuzzy Logic Toolbox, выгрузим в программируемый логический контроллер [103, 104].

Применяя стандартные процедуры компиляции с использованием функций языка инженерных вычислений MatLab представим нечеткие регуляторы показанные на рисунках 6.5 и 6.6 в виде стандартного программного кода на языке программирования высокого уровня (приложения 2 и 3).

Результаты функционирования многокаскадных нечетких регуляторов с различной структурной организацией представлены на рисунках 7.7 и 7.8

1. Summary

Total time	2856770866
Unit of time	ns
Command	report(executionProfile, 'Units', 'seconds', 'ScaleFactor', '1e-09', 'NumericFormat', '%0.0f');
Timer frequency (ticks per second)	2.16e+08
Profiling data created	03-Mar-2022 23:42:21

2. Profiled Sections of Code

Section	Maximum Execution Time in ns	Average Execution Time in ns	Maximum Self Time in ns	Average Self Time in ns	Calls
[+] mamdani_model_initialize	19972	19972	9944	9944	1
[+] mamdani_model_step [640.0]	57133074	56014713	19940519	18748652	51
mamdani_model_terminate	514	514	514	514	1

3. CPU Utilization [hide]

Task	Average CPU Utilization	Maximum CPU Utilization
mamdani_model_step [640.0]	0.008752%	0.008927%
Overall CPU Utilization	0.008752%	0.008927%

Рисунок 7.7 – Результаты компиляции многокаскадного нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде.

1. Summary

Total time	799034315
Unit of time	ns
Command	report(executionProfile, 'Units', 'seconds', 'ScaleFactor', '1e-09', 'NumericFormat', '%0.0f');
Timer frequency (ticks per second)	2.16e+08
Profiling data created	03-Mar-2022 23:12:40

2. Profiled Sections of Code

Section	Maximum Execution Time in ns	Average Execution Time in ns	Maximum Self Time in ns	Average Self Time in ns	Calls
[+] sugeno_model_initialize	19644	19644	9889	9889	1
[+] sugeno_model_step [640 0]	15708069	15666944	1072759	1063383	51
sugeno_model_terminate	537	537	537	537	1

3. CPU Utilization [hide]

Task	Average CPU Utilization	Maximum CPU Utilization
sugeno_model_step [640 0]	0.002448%	0.002454%
Overall CPU Utilization	0.002448%	0.002454%

Рисунок 7.8 – Результаты компиляции многокаскадного нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Сугено во внешнем каскаде.

Результаты вычислительного эксперимента для многокаскадных нечетких систем с различными алгоритмами вывода во внешних каскадах представлены на рисунках 7.9 и 7.10.

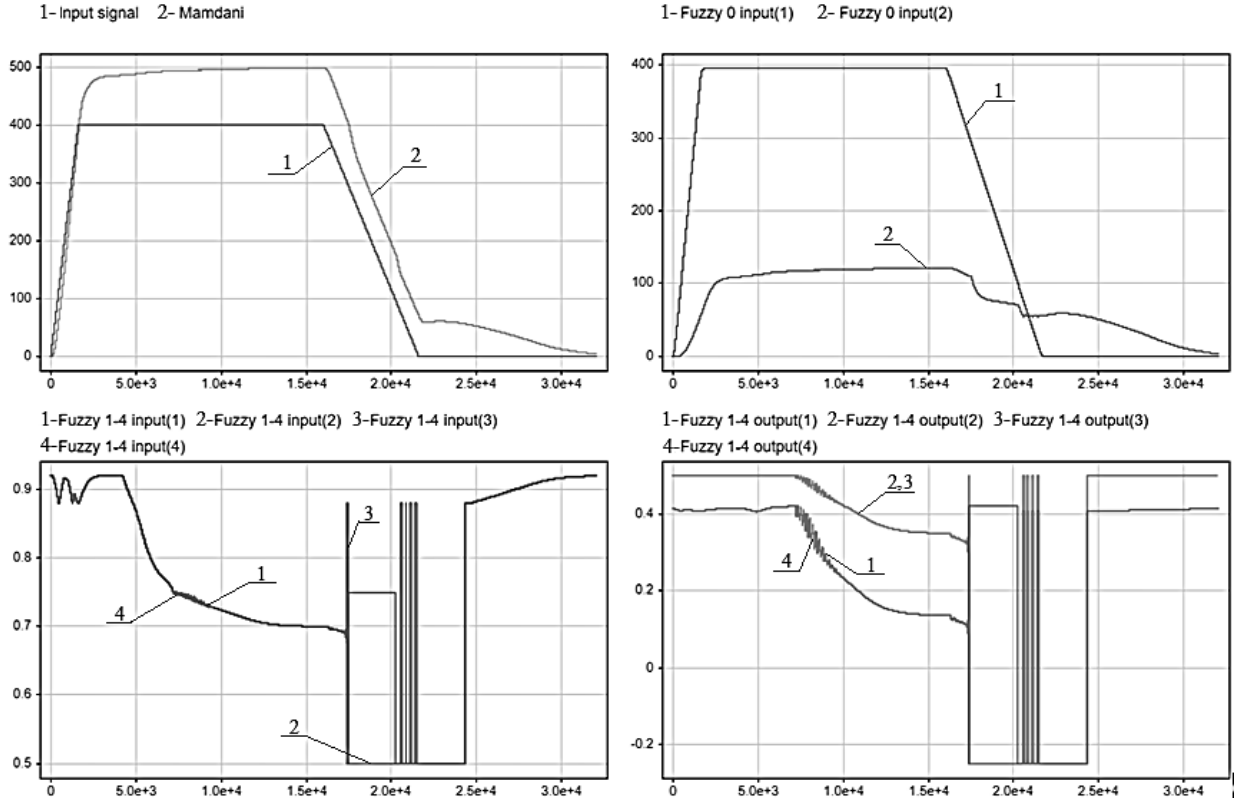


Рисунок 7.9 – Динамические характеристики многокаскадной системы управления с алгоритмом Мамдани во внешнем каскаде.

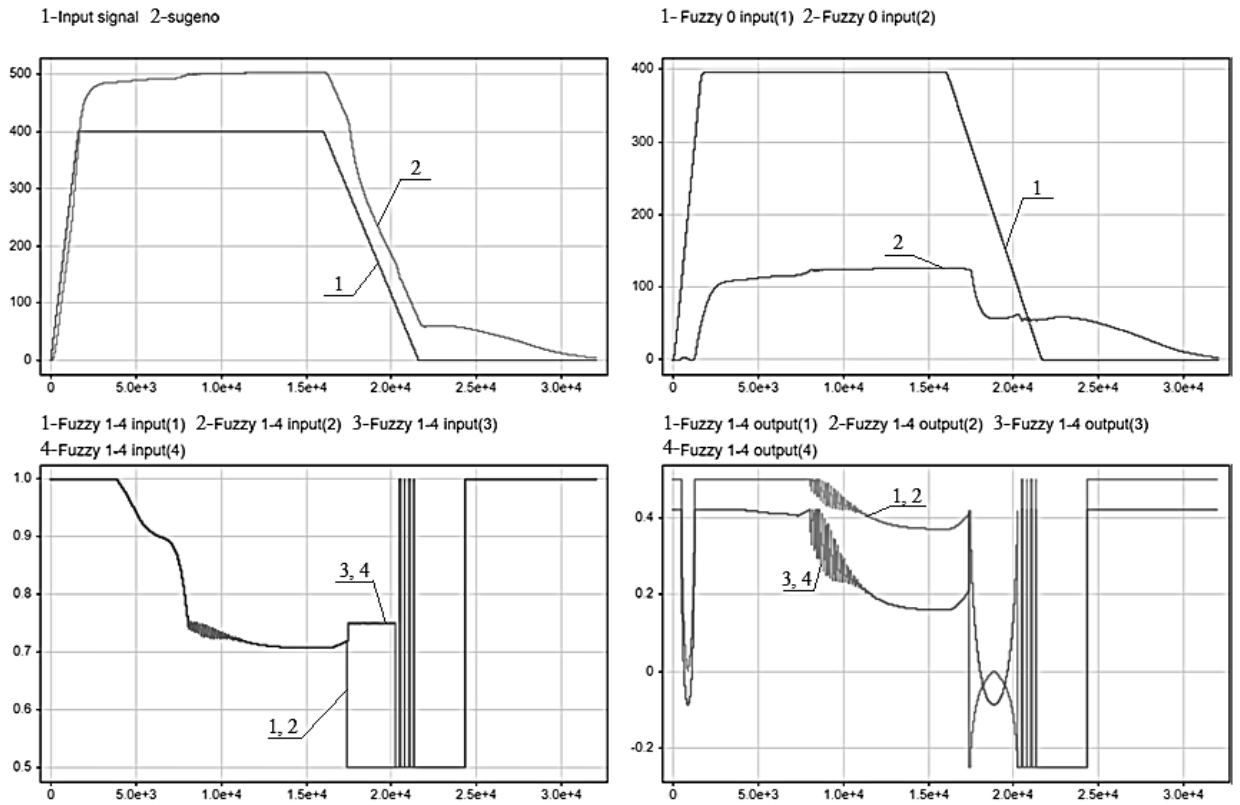


Рисунок 7.10 – Динамические характеристики многокаскадной системы управления с алгоритмом Сугено во внешнем каскаде.

Анализируя результаты процесса получения стандартного Си-кода, можно оценить возможности предложенных интеллектуальных систем, построенных с применением предложенного подхода. Одними из важнейших показателей при функционировании любой системы управления технологическим процессом являются ее быстродействие и, как следствие, минимизация загрузки вычислительных мощностей аппаратных средств автоматизации. Оценивая параметр быстродействие, можно отметить, что выполнение управляющих процедур нечетким регулятором с алгоритмом вывода Сугено во внешнем каскаде производится примерно в 3,5 раза быстрее, чем подобной интеллектуальной системой с алгоритмом вывода Мамдани. Кроме того, необходимо отметить, что загрузка ядра контроллера показывает те же значения, при этом оставаясь минимальной.

Выводы по седьмой главе

Результаты представленных экспериментов подтверждают предлагаемые автором теоретические подходы. Показано, что многокаскадные нечеткие алгоритмы управления могут быть реализованы с применением простейших программируемых контроллеров, что является особенно актуальным в разрезе наложенных ограничений нетехнического характера.

Программы, реализующие развитые нечеткие алгоритмы управления с использованием Си-подобного языка высокого уровня, могут быть загружены с применением стандартных средств как самих ПЛК, так и с использованием стандартных языков инженерных вычислений.

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 нечеткого 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 нечетких систем с пространственной формой функций принадлежности в блоке дефаззификации позволяет обосновать структурную и функциональную реализацию таких нечетких 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 нечетких 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.

Литература

1. Алиев, Р. А. Нечеткие регуляторы и интеллектуальные промышленные системы управления / Р. А. Алиев, Э. Г. Захарова, С. В. Ульянов. - Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1991. – Т. 32. Техническая кибернетика. – № 5
2. Алиев, Р. А. Производственные системы с искусственным интеллектом // Р. А. Алиев, Н. М. Абдикеев, М. М. Шахназаров.– М.: Радио и связь, 1990.
3. Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. - 373 с.
4. Асаи, К. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, С. Иваи, Д. Ватада.- М.: Мир., 2010.- 198с.
5. Афанасьев, В.Н. Динамические системы управления с неполной информацией: Алгоритмическое конструирование / В.Н. Афанасьев. - М.: Ленанд, 2018. - 216 с.
6. Афанасьев, В.Н. Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами / В.Н. Афанасьев. - М.: Изд-во URSS, 2015.
7. Бакаев, В.В. Система управления установкой пиролиза древесины с элементами искусственного интеллекта / В.В. Бакаев, В.А. Соловьев, С.П. Черный. - "Информатика и системы управления". №1(3)- Благовещенск 2002
8. Бакаев, В.В. Повышение эффективности процесса пиролиза в мобильных углевых установках / В.В. Бакаев, Ю.В. Рубцов, В.А. Соловьев, С.П. Черный. - Актуальные проблемы лесного комплекса. Сборник научных трудов. - Брянск, 2002.
9. Бесекерский, В.А. Робастные системы автоматического управления /В. А. Бесекерский, А. В. Небылов – М: Наука.,1983. – 240с.

10. Блишун, А.Ф. Обоснование операций теории нечётких множеств / А. Ф. Блишун, С. Ю. Знатнов – В кн. : Нетрадиционные модели и системы с нечёткими знаниями.
11. 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
12. Бортаковский, А.С. Нелинейные системы управления: описание, анализ и синтез / А.С. Бортаковский, А.В. Пантелеев, Е.А. Руденко. - М.: Вузовская книга, 2008. - 312 с.
13. Вальков, В.Б. Автоматизированные системы управления технологическими процессами / В.Б. Вальков. - Л.: Политехника, 1991.- 269с.
14. 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.
15. 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.
16. Васильев, В. И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики: учеб. Пособие / В. И. Васильев, С. В. Ильясов. – Уфа: ФГБОУ ВО «УГАТУ», 1995. – 200с.
17. 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

18. 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.
19. Горюшкин, В.А. Математические модели с логическими регуляторами / В.А. Горюшкин - Вестник КамчатГТУ. – Петропавловск-Камчатский, 2012. – Вып. 20.
20. Горюшкин, В.А. О нечетких моделях Takagi – Sugeno / В.А. Горюшкин - Вестник КамчатГТУ. – Петропавловск-Камчатский, 2011. – Вып. 15. – С. 14–18.
21. Гостев, В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления / В. И. Гостев. – СПб.: БХВ Петербург, 2011.
22. Гульков, Г.И. Системы автоматизированного управления электроприводами / Г.И. Гульков. - Минск: Новое знание, 2007. - 394 с.
23. Деменков, Н.П. Нечеткое управление в технических системах / Н.П. Деменков – Москва : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 200 с.
24. Догу, М. Обзор инструментальных средств на нечеткой логике / М. Догу. - Дэнси Гидзюцу, 1991. – Т. 33. № 1.
25. Дорохов, И. Н. Новый принцип построения регуляторов для сложных химико-технологических объектов на основе качественной информации / И. Н. Дорохов, Ю. И. Кудинов - Доклады Академии наук, 1994, Том 336, № 1, стр. 75-79.
26. Дорф, Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р. Бишоп: Перевод с английского. – Лаборатория базовых знаний, 2002.
27. Дружинина, О.В. Алгоритмы стабилизации дискретной управляемой системы с синглтон-выходом / О.В. Дружинина, О.Н. Масина. - Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 12. С. 35–41.

28. Дружинина, О.В. Анализ устойчивости и стабилизация нелинейных каскадных систем с запаздыванием в терминах линейных матричных неравенств / О.В. Дружинина, Н.О. Седова. Известия РАН. Теория и системы управления. 2017. № 1. С. 21–35.
29. Дружинина, О.В. Методы исследования устойчивости и управляемости нечетких и стохастических динамических систем / О.В. Дружинина, О.Н. Масина. - М.: ВЦ РАН, 2009.
30. Дружинина, О.В. Моделирование и стабилизация динамических систем с логическими регуляторами / О.В. Дружинина, Е.В. Игонина, О.Н. Масина. - Сообщения по прикладной математике. М.: ВЦ РАН, 2015.
31. Дружинина, О.В. О подходах к анализу устойчивости нелинейных динамических систем с логическими регуляторами / О.В. Дружинина, О.Н. Масина - Современные информационные технологии и ИТ-образование 2017 Том 13 № 2. - С. 40-49.
32. Дружинина, О.В. Разработка алгоритмов стабилизации управляемых систем на основе свойств линейных матричных неравенств / О.В. Дружинина, О.Н. Масина, Е.В. Игонина - Научные технологии. 2013. Т. 14. № 6. С. 4–8.
33. Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад – М. : Радио и связь, 1990. – 288 с.
34. Евменов, В.П. Интеллектуальные системы управления / Евменов В.П. – М.: Либроком, 2009.
35. Еграшкина, Ж.Е. Устойчивость и стабилизация нелинейных систем обыкновенных дифференциальных уравнений в терминах линейных матричных неравенств / Ж.Е. Еграшкина, Н.О. Седова. - Нелинейный мир. 2015. Т. 13. № 1. С. 3–15.
36. Ежова, И.В. Принятие решений при нечетких основаниях. Схемы вывода. / И.В. Ежова, Д.А. Поспелов / Техническая кибернетика. – № 2. – 1978. – с. 5 – 11.

37. Ежова, И.В. Принятие решений при нечетких основаниях. Универсальная шкала. / И.В. Ежова, Д.А. Поспелов. - Техническая кибернетика. – № 6. – 1977. – с. 3 – 11.

38. Емельянов, С.В. Искусственный интеллект и принятие решений: Методы рассуждений и представления знаний. Когнитивные исследования. Интеллектуальные системы. Вып.3 / С.В. Емельянов. - М.: Ленанд, 2014. - 120 с.

39. Емельянов, С.Г. Автоматизированные нечетко-логические системы управления: Монография / С.Г. Емельянов, В.С. Титов, М.В. Бобырь. - М.: Инфра-М, 2017. - 120 с.

40. Емельянов, С.Г. Адаптивные нечетко-логические системы управления: Монография / С.Г. Емельянов. - М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2013. - 184 с.

41. Есупов, Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления. Синтез регуляторов систем автоматического управления / Н.Д. Есупов, К.А. Пупков. - Т. 3. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

42. Жбанова, Н.Ю. Моделирование процесса варки сахара с использованием нейронечеткой переключаемой модели / Н.Ю. Жбанова. - Сборник трудов по итогам XVII Международной открытой научной конференции «Современные проблемы информатизации в анализе и синтезе программных и телекоммуникационных систем», 2012. Вып. 17, с. 300-302.

43. Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир., 2009. – 324с.

44. Ивкин, А.М. Основы проектирования следящих систем / В.Д. Андреев, А.М. Ивкин, В.С. Кулешов и др.; под ред. Н.А. Лакоты. - Москва : Машиностроение, 1978. - 391 с. : ил.

45. Израилович, М.Я. Элементы теории оптимального управления периодическими режимами виброударных систем: Системы, линейные в

промежутках между соударениями / М.Я. Израйлович. - М.: КД Либроком, 2010. - 104 с.

46. Искусственный интеллект и принятие решений: Когнитивные исследования. Эволюционные вычисления. Интеллектуальные системы и технологии. Многокритериальный анализ решений / Под ред. С.В. Емельянова. - М.: Ленанд, 2012. - 128 с.

47. Искусственный интеллект. – В 3-х кн. Кн.2. Системы общения и экспертные системы: справочник / Под ред. Э.В. Попова. –М. : Радио и связь, 1990. – 464 с.

48. Искусственный интеллект.- В 3-х кн. Кн.2. Модели и методы: справочник/Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Радио и связь, 1990.- 304 с.

49. Искусственный интеллект.- В 3-х кн. Кн.3. Программные и аппаратные средства: справочник/Под ред. В.Н. Захарова, В.Ф. Хорошевского.-М.:Радио и связь, 1990.- 368 с.

50. Кандрашина, Е. Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных систем / Е.Ю. Кандрашина. – М. : Наука, 1989. – 219с.

51. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 312 с.

52. Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 440 с.

53. Киселев, Н. В. Электропривод с распределенными параметрами / Н. В. Киселев, В. Н. Мядзель, Л. Н. Рассудов. – Л. : Судостроение, 1985. – 220 с.

54. Клячко, Л.М. Системы автоматического управления движением судна: Методы создания и законы управления / Л.М. Клячко, Г.Э. Острецов. - М.: Ленанд, 2017. - 272 с.

55. Коваль, А. С. К вопросу построения нечеткого регулятора скорости для электропривода при прямом управлении моментом с широтно-

импульсным модулятором лифтовой установки / А. С. Коваль, А. В. Шваяков. - Вестник Белорусско-Российского университета. 2008. № 1 (18)

56. Коваль, А. С. К вопросу математического моделирования системы векторного управления при прямом управлении моментом на основе широтно-импульсной модуляции / А. С. Коваль, А. В. Шваяков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2007. – № 2. – С. 90–97.

57. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Энергетические системы / А.А. Колесников, Г.Е. Веселов, А.Н. Попов и др. - М.: КД Либроком, 2019. - 248 с.

58. Колесников, А.А. Синергетические методы управления сложными системами: Механические и электромеханические системы / А.А. Колесников, Г.Е. Веселов, А.Н. Попов и др. - М.: КД Либроком, 2019. - 300 с.

59. Крейт, Ф. Основы теплопередачи / Ф. Крейт, У. Блэк, – Москва. Мир, 1983, 512 с.

60. Кудинов, Ю. И. Нечеткие регуляторы и системы управления / Ю. И. Кудинов, И. Н. Дорохов, Ф. Ф. Пащенко - Проблемы управления, 2004, выпуск 3, стр. 2–14.

61. Кудинов, Ю. И. Построение адаптивного нечеткого комбинированного регулятора в многосвязных системах / Ю. И. Кудинов, И. Ю. Кудинов. - Проблемы управления, 2006, №5, стр. 12–18.

62. Кудинов, Ю. И. Управление ректификационной установкой на основе нечетких множеств / Ю.И. Кудинов, И.Н. Дорохов - Теоретические основы химической технологии. – 1991. – Т.25, № 4. – с. 563-569.

63. Кудинов, Ю.И. Нечеткие модели и системы управления / Ю.И. Кудинов, А.Ю. Келина, И.Ю. Кудинов и др. - М.: Ленанд, 2017. - 328 с.

64. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – Москва. Атомиздат, 1979, 240 с.

65. Леоненков, А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков - СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.

66. Литвак, Б.Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа / Б.Г.Литвак –М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.
67. Луков, А.В. Тепломассообмен: Справочник / А.В. Луков. – Москва. Энергия, 1971, 150 с.
68. Лунина, Н. В. Гибридная экспертная система с глубинным представлением знаний для проектирования и диагностики биотехнических изделий / Н.В. Лунина, А.Н. Слепченко, С.В. Ульянов и др./ Изв. АН СССР. Техн. Кибернетика, 1991. – № 5.
69. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – Москва. Высшая школа, 1967, 278 с.
70. Майборода, Л.А. Статистический анализ и оптимизация следящих систем / В.Т. Кочетков, Л.А. Майборода, В.М. Пономарев и др.; под ред. А.В. Поцелуева. - Москва : Машиностроение, 1977. - 360 с. : ил.
71. Малафеев, С.И. Основы автоматики и системы автоматического управления: Учебник для студентов высших учебных заведений / С.И. Малафеев, А.А. Малафеева. - М.: ИЦ Академия, 2010. - 384 с.
72. Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин – М.: Наука, 2010. – 272с.
73. Митрофанов, Б.А. Проектирование и расчет следящих систем / Б.А. Митрофанов, Г.Л. Рабкин, Д.В. Васильев. - Ленинград : Судостроение, 1964. - 607 с.
74. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – Москва, Энергия, 1977, 207 с.
75. Москаленко, В.В. Системы автоматизированного управления электропривода / В.В. Москаленко. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2016. - 208 с.
76. Орлов, А.И. Задачи оптимизации и нечеткие переменные / А.И. Орлов.- М.: Знание, 1980.- 64 с.

77. Ощепков, А.Ю. Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB: Учебное пособие / А.Ю. Ощепков. - СПб.: Лань, 2013. - 208 с.
78. Палагута, К.А. Интегрированные системы проектирования и управления / К.А. Палагута, А.С. Семенов. - М.: МГИУ, 2008. - 204 с.
79. Пантелеев, А.В. Нелинейные системы управления: описания, анализ и синтез / А.В. Пантелеев. - М.: Вузовская книга, 2008. - 312 с.
80. Пантелеев, А.В. Оптимальные нелинейные системы управления: синтез при неполной информации / А.В. Пантелеев. - М.: Вузовская книга, 2008. - 192 с.
81. Пат. 2228348 РФ, Углевывжигательная печь. Черный С.П., Рубцов Ю.В., Соловьев В.А. // Изобретения. Полезные модели. - 2004, -№ 13 (III ч.).
82. Первозванский, А.А. Курс теории автоматического управления – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 616 с.
83. Петров, Б. И. Теория моделей в процессах управления / Б.И. Петров, Г.М. Уланов, С.В. Ульянов. – М.: Наука, 1978.
84. Петров, Б. Н. Информационно-семантические проблемы в процессах управления и организации / Б. Н. Петров, Г. М. Уланов, С. В. Ульянов, Э. М. Хазен. –М.: Наука, 1978.
85. Пивкин, В.Я. Нечеткие множества в системах управления / В.Я. Пивкин, Е.П. Бакулин, Кореньков Д.И./ http://idisys.iae.nsk.su:8102/fuzzy_book.
86. Попов, Е. П. Робототехника и гибкие производственные системы / Е.П. Попов. - Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1987. - 192 с.
87. Попов, Э.В. Статические и динамические экспертные системы / Э.В. Попов, И.Б. Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот. – М.: финансы и статистика, 1996. – 320 с.
88. Поспелов, Д.А. Логико-лингвистические методы в системах управления / Д.А. Поспелов. - М.: Энергоатомиздат, 1981. - 231 с.

89. Пospelов, Д.А. Ситуационное управление: теория и практика / Д.А. Пospelов. - М. Наука, 1986.- 288 с.
90. Потапов, А.М. Основы расчета и проектирования линейных следящих систем: Учеб. пособие / А.М. Потапов. - Ленинград: ЛМИ, 1979
91. Программа реализации нечеткого регулятора для системы управления маломощным электроприводом. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2023617229 / Москва, 6 апреля 2023.
92. 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.
93. 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
94. 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
95. Ротштейн, А.П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, нейронные сети, генетические алгоритмы / А.П. Ротштейн, - Винница. Универсум-Винница, 1999, 295 с.
96. Рубан, А.И. Адаптивные системы управления и идентификации: Монография / А.И. Рубан. - М.: Инфра-М, 2018. - 144 с.
97. 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

98. Шидловский, С.В. Математическое моделирование сложных объектов с распределенными параметрами в задачах автоматического управления структурно-перестраиваемых систем / С.В. Шидловский. - Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8, с. 19 – 23.

99. Савельев, Д.О. Один из подходов к решению комплексной задачи компенсации нелинейных элементов систем автоматического управления с применением теории нечетких множеств / Д.О. Савельев, С.П. Черный / Электропривод на транспорте и в промышленности: тр. II Всерос. науч.-практ. конф. (Хабаровск, 20-21 сентября 2018 г.) / под ред. С.В. Власьевского. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2018. – С.276-280

100. Савельев, Д.О. Компенсация совокупности естественных и искусственных нелинейностей многоканальным нечетким регулятором / Д.О. Савельев, С.П. Черный. - Производственные технологии будущего: от создания к внедрению материалы международной научно-практической конференции, г. Комсомольск-на-Амуре, 5-6 сентября 2018 г. / редкол.: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2018. – С. 165-168

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

102. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022680044 Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для электропривода постоянного тока / Черный С.П., Бузикаева А.В., Охотников А.В., Облогин Д.Ю.; Заявлено 17.10.2022; Зарегистрировано 26.10.2022.

103. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022664286 Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде для формирования процедур управления мобильной пиролизной установкой / Черный С.П., Бузикаева А.В., Емельянов К.А., Тимофеев А.К.; Заявлено 06.07.2022; Зарегистрировано 27.07.2022.

104. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2022663048 Программа реализации многокаскадного нечеткого регулятора с механизмом вывода Сугено во внешнем каскаде / Черный С.П., Бузикаева А.В., Емельянов К.А., Сухоруков С.И.; Заявлено 27.06.2022; Зарегистрировано 11.07.2022.

105. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2003612124. Программа оптимизации распределения функций принадлежности нечеткого регулятора при заданных показателях качества системы управления / Соловьев В.А., Черный С.П., Гудим А.С.; Заявлено 16.07 2003; Зарегистрировано 11.09.2003.

106. Седова, Н.О. Об использовании общей функции Ляпунова в исследовании устойчивости систем Такаги–Сугено / Н.О. Седова, Ж.Е. Еграшкина. - Известия Вузов. Математика. 2017. № 5. С. 77–85.

107. Смирнова, В.И. Основы проектирования и расчета следящих систем / В.И. Смирнова, Ю.А. Петров, В.И. Разинцев – М.: Машиностроение, 1983. – 295 с.

108. Соловьев В.А. Ледообразование на линиях электропередач. Причины возникновения. Методы удаления. / В.А. Соловьев, С.И. Сухоруков, С.П. Черный. - Владивосток: Дальнаука, 2018. – 303 с.

109. 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.

110. Соловьев, В.А. Применение нечеткой логики в устройствах регулирования энергетических объектов / В.А. Соловьев, А.Г. Владыко, В.С. Легенкин. - Электроэнергетика и энергосберегающие технологии Межвузовский сборник научных трудов. Владивосток, 1998. С. 125-133.

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

112. 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

113. 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. (K1, RSCI)

114. Троякин, Ю.В. Проектирование и эксплуатация огнетехнических установок: Учебное пособие / Ю.В. Троякин – Москва, Энергоатомиздат, 1988, 256 с.

115. Уланов, Г.М. Динамическая точность и компенсация возмущений в системах автоматического управления / Г.М. Уланов - М.: Издательство "Машиностроение", 1970. – 260 с.

116. 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.

117. Ульянов, С. В. Интеллектуальное управление процессом искусственной вентиляции легких с использованием нечеткого регулятора /

С. В. Ульянов, Е. В. Колбенко, - «Системный анализ в науке и образовании» №2, 2011.

118. 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.

119. Ульянов, С. В. Мобильные интеллектуальные системы с роботами вертикального перемещения / С. В. Ульянов, - «Системный анализ в науке и образовании» №2, 2011.

120. Ульянов, С.В. Научно-организационные и коммерческие аспекты разработки промышленных нечетких регуляторов и интеллектуальных САУ // Новости искусств, интеллекта, 1992. – № 2.

121. 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

122. 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)

123. 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)

124. 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

125. 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)

126. Хлыпало, Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах / Е.И. Хлыпало. - ЛЕНИНГРАД. Издательство "ЭНЕРГИЯ". Издание 1973 года, 344 стр.

127. Хлыпало, Е.И. Нелинейные системы автоматического регулирования. Расчет и проектирование / Е.И. Хлыпало. - Под ред. чл.-корр. АН СССР. Е. П. Попова. Л.: Энергия. 1967г. 451 с.

128. 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. (K2, ВАК)

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

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

131. 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

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

133. Черный, С.П. Нечеткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С.П. Черный, Д.А. Новак – Электротехнические комплексы и системы управления, Воронеж: Издательский дом «Кварта», 2012, №4 (28), С. 56-60

134. Шах, Р. Тепловые граничные условия и некоторые решения для ламинарной вынужденной конвекции в каналах / Р. Шах, А. Лондон. - Пер. с англ. Труды Америк. Об-ва инж.-мех., сер. С. Теплопередача, 1974, № 2, с. 45.

135. 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

136. Шекшня, В.Л. Следящие системы / В.Л. Шекшня, С.А. Хризолитова – М. : МЭИ, 1966. – 140 с.

137. 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

138. Шидловский, С.В. Логическая система с перестраиваемой структурой в задачах управления технологическими процессами / С.В. Шидловский, - Автометрия. Т. 41, №4, 2005, С. 104-113.

139. Шидловский, С.В. Перестраиваемые структуры в системах автоматического управления технологическими процессами, инвариантные к изменению динамических характеристик объекта / С.В. Шидловский, А.А. Светлаков. - Электронные средства и системы управления: Материалы Междунар. науч.-практ. конф.: В 3 частях. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2004. Ч. 2. С. 103 – 106.

140. Шидловский, С.В. Синтез мультиструктурных интеллектуальных систем / А.М. Катина, С.В. Шидловский. - Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. № 8 с. 144 – 148.

141. 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)

142. 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

143. Шрейнер, Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов: Ч. 1: Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р. Т. Шрейнер, - Екатеринбург, Издательство УГПШУ, 1997. - 277 с.

144. 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.

145. 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

146. Яворский, В.Н. Проектирование инвариантных следящих приводов / В.Н. Яворский – М. : Высшая школа, 1963. – 476 с.

147. 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

148. 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.

149. Черный С.П. Моделирование развитой нечеткой 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.

150. 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.

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

152. 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

153. Assawinchaichote, W. H_∞ output feedback control design for uncertain fuzzy singularly perturbed systems: an LMI approach / W. Assawinchaichote, S.K. Nguang. - Automatica, 2004, №40, pp. 2147-2152.

154. Aydogmus, Z. A comparison of artificial neural network and extended Kalman filter based sensorless speed estimation / Z. Aydogmus, O. Aydogmus. - Measurement, №63, 2015, pp. 152-158.

155. Batur, C. Model based fuzzy control / C. Batur, V. Kasparin. - Math. and Comput. Modell, 1991. – Vol. 15. –№ 12.

156. Bayram, D. Anfis model for vibration signals based on aging process in electric motors / D. Bayram, S. Seker. - *Soft. Comput.*, №19, 2015, pp. 1107-1114.
157. Besir, D. Fuzzy neural network IP controller for robust position control of induction motor drive / D.Besir. - *Expert Systems with Applications*, 20094528–34.
158. Betin, F. Fuzzy logic applied to speed control of a motor drive / F. Betin, D. Pinchon, G.A. Capolino. - *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, №47, 2000, pp. 610-622.
159. Boban, V. High-performance position control of induction motor using discrete-time sliding-mode control / V. Boban, P.D. Branislava, M. Cedomir. - *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2008, №55, pp. 3809–3817.
160. Bose, B.K. Power electronics and AC drives / B.K. Bose. - Prentice Hall, 1986, p. 402.
161. Bouguenna, I. F. Robust neuro-fuzzy sliding mode control with extended state observer for an electric drive system / I. F. Bouguenna, A. Azaiz, A. Tahour, A. Larbaoui. – *Energy*, 2019, №169, pp. 1054-1063.
162. Braee, M. Theoretical and Linguistic Aspect of the Fuzzy Logic Controller / M. Braee, D.A. Rutherford Automation, Perg. Press. – 1979. – Vol.12. – P. 553 – 557.
163. Lee, C. Development of an industrial Internet of things suite for smart factory towards re-industrialization / C. Lee, S. Zhang, K. Ng, *Adv. Manuf.* 5 (2017) 335–343.
164. Lee, C. Design and application of Internet of thingsbased warehouse management system for smart logistics / C. Lee, Y. Lv, K. Ng, W. Ho, K. Choy. - *Int. J. Prod. Res.* 56 (2018) 2753–2768.
165. Lee, C.K.M. Simulation-based multiple automated guided vehicles considering charging and collision-free requirements in automatic warehouse / C.K.M. Lee, K.L. Keung, K.K.H. Ng, D.C. Lai. - 2018 IEEE International

Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2018, pp. 1376–1380.

166. Cao, J. Fuzzy logic controller design with unevenly-distributed membership function for high performance chamber cooling system / J. Cao, S. Jeong, Y. Jung. - J. Cent. South Univ., №21, 2014, pp. 2684-2692.

167. Chadli, M. LMI Solution for robust static output feedback control of discrete Takagi-Sugeno fuzzy models / M. Chadli, T.M. Guerra. - IEEE Trans. Fuzzy Syst., 2012, №20, pp. 1160-1165.

168. Chadli, M. Robust observer design for unknown inputs Takagi-Sugeno models / M. Chadli, H.R. Karimi. - IEEE Trans. Fuzzy Syst., 2013, №21, pp. 158-164.

169. Charumit, C. Carrier-based unbalanced phase voltage space vector PWM strategy for asymmetrical parameter type two-phase induction motor drives / C. Charumit, V. Kinnares. - Electr. Power Syst. Res., №79, 2009, pp. 1127-1135.

170. Chen, C.-W. A Critical Review of Parallel Distributed Computing and the Lyapunov Criterion for Multiple Time-delay Fuzzy Systems / C.-W. Chen. - Intern. J. of the Physical Sci. 2011. V.6. № 19. P.4492–4501.

171. Chen, G. Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy control systems / G. Chen, T.T. Pham. - Boca Raton: CRC Press, 2001.

172. 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

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

174. 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

175. 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

176. 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

177. Savelyev, D.O. Software Fuzzy Logic Compensator of Nonlinear Elements of Automatic Control System / D.O. Savelyev and A.S. Gudim 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602829.

178. Daley, S. Comparison of a fuzzy logic controller with a P + D control law / S. Daley, K.F. Gill. - Trans, of the ASME, 1989. – Vol. 111. – №2.

179. Driankov, D. An introduction to fuzzy control / D. Driankov, H. Hellendorn, M. Reich Frank. - Berlin: Springer, 1996.

180. 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. C. 9462254.

181. 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.

182. Sancı, E. Rebalancing the assembly lines: exact solution approaches / E. Sancı, M. Azizoğlu. - *Int. J. Prod. Res.* 55 (2017) 5991–6010.
183. El-Barbary, Z. M. S. Fuzzy logic based controller for five-phase induction motor drive system / Z. M. S. El-Barbary. - *Alexandria Engineering Journal*, December, 2012, №51, Issue 4, pp. 263-268.
184. Elmas, C. A neuro-fuzzy controller for speed control of a permanent magnet synchronous motor drive / C. Elmas, O. Ustun, H.S. Hasan. - *Expert Systems with Applications*, 2008, №34, pp. 657–664.
185. Feng, G. *Analysis and Synthesis of Fuzzy Control Systems: A Model-Based Approach* / G. Feng. - New York: CRC Press, 2010.
186. Francis, R. Optimized PI+ load–frequency controller using WNN approach for an interconnected reheat power system with RFB and hydrogen electrolyser units / R. Francis, I.A. Chidambaram. - *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, №67, 2015, pp. 381-392.
187. Fridman, E. Tutorial on Lyapunov-based Methods for Time-delay Systems / E. Fridman. - *European J. of Control.* 2014. V.20. P.271–283.
188. Gadoue, S.M. Artificial intelligence-based speed control of DTC induction motor drives, a comparative study / S.M. Gadoue, D. Giaouris, J.W. Finch. - *Electric Power Systems Research*, 2009, №79, pp. 210–219.
189. Glasius, R. Neural network dynamics for path planning and obstacle avoidance / R. Glasius, A. Komoda, S. Gielen. - *Neural Networks*, №8 (1), 1995, pp. 125-133.
190. Gutierrez, A. A PC-based architecture for parameter analysis of vector-controlled induction motor drive / Gutierrez, J.R. Resendiz, G.M. Valtierra, E.A.R. Araiza, J.D.M. Santibañez, R.L. Rubio. - *Comput. Electr. Eng.*, №37, 2011, pp. 858-868.
191. Cheshmehgaz, H.R. Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm / H.R. Cheshmehgaz, H. Haron, F. Kazemipour, M.I. Desa. - *Comput. Ind. Eng.* 63 (2012) 503–512.

192. Hameed, S. Reduced rule base self-tuning fuzzy PI controller for TCSC / S. Hameed, B. Das, V. Pant. - *Electrical Power and Energy Systems*, 2010, №32, pp. 1005–1013.
193. Hamid, B. Tuning fuzzy PD and PI controllers using reinforcement learning / B. Hamid, T. Mohamed, G. Pierre-Yves, L. Salim. - *ISA Transactions* 2010, №49, pp. 543–551.
194. Harris, C.J. Intelligent identification and control for autonomous guided vehicles using adaptive fuzzy-based algorithms / C.J. Harris, C.G. Moore. - *Eng. Appl. of AI*, 1989. –Vol. 2. – № 4.
195. Hazzab, A. Real time implementation of fuzzy gain scheduling of PI controller for induction motor control / A. Hazzab, I.K. Bousserhane, M. Zerbo, P. Sicard. - *Springer Neural Processing Letters*, 2006, №24, pp. 203–215.
196. Hazzab, A. Experimental implementation of a novel scheduling algorithm for adaptive and modified P&O MPPT controller using fuzzy logic for WECS / A. Hazzab, H. Gouabi, M. Habbab, M. Rezkallah, A. Chandra. - *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2021, 35(9), pp. 1732–1753
197. Hui, N. A comparative study on some navigation schemes of a real robot tackling moving obstacles / N. Hui, D. Pratihari. - *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, №25 (4–5), 2009, pp. 810-828.
198. Ibrahim, Z. A comparative analysis of fuzzy logic and PI speed control in high performance ac drives using experimental approach / Z. Ibrahim, E. Levi. - *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2002, №38, pp. 1210–1218.
199. Isik, C. Pilot level of hierarchical controller for an unmanned mobile robot / C. Isik, A.M. Meystel. - *IEEE. Robotics and Automation*, 1988. – Vol. 4. – № 3.
200. Wan, J. Software-defined industrial internet of things in the context of industry 4.0 / J. Wan, S. Tang, Z. Shu, D. Li, S. Wang, M. Imran, A.V. - *IEEE Sens. J.* 16 (2016), pp. 7373–7380.

201. Jahan, E. Fuzzy logic based speed control of an induction motor with considering core loss, stray load loss, and variations of motor parameters / E. Jahan, M.R. Hazari, M.A. Mannan, J. Tamura. - In Electrical Machines and Systems (ICEMS), 19th International Conference, 2016, pp. 1-4.

202. Jamal, A. A. Fuzzy logic speed controller optimization approach for induction motor drive using backtracking search algorithm / A.A. Jamal, M.A. Hannan, M. Azah, G.M.A. Maher. - Elsevier (Measurement), Vol. 78, pp. 49-62

203. Jamaludin, J. Development of a self-tuning fuzzy logic controller for intelligent control of elevator systems / J. Jamaludin, N.A. Rahim, W.P. Hew. - Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2009, №22, pp. 1167–1178.

204. Jeen, L. Self-organizing fuzzy controller for injection molding machines / L. Jeen, L. Ruey-Jing. - Journal of Process Control, 2010, №20, pp. 585–595.

205. Jirasuwankul, N. Simulation of Energy Efficiency Improvement in Induction Motor Drive by Fuzzy Logic Based Temperature Compensation / N. Jirasuwankul. - Energy Procedia, February, 2017, №107, pp. 291-296.

206. Joy, J. Performance comparison of a Canonical Switching Cell with SPWM and SVPWM fed sensorless PMBLDC motor drive under conventional and fuzzy logic controllers / J. Joy, S. Ushakumari. - Journal of the Franklin Institute, September, 2017, №354, Issue 14, pp. 5996-6032.

207. Keung, K. Smart City Application and analysis: real-time urban drainage monitoring by IoT sensors: a case study of Hong Kong / K. Keung, C. Lee, K. Ng, C. Yeung. - 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2018, pp. 521–525.

208. Karimi, H.R. New delay-dependent exponential h_∞ synchronization for uncertain neural networks with mixed time delays / H.R. Karimi, H.J. Gao. - IEEE Trans. Syst. Man Cybern.-Part B: Cybernet., 2010, №40, pp. 173-185.

209. Karimi, H.R. Robust delay-dependent h_∞ control of uncertain time delay systems with mixed neutral, discrete, and distributed time-delays and

markovian switching parameters / H.R. Karimi. - IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg., 2011, №58, pp. 1910-1923.

210. Katayama, R. Development support system for products using fuzzy logic / R. Katayama, Y. Kalitani, K. Matsumoto. - Sanyo Techn. Rev, 1991. – Vol. 23. – № 2.

211. Kermiche, S., Takagi-Sugeno based controller for mobile robot navigation / S. Kermiche, M. Saidi, H. Abbassi, H. Ghodbane. - Journal of Applied Sciences, №6 (8), 2006, pp. 1838-1844.

212. Khan, J.F. Space vector PWM for a two-phase VSI / J.F. Khan, S.M.A. Bhuiyan, K.M. Rahman, G.V. Murphy. - Int. J. Electr. Power Energy Syst., №51, 2013, pp. 265-277.

213. Khatib, O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots / O. Khatib. - The International Journal of Robotics Research, №5 (1), 1986, pp. 90-98.

214. Kojabadi, H.M. A comparative analysis of different pulse width modulation methods for low cost induction motor drives / H.M. Kojabadi. - Energy Convers. Manage., №52, 2011, pp. 136-146.

215. Koszy, L.T. Knowledge representation and accumulation by fuzzy flip-flops / L.T. Koszy, J.C. Hirota, I.C.Ozawa. - Fuzzy Sets and Systems, 1991. – Vol. 39.

216. Krishna, K. Perception and remembrance of the environment during real-time navigation of a mobile robot / K. Krishna, P. Kalra. - Robotics and Autonomous Systems, №37, 2001, pp. 25-51.

217. Krstic, M. Nonlinear and Adaptive Control Design / M. Krstic, I. Kanellakopoulos, P. Kokotovic. – Wiley, 1995.

218. Kyo-Beum, L. Reduced-order extended Luenberger observer based sensorless vector control driven by matrix converter with nonlinearity compensation / L. Kyo-Beum, B. Frede. - IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, №53, pp. 66–75.

219. Atzori, L. The internet of things: a survey / L. Atzori, A. Iera, G. Morabito. - *Comput. Netw.* 54 (2010). pp. 2787–2805.
220. Lam, H.-K. Stability Analysis of Fuzzy-Model-Based Control Systems: Linear-Matrix-Inequality Approach / H.-K. Lam, F.H.F. Leung. – Berlin: Springer, 2011.
221. Lee, C.C. Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller, part I, part II / C.C. Lee. - *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet.*, 1990, №20, pp. 404-435.
222. Letting, L.K. Optimization of a fuzzy logic controller for PV grid inverter control using S-function based PSO / L.K. Letting, J.L. Munda, Y. Hamama. - *Sol. Energy*, №86, 2012, pp. 1689-1700.
223. Li, K. Vector control of induction motor for electric vehicles considering iron losses and its energy optimization strategy / K. Li, C.H. Zhang, N.X. Cui. - *Control Theory Appl.*, 2007, №24, pp. 959-963.
224. Li, Y.F. Developments of fuzzy algorithms for servo systems / Y.F. Li, C.C. Lau. - *IEEE Control System Magazine*, №9, 1989, pp. 65-72.
225. Liu, X.P. Robust stabilization of MIMO nonlinear systems by backstepping / X.P. Liu, G.X. Gu, K.M. Zhou. - *Automatica*, 1999, №35, pp. 987-992.
226. Lokriti, A. Induction motor speed drive improvement using fuzzy IP-self-tuning controller. A real time implementation / A. Lokriti, I. Salhi, Y. Zidani. - *ISA Transactions*, May, 2013, №52, Issue 3, pp. 406-417.
227. Luo, Y. C. Sensorless stator field orientation controlled induction motor drive with a fuzzy speed controller / Y. C. Luo, W. X. Chen. - *Computers & Mathematics with Applications*, September, 2012, №64, Issue 5, pp. 1206-1216.
228. Hermann, M. Design principles for industrie 4.0 scenarios, in / M. Hermann, T. Pentek, B. Otto.- 2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS), 2016, pp. 3928–3937.
229. Rübmann, M. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries / M. Rübmann, M. Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel, M. Harnisch. - *Boston Consulting Group* 9 (2015) 54–89.

230. Mamdani, E. H. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian. - *Int. J. Man Mach. Studies*, 1975. – Vol. 7. – № 1.
231. Mamdani, E.H. Application of fuzzy algorithms for control of a simple dynamic plant / E.H. Mamdani. - *Proceedings of IEEE*, №121, 1974, pp. 1585-1588.
232. Marino, R. Adaptive input-output linearizing control of induction motors / R. Marino, S. Peresada, P. Valigi. - *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1993, №38, pp. 208-221.
233. Marino, R. An adaptive tracking control from current measurements for induction motors with uncertain load torque and rotor resistance / R. Marino, P. Tomei, C.M. Verrelli. - *Automatica*, №44, 2008, pp. 2593-2599.
234. Masiala, M. Fuzzy self-tuning speed control of an indirect field-oriented control induction motor drive / M. Masiala, B. Vafakhah, J. Salmon, A. Knight. - *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2008, №44, pp. 1732–1740.
235. Mazandarani, M. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions / M. Mazandarani, N. Pariz, A.V. Kamyad. - *IEEE Trans Fuzzy Syst* 2018;26(1).
236. Mazandarani, M. A Review on Fuzzy Differential Equations / M. Mazandarani, L. Xiu. - *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 62195–62211,
237. Mazandarani, M. Sub-optimal control of fuzzy linear dynamical systems under granular differentiability concept / M. Mazandarani, N. Pariz. - *ISA Trans* 2018;76:1–17.
238. Mazandarani, M. Fuzzy bang-bang control problem under granular differentiability / M. Mazandarani Mehran, Y. Zhao. - *J Franklin Inst. B.* 2018, 355(12).
239. Mazandarani, M. Z-differential equations / M. Mazandarani Mehran, Y. Zhao. - *IEEE Trans Fuzzy Syst* 2019.

240. Melin, P. A new method for adaptive model-based control of non-linear dynamic plants using a neuro–fuzzy–fractal approach / P. Melin, O. Castillo. - *Soft Computing Journal*, №5 (2), 2001, pp. 171-177.

241. Melin, P. Adaptive model-based control of non-linear dynamical systems with a neuro–fuzzy–genetic approach / P. Melin, O. Castillo. - *International Journal of Smart Engineering System Design*, №4 (1), 2002, pp. 41-47

242. Melin, P. Intelligent control of aircraft dynamic systems with a new hybrid neuro–fuzzy–fractal approach / P. Melin, O. Castillo. - *Information Sciences*, №142, 2002, pp. 161-175.

243. Melin, P. Fuzzy System for Classification of Nocturnal Blood Pressure Profile and Its Optimization with the Crow Search Algorithm / I. Miramontes, P. Melin, , G. Prado-Arechiga. - *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, 1222 AISC, pp. 23–34

244. Melin, P. Modelling, Simulation and Control of Non-Linear Dynamical Systems / P. Melin, O. Castillo. - Taylor and Francis Publishers, London, Great Britain, 2002.

245. Menghal, P. M. Fuzzy Based Real Time Control of Induction Motor Drive / P. M. Menghal, A. Jaya Laxmi. - *Procedia Computer Science*, 2016, №85, pp. 228-235.

246. Mezouar, A. Adaptive sliding-mode-observer for sensorless induction motor drive using two-time-scale approach / A. Mezouar, M.K. Fellah, S. Hadjeri. - *Simul. Model. Pract. Theory*, №16, 2008, pp. 1323-1336.

247. Mitrovic, S.T. Design of fuzzy logic controller for autonomous garaging of mobile robot / S.T. Mitrovic. - *Journal of Automatic Control*, №16, 2006, pp. 13-16.

248. Mitrovic, S.T. Fuzzy logic controller for bidirectional garaging of a differential drive mobile robot / S.T. Mitrovic, Z.M. Djurovic. - *Advanced Robotics*, №24 (8–9), 2010, pp. 1291-1311.

249. Mitrovic, S.T. Fuzzy-Based Controller for Differential Drive Mobile Robot Obstacle Avoidance / S.T. Mitrovic, Z.M. Djurovic. - IFAC Proceedings Volumes 2010, Vol. 43, Issue 16, pp. 67-72.

250. Motlagh, O.R.E. Development of a new minimum avoidance system for a behavior-based mobile robot / O.R.E. Motlagh, T.S. Hong, N. Ismail. - Fuzzy Sets and Systems, №160, 2009, pp. 1929-1945.

251. Muruganandam, M. Stability analysis and implementation of chopper fed DC series motor with hybrid PID-ANN controller / M. Muruganandam, M. Madheswaran. - Int. J. Control Autom. Syst., №11, 2013, pp. 966-975.

252. Mutlag, A.H. An improved fuzzy logic controller design for PV inverters utilizing differential search optimization / A.H. Mutlag, H. Shareef, A. Mohamed, M.A. Hannan, J.A. Ali. - Int. J. Photoenergy, 2014, pp. 1-14.

253. Jazdi, N. Cyber physical systems in the context of Industry 4.0, / N. Jazdi. - 2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics, 2014, pp.1–4.

254. Najariyan, M. A new approach for optimal fuzzy linear time invariant controlled system with fuzzy coefficients / M. Najariyan, M.H. Farahi. - J Comput Appl Math 2013; №259, pp. 682–94.

255. Najariyan, M. Fuzzy fractional quadratic regulator problem under granular fuzzy fractional derivatives / M. Najariyan, Y. Zhao. - IEEE Trans Fuzzy Syst 2018; №26(4).

256. Nasir Uddin, M. Development of a self-tuned neuro-fuzzy controller for induction motor drives / M. Nasir Uddin, H. Wen. - IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, №43, pp. 1108–1116.

257. Ngo, P.D. Gain estimation of nonlinear dynamic systems modeled by an FBFN and the maximum output scaling factor of a self-tuning PI fuzzy controller / P.D. Ngo, Y.C. Shin. - Eng. Appl. Artif. Intell., №42, 2015, pp. 1-15.

258. Nguyen, D. Neural Networks for Self-Learning Control Systems / D. Nguyen. – IEEE Control Systems. – 1990. – Vol. 10. – P. 18 – 23.

259. Nishikawa, T. Fuzzy theory: The science of human intuition / T. Nishikawa. - Jap. Comput. Quart, 1989. – № 79.
260. Niu, H. Adaptive fuzzy output feedback and command filtering error compensation control for permanent magnet synchronous motors in electric vehicle drive systems / H. Niu, J. Yu, L. Zhao. - Journal of the Franklin Institute, October, 2017, Vol. 354, Issue 15, pp. 6610-6629
261. Battaïa, O. A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches / O. Battaïa, A. Dolgui. - Int. J. Prod. Econ. 142 (2013) 259–277.
262. Ofoli, A. R. Fuzzy-Logic Applications in Electric Drives and Power Electronics / A. R. Ofoli. - Power Electronics Handbook (4 Edition), 15 September, 2017, pp. 1221-1243.
263. Orłowska, K.T. Adaptive sliding-mode neuro-fuzzy control of the two-mass induction motor drive without mechanical sensors / K.T. Orłowska, M. Dybkowski, K. Szabat. - IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, №57, pp. 553–564.
264. Zacharia, P.T. Multi-objective fuzzy assembly line balancing using genetic algorithms / P.T. Zacharia, A.C. Nearchou. - J. Intell. Manuf. 23 (2012) 615–627.
265. Pan, I. Tuning of an optimal fuzzy PID controller with stochastic algorithms for networked control systems with random time delay / I. Pan, S. Das, A. Gupta. - ISA Transactions, 2011, №50, pp. 28–36.
266. Pandey, R.K. Optimization of bone drilling parameters using grey-based fuzzy algorithm / R.K. Pandey, S.S. Panda. - Measurement, №47, 2014, pp. 386-392.
267. Park, C.-W. Adaptive parameter estimator based on T–S fuzzy models and its applications to indirect adaptive fuzzy control design / C.-W. Park, M. Park. - Information Sciences, №159 2004, pp. 125-139.

268. Pathak, D. A fractional order fuzzy-proportional-integral-derivative based pitch angle controller for a direct-drive wind energy system / D. Pathak, P. Gaur. - Computers and Electrical Engineering, 2019, №78, pp. 420-436.
269. Pei, W.H. Hamilton system modeling and passive control for induction motor of electric vehicles by considering iron losses / W.H. Pei, C.H. Zhang, K. Li, N.X. Cui. - Control Theory Appl., 2011, №28, pp. 869-873.
270. Petkovic, D. Potential of adaptive neuro-fuzzy inference system for contact positions detection of sensing structure / D. Petkovic, M. Issa, N.D. Pavlovica, L. Zentner. - Measurement, №61, 2015, pp. 234-242.
271. Piegat, A. Horizontal membership function and examples of its application / A. Piegat, M. Landowski. - International Journal of Fuzzy Systems, 2015, 17(1), pp. 22-30.
272. Piegat, A. Is the conventional interval-arithmetic correct? / A. Piegat, M. Landowski. - Journal of Theoretical and Applied Computer Science, 2012, vo.6, №2, pp. 27-44.
273. Piegat, A. Computing with Words with use of inverse RDM-models of membership functions / A. Piegat, M. Plucinski. / International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 2015, №25(3), pp. 675-688
274. Piegat, A. Fast-learning neuro-fuzzy PID-controller with minimal number of fuzzy regions / A. Piegat, M. Pluciriski. - Applied Mathematics and Computer Science, 1997, vol. 7, №1, pp. 171-184.
275. Piegat, A. Decision-Making under uncertainty using Info-Gap Theory and new multidimensional RDM interval arithmetic / A. Piegat, K. Tomaszewska. - Electrotechnical Review, 2013, vol. 89, No. 8, pp. 71-76.
276. Piegat, A. Fuzzy modeling and control / A. Piegat, Physica-Verlag, Heidelberg, New York, 2001.
277. Pradhan, S. Fuzzy logic techniques for navigation of several mobile robots / S. Pradhan, D. Parhi, A. Panda. - Applied Soft Computing Journal, №9 (1), 2009, pp. 290-304.

278. Prasad, D. Digital simulation and hardware implementation of a simple scheme for direct torque control of induction motor / D. Prasad, B.P. Panigrahi, S. SenGupta. - *Energy Convers. Manage.*, 2008, №49, pp. 687-697.
279. Precup, R.-E. Fuzzy logic control system stability analysis based on Lyapunov's direct method / R.-E. Precup, M.-L. Tomescu, St. Preitl. - *Int. J. of Computers, Communications & Control*. 2009. V. IV. № 4. P. 415–426.
280. Procyk, T. J. A Linguistic Self-Organizing Process Controller / T. J. Procyk, E. H. Mamdani – *Automatica*. – 1979. – Vol.15. – P. 15 – 30.
281. Zhong, R.Y. Big Data Analytics for Physical Internetbased intelligent manufacturing shop floors / R.Y. Zhong, C. Xu, C. Chen, G.Q. Huang. - *Int. J. Prod. Res.* 55 (2017), pp. 2610–2621.
282. Rajendran, A. Design and analysis of fuzzy and PI controllers for switched reluctance motor drive / A. Rajendran and B. Karthik. - *Materials Today: Proceedings*, 8 September, 2020, №37, Part 2, pp. 1608-1612.
283. Rajni, J. Design of self tuning fuzzy controllers for nonlinear systems / J. Rajni, N. Sivakumaran, T.K. Radhakrishnan. - *Expert Systems with Applications*, 2011, №38, pp. 4466–4476.
284. Ramesh, T. Sliding-mode and fuzzy logic control based MRAS speed estimators for sensorless direct torque and flux control of an induction motor drive / T. Ramesh, A.K. Panda, S.S. Kumar. - In *India Conference (INDICON)*, 2013, pp. 1-6.
285. Ramirez, H.S. Dynamical feedback control of robotic manipulators with joint flexibility / H.S. Ramirez, S. Ahmad, M. Zribi. - *IEEE Trans. Syst. Man Cybernet.*, 1992, №22, pp. 736-747.
286. Ranjani, M. Optimal fuzzy controller parameters using PSO for speed control of Quasi-Z Source DC/DC converter fed drive / M. Ranjani, P. Murugesan. - *Applied Soft Computing*, February, 2015, №27, pp. 332-356.
287. Reignier, P. Fuzzy logic techniques for mobile robot obstacle avoidance / P. Reignier. - *Robotics and Autonomous Systems*, №12 (3–4), 1994, pp. 143-153.

288. Reza, C.M.F.S. A review of reliable and energy efficient direct torque controlled induction motor drives / C.M.F.S. Reza, Md.D. Islam, S. Mekhilef. - *Renew. Sust. Energy Rev.*, №37, 2014, pp. 919-932.

289. Riad, T. New direct torque neuro-fuzzy control based SVM-three level inverter-fed induction motor / T. Riad, B. Hocine, M. Salima. - *Int. J. Control Autom. Syst.*, №8, 2010, pp. 425-432.

290. Rusu, P. Behavior-based neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation / P. Rusu, E. Petriu, T. Whalen, A. Cornell, H. Spoelder. - *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, №52 (4), 2003, pp. 1335-1340.

291. 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

292. Cherniy, S.P. Another approach to enhancement of intellectual capabilities of the fuzzy controller / S.P. Cherniy; V.A. Solovyev / 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076154

293. Cherniy, S.P. General Principals of Building the Fizzy Multi-Cascade Tracking Control Systems / S.P. Cherniy; V.A. Solovyev / 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon) DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602646

294. Cherniy, S.P. Fuzzy multi-cascade AC drive control system / S.P. Cherny, A.V. Buzikayeva. - 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, 2018. doi: 10.1109/FarEastCon.2018.8602930.

295. Sakhare, A. Fuzzy logic control of fuel cell for stand-alone and grid connection / A. Sakhare, A. Davari, A. Feliachi. - *J. Power Sources*, №135, 2004, pp. 165-176.

296. 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

297. Sukhorukov S. Development of automatic tool calibration method for robotic machining complex / Sergei Sukhorukov, Markel Melnichenko, Sergey Cherniy, Ruslan Bazhenov, Irina Karpova, Irina Povkh, Zoya Arkhipova. - AIP Conference Proceedings 2700, 020037 (2023), doi.org/10.1063/5.0125134

298. 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

299. Shaukat, N. Takagi-Sugeno Fuzzy logic based speed control of Induction Motor / N. Shaukat, B. Khan, C.A. Mehmood, S.M. Ali. - In Frontiers of Information Technology (FIT), International Conference, 2016, pp. 280-285.

300. 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

301. Sugeno, M. Fuzzy control of car / M. Sugeno, M. Nishila. - Fuzzy sets and systems, 1985. – Vol. 16. – № 2.

302. Sugeno, M. On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents / M. Sugeno. - IEEE Trans. Fuzzy Syst. 1999. V. 7. № 2. P. 201–224.

303. Sugeno, M. Structure identification of fuzzy model / M. Sugeno, G.T. Kang. - Fuzzy Sets Syst., 1998. – V. 28. – P. 15–33.

304. Sugeno, M. Optimization of fuzzy if-then rule bases by evolutionary tuning of the operations / C. Moraga, M. Sugeno, E. Trillas. - Proceedings of The International Symposium on Multiple-Valued Logic, 2009, pp. 221–226

305. 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

306. 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.

307. Swaroop, D. Dynamic surface control of nonlinear systems / D. Swaroop, J.K. Hedrick, P.P. Yip, J.C. Gerdes. - Proceedings American Control Conference, Albuquerque, New Mexico, USA, 1997, pp. 3028-3034.

308. Takagi, T. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control / T. Takagi, M. Sugeno. - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, №15, 1985, pp. 116-132.

309. Takagi, T. Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions / T. Takagi, M. Sugeno. - IFAC Proceedings Series, 1984, pp. 55–60.

310. Talaeizadeh, V. Direct torque control of six-phase induction motors using three-phase matrix converter / V. Talaeizadeh, R. Kianinezhad, S.G. Seyfossadat. - Energy Convers. Manage., 2010, №51, pp. 2482-2491.

311. Tanaka, K. Stability analysis and design of fuzzy control systems / K. Tanaka, M. Sugeno. - IEEE Trans. Fuzzy Syst. 1992. V. 45. № 2. P. 135–156.

312. Tanaka, K, Trajectory stabilization of a model car via fuzzy control / K. Tanaka, M. Sano. - Fuzzy Sets and Systems, №70 (2–3), 1995, pp. 155-170.

313. Tanaka, K. Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach / K. Tanaka, H.O. Wang. – N.Y.: Wiley, 2001. – P. 25–41.

314. Tanaka, K. A Unified Fuzzy Model-Based Framework for Modeling and Control of Complex Systems: From Flying Vehicle Control to Brain-Machine Cooperative Control / K. Tanaka, H.O. Wang, H. Ohtake. - WCCI 2012: Advances in Computational Intelligence. pp. 185–208.

315. Tomaszewska, K. Application of the horizontal membership function to the uncertain displacement calculation of a composite massless rod under a tensile load / K. Tomaszewska, A. Piegat. - Conference: 19th International Multi-Conference on Advanced Computer Systems 2014 Miedzyzdroje, Poland, October 22-24.

316. 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

317. Tzafestas, S. Incremental fuzzy expert PID control / S. Tzafestas, N. P. Papanikolopoulos. - IEEE Trans. Industr. Electr, 1990. – Vol. 37. – № 5.

318. 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

319. 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, MTT' 2002 April 8 - April 12, 2002, TOMSK, RUSSIA

320. 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. C. 126-135 DOI: 10.1007/978-3-030-69421-0_14

321. 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

322. Venkatachalam, M. Fuzzy logic based performance improvement of induction motor / M. Venkatachalam, S. Thangavel. - IEEE International Conference In Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends, 2012, pp. 1-7.

323. Wai, R.J. Total sliding-mode speed control of field oriented induction motor servo drive / R.J. Wai, K.M. Lin, C.Y. Lin. - Proceedings of the 5th Asian control conference, Melbourne, Australia, 2004, pp. 1354-1361

324. Wang, D. Neural network-based adaptive dynamic surface control for a class of uncertain nonlinear systems in strict-feedback form / D. Wang, J. Huang. - IEEE Trans. Neural Netw., 2005, №16, pp. 195-202.

325. Wang, H. An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues / H. Wang, K. Tanaka, M. Griffin. - IEEE Transactions on Fuzzy Systems, №4, 1996, pp. 14-23.

326. Wang, H.O. An SOS-Based Control Lyapunov Function Design for Polynomial Fuzzy Control of Nonlinear Systems / R. Furqon, Y.-J. Chen, M. Tanaka, K. Tanaka, H.O. Wang, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2017, 25(4), pp. 775–787, 7486996

327. Wang, L.X. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least squares learning / L.X. Wang, J.M. Mendel. - IEEE Trans. Neural Netw., 1992, №3, pp. 807-814

328. Wang, S. Y. Design of a novel adaptive TSK-fuzzy speed controller for use in direct torque control induction motor drives / S. Y. Wang, C. L. Tseng, C. J. Chiu. - Applied Soft Computing, June, 2015, №31, pp. 396-404.

329. Wang, Y. Zhang Ghousheng, Sheng Xialiang, Fuzzy auto adjust PID controller design of brushless DC motor / Y. Wang, Y. Yu, G. Zhang, X. Sheng. - Elsevier (Physics procedia), Vol. 33, pp. 1533-1539.

330. Wlas, M. Neural-network-based parameter estimations of induction motors / M. Wlas, Z. Krzeminski, H.A. Toliyat. - IEEE Trans. Ind. Electron., №55, 2008, pp. 1783-1794.
331. Yager, R.R. Essentials of Fuzzy Modeling and Control / R.R. Yager, D.P. Filev. - John Wiley and Sons, New York, 1994.
332. Yang, Z.J. Robust position control of a magnetic levitation system via dynamic surface control technique / Z.J. Yang, K. Miyazaki, S. Kane, K. Wada. - IEEE Trans. Ind. Electron., 2004, №51, pp. 26-34
333. Yasunobu, S. Automatic train operation system by predictive fuzzy control / S. Yasunobu, S. Miyamoto. - ZIndust. Applicat. of Fuziy Control. Ed. by M. Sugeno. Noth Holland: Elsevier Sci. Publ., 1985.
334. Yazdanpanah, R, Nonlinear torque and stator flux controller for induction motor drive based on adaptive input-output feedback linearization and sliding mode control / R. Yazdanpanah, J. Soltani, G.R.A. Markadeh. - Energy Convers. Manage., 2008, №49, pp. 541-550
335. Yen, J. Fuzzy Logic: Intelligence, Control, and Information / J. Yen, R. Langari. - Prentice-Hall, 1999.
336. Yip, P.P. Adaptive dynamic surface control: a simplified algorithm for adaptive backstepping control of nonlinear systems / P.P. Yip, J.K. Hedrick. - Int. J. Control, 1998, №71, pp. 959-979
337. Yu, J. Adaptive fuzzy dynamic surface control for induction motors with iron losses in electric vehicle drive systems via backstepping / J. Yu, Y. Ma, C. Lin. - Information Sciences, 10 January, 2017, №376, pp. 172-189.
338. Yu, J. Adaptive fuzzy tracking control for the chaotic permanent magnet synchronous motor drive system via backstepping / J. Yu, B. Chen, H. Yu, J. Gao. - Nonlinear Analysis: Real World Applications, February, 2011, №12, Issue 1, pp. 671-681.
339. Yu, J. Finite-time fuzzy dynamic surface control for permanent magnet synchronous motor stochastic systems with input constraint and load

disturbance / S. Song, J. Yu, L. Zhao, G. Cui. - Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2022, 44(9), стр. 1853–1861

340. Yu, J.P. Approximation-based discrete-time adaptive position tracking control for interior permanent magnet synchronous motors / J.P. Yu, P. Shi, H.S. Yu, B. Chen, C. Lin. - IEEE Trans. Cybernet., 2015, №45, pp. 1363-1371

341. Yu, J.P. Neural network-based adaptive dynamic surface control for permanent magnet synchronous motors / J.P. Yu, P. Shi, W.J. Dong, B. Chen, C. Lin. - IEEE Trans. Neural Netw. Learn. Syst., 2015, №26, pp. 640-645

342. Yu, J.P. Observer and command filter-based adaptive fuzzy output feedback control of uncertain nonlinear systems / J.P. Yu, P. Shi, W.J. Dong, H.S. Yu. - IEEE Trans. Ind. Electron., 2015, №62, pp. 5962-5970

343. Yu, J.P. Position tracking control of induction motors via adaptive fuzzy backstepping / J.P. Yu, B. Chen, H.S. Yu. - Energy Convers. Manage., 2010, №51, pp. 2345-2352

344. Yu, J.P. Reduced-order observer-based adaptive fuzzy tracking control for chaotic permanent magnet synchronous motors / J.P. Yu, Y.M. Ma, H.S. Yu, C. Lin. - Neurocomput. doi:10.1016/j.neucom.2016.05.088.

345. Yu, W.S. Interval type-2 fuzzy adaptive tracking control design for PMDC motor with the sector dead-zones / W.S. Yu, H.S. Chen. - Inf. Sci., 2014, №288, pp. 108-134

346. Zhou, Z.H. A novel approach for fault diagnosis of induction motor with invariant character vectors / Z.H. Zhou, J.W. Zhao, F.L. Cao. - Inf. Sci., 281, 2014, pp. 496-506

347. Zadeh, L. The role of fuzzy logic in the management of uncertainty in expert systems / L. Zadeh, Fuzzy Sets a. Systems. – 1983. – Vol. 11, N 3. – P. 199 – 227.

348. Zadeh, L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh. - Information and Control, №8, 1965, pp. 338-353

349. Zadeh, L.A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes / L.A. Zadeh. - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, №3 (1), 1973, pp. 28-44
350. Zadeh, L.A. Quantitative fuzzy semantics / L.A. Zadeh. - Information Sciences, №3, 1971, pp. 159-176
351. Zadeh, L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / L.A. Zadeh. - Information Sciences, №8, 1975, pp. 43-80
352. Zeb, K. Performance of adaptive PI based on fuzzy logic for Indirect Vector Control Induction Motor drive / K. Zeb, K. Saleem, C.A. Mehmood, W. Uddin, M.Z. Ur Rehman, A. Haider, M.A. Javed. - In Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI), 2nd International Conference, 2016, pp. 93-98.
353. Zerikat, M. High-performance sensorless vector control of induction motor drives using artificial intelligent technique / M. Zerikat, A. Mechernene, S. Chekroun. - European Transactions on Electrical Power, 2011, №21, pp. 787–800.
354. Zerikat, M. A New Speed Observer Based on Fuzzy Sliding Mode Sensorless Control Scheme for a High- Performance Induction Motor Drive / M. Zerikat, L. Chrifi-Alaoui, S. Chekroun. - IFAC Proceedings Volumes, 2009, №42, Issue 13, pp. 695-702.
355. Zhao, Y. Comparison of two approaches to automated PI controller tuning for an industrial weigh belt feeder / Y. Zhao, G. Emmanuel, J. Collins. - ISA Transactions, 2004, №43, pp. 611–621.
356. Zhao, Y.M. Performance-based parameter tuning method of model-driven PID control systems / Y.M. Zhao, W.F. Xie, X.W. Tu. - ISA Transactions, 2012, №51, pp. 393–399.

Филиал
 Акционерного общества
 «АВИАЦИОННАЯ ХОЛДИНГОВАЯ
 КОМПАНИЯ «СУХОЙ»
 «Комсомольский-на-Амуре авиа-
 ционный завод
 имени Ю.А. Гагарина»
 (Филиал ПАО «Компания «Сухой»
 «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»)
 Россия, 681018, Хабаровский край,
 г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Советская, 1 тел.
 8 (4217) 52-62-00, 22-85-25
 факс 8 (4217) 52-64-51, 22-98-51
 E-mail: info@knaapo.com
 ОГРН 1037740000649, ИНН 7740000090

«24» 11 2022 г. № _____

На № _____ от _____

АКТ

об использовании научных результатов диссертационной работы Черного Сергея Петровича на тему «Теория и практика развитых нечетких алгоритмов в управлении технологическими процессами»

Результаты диссертационной работы Черного Сергея Петровича на тему «Теория и практика развитых нечетких алгоритмов в управлении технологическими процессами» использовались на филиале АО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина» при проведении договоров НИОКиТР №86-3/13 от 05.12.2013 г. по теме «Разработка технологии и опытно-промышленного образца реконфигурируемой установки для формообразования панелей двойной кривизны летательных аппаратов» и №86-10/16 от 16.03.2016 г. по теме «Разработка эскизного проекта опытно-промышленного образца стержневой установки для формования крупнобаритных плит». Применение переданных теоретических и практических данных для элементов и алгоритмов интеллектуальных систем управления многозвенными параллельными электроприводами, позволило оптимизировать системы управления реконфигурируемой установки для формообразования панелей двойной кривизны летательных аппаратов.

Главный научный сотрудник,
 руководитель научно-производственного
 инженерингового центра
 филиала АО «Компания «Сухой» «КнААЗ им. Ю.А. Гагарина»
 канд. техн. наук, доцент

Р.Ф. Крупский

Подпись Крупский Р.Ф. заверяю:
 Начальник ОК



А.М. Корсунов

УТВЕРЖДАЮ:

Главный инженер ООО «Амурсталь»

/Бащкиров Д.В./

«14»

2022 г.



АКТ

об использовании

научных результатов диссертационной работы

Черного Сергея Петровича

Подписавшийся ниже, начальник отдела АСУ ТП, Урасов Д.В. подтверждает, что результаты, полученные в диссертационной работе Черного Сергея Петровича на тему «Теория и практика развитых нечетких алгоритмов в управлении технологическими процессами» могут быть использованы на предприятиях металлургической отрасли, путем применения переданных теоретических и практических данных, для алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальной системы управления комплексом ультразвуковых газокислородных горелок, а также формализации процессов фильтрации сигналов управления пропорциональным регулятором для электрода клапана в дуговой сталеплавильной печи с применением нечеткого регулирования.

Начальник отдела АСУ ТП

/Урасов Д.В./

УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер – первый

заместитель директора

Амурского ЛПУ МГ ООО «Газпром трансгаз Томск»

С.В. Барсков/

« 15 »  2022 г.

АКТ

об использовании

научных результатов диссертационной работы

Черного Сергея Петровича

Мы, ниже подписавшиеся, главный инженер – первый заместитель директора Амурского линейного производственного управления магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Томск», Барсков С.В. и старший диспетчер Амурского линейного производственного управления магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Томск», Гусаров А.А. подтверждаем, что результаты, полученные в диссертационной работе Черного Сергея Петровича на тему «Теория и практика развитых нечетких алгоритмов в управлении технологическими процессами» могут быть использованы в Амурском линейном производственном управлении магистральных газопроводов ООО «Газпром трансгаз Томск» путем применения переданных теоретических и практических данных для применения развитых нечетких алгоритмов управления при реализации процедур энергоэффективного управления электроприводами различного назначения.

Старший диспетчер Амурского линейного
производственного управления магистральных
газопроводов ООО «Газпром трансгаз Томск»

 /Гусаров А.А./

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по НИИР

/А.В. Космынин/

2022 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс

Комиссия в составе председателя: декана ФЭУ, доцента Гудима А.С, и членов комиссии: профессора кафедры ЭПАПУ, профессора Соловьева В.А., доцента кафедры ЭПАПУ, доцента Стельмашука С.В., доцента кафедры ЭПАПУ, доцента Васильченко С.А. составили настоящий акт в том, что с 2022 года в Комсомольском-на-Амуре государственном университете внедрены в учебный процесс кафедры ЭПАПУ для направлений подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», профиль «Робототехнические комплексы и системы»; 27.03.04 «Управление в технических системах», профиль «Автоматизация и управление технологическими процессами»; 27.04.04 «Управление в технических системах», профиль «Управление и информатика в технических системах» результаты диссертационной работы Черного С.П.

Вид внедренных результатов:

1. Алгоритмы синтеза развитых нечетких систем управления технологическими процессами;
2. Структурные решения при моделировании многокаскадных нечетких логических регуляторов.

Результаты используются в курсах «Интеллектуальные технологии в управлении техническими системами», «Искусственный интеллект в задачах управления», а также в курсовом проектировании и при выполнении ВКР и магистерских диссертаций.

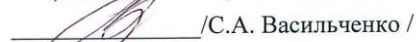
Подпись председателя комиссии:

 /А.С. Гудим/

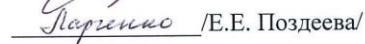
члены комиссии:

 /В.А. Соловьев /

 /С.В. Стельмашук/

 /С.А. Васильченко /

Начальник УМУ

 /Е.Е. Поздеева/

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора
с алгоритмом вывода Сугено во внешнем каскаде

```

/*
 * File: sugeno_model.c
 *
#include "sugeno_model.h"
#include "sugeno_model_private.h"

/* Block signals (default storage) */
B_sugeno_model_T sugeno_model_B;

/* Continuous states */
X_sugeno_model_T sugeno_model_X;

/* Block states (default storage) */
DW_sugeno_model_T sugeno_model_DW;

ExtY_sugeno_model_T sugeno_model_Y;
static RT_MODEL_sugeno_model_T sugeno_model_M_;
RT_MODEL_sugeno_model_T *const sugeno_model_M = &sugeno_model_M_;

/* Forward declaration for local functions */
static void sugeno_model_trimf(const real_T x[101], const real_T params[3],
    real_T y[101]);

/* Forward declaration for local functions */
static real_T sugeno_model_trimf_f(real_T x, const real_T params[3]);

/* Function for MATLAB Function: '<S3>/Evaluate Rule Consequents' */
static void sugeno_model_trimf(const real_T x[101], const real_T params[3],
    real_T y[101])
{
    real_T a;
    real_T b;
    real_T c;
    real_T x_0;
    int32_T i;
    a = params[0];
    b = params[1];
    c = params[2];
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        x_0 = x[i];
        y[i] = 0.0;
        if ((a != b) && (a < x_0) && (x_0 < b)) {
            y[i] = 1.0 / (b - a) * (x_0 - a);
        }

        if ((b != c) && (b < x_0) && (x_0 < c)) {
            y[i] = 1.0 / (c - b) * (c - x_0);
        }

        if (x_0 == b) {
            y[i] = 1.0;
        }
    }
}

/*
 * Output and update for atomic system:

```

```

* '<S3>/Evaluate Rule Consequents'
* '<S4>/Evaluate Rule Consequents'
*/
void sugeno__EvaluateRuleConsequents(const real_T rtu_antecedentOutputs[5],
const real_T rtu_samplePoints[101], real_T rty_aggregatedOutputs[101],
B_EvaluateRuleConsequents_sug_T *localB)
{
    real_T x_idx_0;
    real_T x_idx_1;
    int32_T i;
    int32_T sampleID;
    boolean_T tmp;
    static const int8_T b[5] = { 1, 2, 2, 5, 5 };

    localB->dv1[0] = -0.75;
    localB->dv1[1] = -0.5;
    localB->dv1[2] = -0.25;
    sugeno_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        rty_aggregatedOutputs[i] = 0.0;
        localB->outputMFCache[5 * i] = localB->dv[i];
    }

    localB->dv1[0] = -0.5;
    localB->dv1[1] = -0.25;
    localB->dv1[2] = 0.0;
    sugeno_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        localB->outputMFCache[5 * i + 1] = localB->dv[i];
    }

    localB->dv1[0] = -0.25;
    localB->dv1[1] = 0.0;
    localB->dv1[2] = 0.25;
    sugeno_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        localB->outputMFCache[5 * i + 2] = localB->dv[i];
    }

    localB->dv1[0] = 0.0;
    localB->dv1[1] = 0.25;
    localB->dv1[2] = 0.5;
    sugeno_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        localB->outputMFCache[5 * i + 3] = localB->dv[i];
    }

    localB->dv1[0] = 0.25;
    localB->dv1[1] = 0.5;
    localB->dv1[2] = 0.75;
    sugeno_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        localB->outputMFCache[5 * i + 4] = localB->dv[i];
    }

    for (i = 0; i < 5; i++) {
        for (sampleID = 0; sampleID < 101; sampleID++) {
            x_idx_0 = localB->outputMFCache[(5 * sampleID + b[i]) - 1];
            x_idx_1 = rtu_antecedentOutputs[i];
            localB->x = x_idx_0;
            tmp = rtIsNaN(x_idx_0);
            x_idx_0 = rty_aggregatedOutputs[sampleID];

```

```

if (!(localB->x > x_idx_1)) {
    if (tmp) {
        if (rtIsNaN(x_idx_1)) {
            x_idx_1 = localB->x;
        }
    } else {
        x_idx_1 = localB->x;
    }
}

if (x_idx_0 < x_idx_1) {
    rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_1;
} else if (rtIsNaN(x_idx_0)) {
    if (!rtIsNaN(x_idx_1)) {
        rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_1;
    } else {
        rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_0;
    }
} else {
    rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_0;
}
}
}

/* Function for MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Antecedents' */
static real_T sugeno_model_trimf_f(real_T x, const real_T params[3])
{
    real_T y;
    y = 0.0;
    if ((params[0] != params[1]) && (params[0] < x) && (x < params[1])) {
        y = 1.0 / (params[1] - params[0]) * (x - params[0]);
    }

    if ((params[1] != params[2]) && (params[1] < x) && (x < params[2])) {
        y = 1.0 / (params[2] - params[1]) * (params[2] - x);
    }

    if (x == params[1]) {
        y = 1.0;
    }

    return y;
}

/* Model step function */
void sugeno_model_step(void)
{
    static const int8_T b[14] = { 1, 3, 5, 5, 5, 5, 3, 1, 1, 1, 3, 4, 5, 3 };

    static const int8_T b_0[28] = { 5, 5, 5, 5, 1, 1, 3, 5, 5, 5, 5, 1, 1, 3, 5, 5,
        5, 5, 1, 1, 4, 5, 5, 5, 5, 1, 1, 4 };

    static const int8_T b_1[10] = { 3, 3, 3, 3, 3, 1, 2, 3, 4, 5 };

    static const int8_T b_2[5] = { 1, 2, 2, 5, 5 };

    if (rtmIsMajorTimeStep(sugeno_model_M)) {
        /* set solver stop time */
        rtsiSetSolverStopTime(&sugeno_model_M->solverInfo,
            ((sugeno_model_M->Timing.clockTick0+1)*
            sugeno_model_M->Timing.stepSize0));
    }
}

```

```

} /* end MajorTimeStep */
sugeno_model_B.u = sugeno_model_P.u_C * sugeno_model_X.u_CSTATE;
if (rtmIsMajorTimeStep(sugeno_model_M)) {
/* Output: '<Root>/Output' incorporates:
* Gain: '<Root>/Сугено'
* Sum: '<Root>/Sum5'
* TransferFcn: '<Root>/ВЫХ2'
*/
sugeno_model_Y.Output = (sugeno_model_P.u_C_a * sugeno_model_X.u_CSTATE_i +
sugeno_model_B.u) * sugeno_model_P._Gain;
}

/* TransferFcn: '<Root>/низ1' */
sugeno_model_B.u_d = 0.0;
sugeno_model_B.u_d += sugeno_model_P.u_C_ac * sugeno_model_X.u_CSTATE_k;

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller8' */
/* MATLAB Function: '<S5>/Evaluate Rule Antecedents' incorporates:
* SignalConversion generated from: '<S23>/ SFunction '
*/
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
sugeno_model_B.dv[0] = -100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 100.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[0] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 200.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[1] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 300.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[2] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 400.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[3] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 400.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 500.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[4] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = -55.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 55.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[5] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 55.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 110.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[6] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 55.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 110.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 165.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[7] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 110.0;

```

```

sugeno_model_B.dv[1] = 165.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 220.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[8] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 165.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 220.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 275.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[9] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u,
    sugeno_model_B.dv);
for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 7;
    sugeno_model_B.ruleID++) {
    sugeno_model_B.u = sugeno_model_B.inputMFCache[b[sugeno_model_B.ruleID + 7]
        + 4] * sugeno_model_B.inputMFCache[b[sugeno_model_B.ruleID] - 1];
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e += sugeno_model_B.u;
    sugeno_model_B.antecedentOutputs[sugeno_model_B.ruleID] = sugeno_model_B.u;
}

/* MATLAB Function: '<S5>/Evaluate Rule Consequents' */
sugeno_model_B.outputMFCache[0] = 0.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[1] = 0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache[2] = 0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache[3] = 0.75;
sugeno_model_B.outputMFCache[4] = 1.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[5] = 0.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[6] = 0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache[7] = 0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache[8] = 0.75;
sugeno_model_B.outputMFCache[9] = 1.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[10] = 0.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[11] = 0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache[12] = 0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache[13] = 0.75;
sugeno_model_B.outputMFCache[14] = 1.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[15] = 0.0;
sugeno_model_B.outputMFCache[16] = 0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache[17] = 0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache[18] = 0.75;
sugeno_model_B.outputMFCache[19] = 1.0;
for (sugeno_model_B.outputID = 0; sugeno_model_B.outputID < 4;
    sugeno_model_B.outputID++) {
    sugeno_model_B.aggregatedOutputs[sugeno_model_B.outputID] = 0.0;
    for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 7;
        sugeno_model_B.ruleID++) {
        sugeno_model_B.aggregatedOutputs[sugeno_model_B.outputID] +=
            sugeno_model_B.outputMFCache[(b_0[7 * sugeno_model_B.outputID +
                sugeno_model_B.ruleID] + 5 * sugeno_model_B.outputID) - 1] *
            sugeno_model_B.antecedentOutputs[sugeno_model_B.ruleID];
    }
}

/* MATLAB Function: '<S5>/Defuzzify Outputs' incorporates:
 * MATLAB Function: '<S5>/Evaluate Rule Antecedents'
 */
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e == 0.0) {
    sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[sugeno_model_B.outputID] = 0.5;
} else {
    sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[sugeno_model_B.outputID] = 1.0 /
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e *
        sugeno_model_B.aggregatedOutputs[sugeno_model_B.outputID];
}

/* End of MATLAB Function: '<S5>/Defuzzify Outputs' */
}

```

```

/* End of MATLAB Function: '<S5>/Evaluate Rule Consequents' */
/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller8' */

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller1' */
/* MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Antecedents' incorporates:
 * SignalConversion generated from: '<S11>/ SFunction '
 */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
sugeno_model_B.dv[0] = -100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 100.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[0] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 200.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[1] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 300.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[2] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 400.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[3] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 400.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 500.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[4] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = -0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[5] = sugeno_model_trimf_f
(sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[0], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.5;
sugeno_model_B.inputMFCache[6] = sugeno_model_trimf_f
(sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[0], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.75;
sugeno_model_B.inputMFCache[7] = sugeno_model_trimf_f
(sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[0], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[8] = sugeno_model_trimf_f
(sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[0], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[1] = 1.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[9] = sugeno_model_trimf_f
(sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[0], sugeno_model_B.dv);

/* MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Consequents' */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l = 0.0;

```



```

sugeno_model_B.outputMFCache_c[0] = -0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache_c[1] = -0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache_c[2] = 0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache_c[3] = 0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache_c[4] = 0.5;
for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 5;
    sugeno_model_B.ruleID++) {
    /* MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Antecedents' */
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = sugeno_model_B.inputMFCache[2] - 0.0 *
        sugeno_model_B.inputMFCache[2];
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b =
        sugeno_model_B.inputMFCache[b_1[sugeno_model_B.ruleID + 5] + 4];
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i +
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b) -
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i *
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b;
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e += sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i;

    /* MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Consequents' */
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l +=
        sugeno_model_B.outputMFCache_c[b_2[sugeno_model_B.ruleID] - 1] *
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i;
}

/* MATLAB Function: '<S1>/Defuzzify Outputs' incorporates:
 * MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Antecedents'
 * MATLAB Function: '<S1>/Evaluate Rule Consequents'
 */
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e == 0.0) {
    sugeno_model_B.u = 0.5;
} else {
    sugeno_model_B.u = 1.0 / sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e *
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l;
}

/* End of MATLAB Function: '<S1>/Defuzzify Outputs' */
/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller1' */

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller5' */
/* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents' incorporates:
 * SignalConversion generated from: '<S14>/ SFunction '
 */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
sugeno_model_B.dv[0] = -100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 100.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[0] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 200.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[1] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 300.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[2] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 400.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[3] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,

```

```

    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 400.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 500.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[4] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = -0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[5] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[1], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.5;
sugeno_model_B.inputMFCache[6] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[1], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.75;
sugeno_model_B.inputMFCache[7] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[1], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[8] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[1], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[1] = 1.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[9] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[1], sugeno_model_B.dv);

/* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Consequents' */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_1 = 0.0;
sugeno_model_B.outputMFCache_k[0] = -0.5;
sugeno_model_B.outputMFCache_k[1] = -0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache_k[2] = 0.0;
sugeno_model_B.outputMFCache_k[3] = 0.25;
sugeno_model_B.outputMFCache_k[4] = 0.5;
for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 5;
    sugeno_model_B.ruleID++) {
    /* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents' */
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = sugeno_model_B.inputMFCache[2] - 0.0 *
        sugeno_model_B.inputMFCache[2];
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b =
        sugeno_model_B.inputMFCache[b_1[sugeno_model_B.ruleID + 5] + 4];
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i +
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b) -
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i *
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b;
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e += sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i;

    /* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Consequents' */
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_1 +=
        sugeno_model_B.outputMFCache_k[b_2[sugeno_model_B.ruleID] - 1] *
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i;
}

/* MATLAB Function: '<S2>/Defuzzify Outputs' incorporates:
* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents'
* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Consequents'
*/

```

```

if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e == 0.0) {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_1 = 0.5;
} else {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_1 *= 1.0 /
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e;
}

/* End of MATLAB Function: '<S2>/Defuzzify Outputs' */
/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller5' */

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller6' */
/* MATLAB Function: '<S3>/Evaluate Rule Antecedents' incorporates:
 * SignalConversion generated from: '<S17>/ SFunction '
 */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
sugeno_model_B.dv[0] = -100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 100.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[0] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 200.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[1] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 300.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[2] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 400.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[3] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 400.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 500.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[4] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = -0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[5] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[2], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.5;
sugeno_model_B.inputMFCache[6] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[2], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.75;
sugeno_model_B.inputMFCache[7] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[2], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[8] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[2], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[1] = 1.0;

```

```

sugeno_model_B.dv[2] = 1.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[9] = sugeno_model_trimf_f
(sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[2], sugeno_model_B.dv);
for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 5;
    sugeno_model_B.ruleID++) {
    if (0.0 < sugeno_model_B.inputMFCache[2]) {
        sugeno_model_B.outputMFCache_p = sugeno_model_B.inputMFCache[2];
    } else {
        sugeno_model_B.outputMFCache_p = 0.0;
    }

    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b =
        sugeno_model_B.inputMFCache[b_1[sugeno_model_B.ruleID + 5] + 4];
    if (sugeno_model_B.outputMFCache_p <
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b) {
        sugeno_model_B.outputMFCache_p =
            sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b;
    }

    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e += sugeno_model_B.outputMFCache_p;
    sugeno_model_B.outputMFCache_k[sugeno_model_B.ruleID] =
        sugeno_model_B.outputMFCache_p;
}

/* MATLAB Function: '<S3>/Evaluate Rule Consequents' incorporates:
 * Constant: '<S3>/Output Sample Points'
 */
sugeno__EvaluateRuleConsequents(sugeno_model_B.outputMFCache_k,
    sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_g,
    sugeno_model_B.rtb_aggregatedOutputs_j_m,
    &sugeno_model_B.sf_EvaluateRuleConsequents_k);

/* MATLAB Function: '<S3>/Defuzzify Outputs' incorporates:
 * Constant: '<S3>/Output Sample Points'
 * MATLAB Function: '<S3>/Evaluate Rule Antecedents'
 */
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e == 0.0) {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = 0.0;
} else {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b = 0.0;
    for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 101;
        sugeno_model_B.ruleID++) {
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b +=
            sugeno_model_B.rtb_aggregatedOutputs_j_m[sugeno_model_B.ruleID];
    }

    if (sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b == 0.0) {
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i =
            (sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_g[0] +
            sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_g[100]) / 2.0;
    } else {
        for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 101;
            sugeno_model_B.ruleID++) {
            sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e +=
                sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_g[sugeno_model_B.ruleID] *
                sugeno_model_B.rtb_aggregatedOutputs_j_m[sugeno_model_B.ruleID];
        }

        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = 1.0 /
            sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b *
            sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e;
    }
}

```

```

}
}

/* End of MATLAB Function: '<S3>/Defuzzify Outputs' */
/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller6' */

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller7' */
/* MATLAB Function: '<S4>/Evaluate Rule Antecedents' incorporates:
 * SignalConversion generated from: '<S20>/ SFunction '
 */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
sugeno_model_B.dv[0] = -100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 100.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[0] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 200.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[1] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 100.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 300.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[2] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 200.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 400.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[3] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 300.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 400.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 500.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[4] = sugeno_model_trimf_f(sugeno_model_B.u_d,
    sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = -0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[5] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[3], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.0;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.5;
sugeno_model_B.inputMFCache[6] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[3], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.25;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[2] = 0.75;
sugeno_model_B.inputMFCache[7] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[3], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.5;
sugeno_model_B.dv[1] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.0;
sugeno_model_B.inputMFCache[8] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[3], sugeno_model_B.dv);
sugeno_model_B.dv[0] = 0.75;
sugeno_model_B.dv[1] = 1.0;
sugeno_model_B.dv[2] = 1.25;
sugeno_model_B.inputMFCache[9] = sugeno_model_trimf_f
    (sugeno_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_c[3], sugeno_model_B.dv);
for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 5;

```

```

    sugeno_model_B.ruleID++) {
if (0.0 < sugeno_model_B.inputMFCache[2]) {
    sugeno_model_B.outputMFCache_p = sugeno_model_B.inputMFCache[2];
} else {
    sugeno_model_B.outputMFCache_p = 0.0;
}

sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b =
sugeno_model_B.inputMFCache[b_1[sugeno_model_B.ruleID + 5] + 4];
if (sugeno_model_B.outputMFCache_p <
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b) {
    sugeno_model_B.outputMFCache_p =
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b;
}

sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e += sugeno_model_B.outputMFCache_p;
sugeno_model_B.outputMFCache_k[sugeno_model_B.ruleID] =
    sugeno_model_B.outputMFCache_p;
}

/* MATLAB Function: '<S4>/Evaluate Rule Consequents' incorporates:
* Constant: '<S4>/Output Sample Points'
*/
sugeno__EvaluateRuleConsequents(sugeno_model_B.outputMFCache_k,
sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_o,
sugeno_model_B.rtb_aggregatedOutputs_j_m,
&sugeno_model_B.sf_EvaluateRuleConsequents_o);

/* MATLAB Function: '<S4>/Defuzzify Outputs' incorporates:
* Constant: '<S4>/Output Sample Points'
* MATLAB Function: '<S4>/Evaluate Rule Antecedents'
*/
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e == 0.0) {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
} else {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = 0.0;
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b = 0.0;
    for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 101;
        sugeno_model_B.ruleID++) {
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b +=
        sugeno_model_B.rtb_aggregatedOutputs_j_m[sugeno_model_B.ruleID];
    }

    if (sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b == 0.0) {
        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e =
        (sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_o[0] +
        sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_o[100]) / 2.0;
    } else {
        for (sugeno_model_B.ruleID = 0; sugeno_model_B.ruleID < 101;
            sugeno_model_B.ruleID++) {
            sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e +=
            sugeno_model_P.OutputSamplePoints_Value_o[sugeno_model_B.ruleID] *
            sugeno_model_B.rtb_aggregatedOutputs_j_m[sugeno_model_B.ruleID];
        }

        sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e *= 1.0 /
        sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b;
    }
}

/* End of MATLAB Function: '<S4>/Defuzzify Outputs' */
/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller7' */

```

```

/* Sum: '<Root>/Sum1' incorporates:
 * Product: '<Root>/Product1'
 * Product: '<Root>/Product2'
 * Sum: '<Root>/Sum10'
 * Sum: '<Root>/Sum11'
 * TransferFcn: '<Root>/tft1'
 * TransferFcn: '<Root>/tft2'
 */
sugeno_model_B.Sum1 = sugeno_model_P.u_C_f * sugeno_model_X.u_CSTATE_a *
(sugeno_model_B.u + sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l) +
sugeno_model_P.u_C_n * sugeno_model_X.u_CSTATE_h *
(sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i + sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e);

/* Clock: '<S9>/Clock' incorporates:
 * Clock: '<S6>/Clock'
 * Clock: '<S7>/Clock'
 * Clock: '<S8>/Clock'
 */
sugeno_model_B.u = sugeno_model_M->Timing.t[0];

/* Step: '<S6>/Step' incorporates:
 * Step: '<S7>/Step'
 * Step: '<S8>/Step'
 * Step: '<S9>/Step'
 */
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = sugeno_model_M->Timing.t[0];
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e < sugeno_model_P.In1_start) {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l = sugeno_model_P.Step_Y0;
} else {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l = sugeno_model_P.In1_slope;
}

/* End of Step: '<S6>/Step' */

/* Step: '<S7>/Step' */
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e < sugeno_model_P.In2_start) {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = sugeno_model_P.Step_Y0_b;
} else {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i = sugeno_model_P.In2_slope;
}

/* Step: '<S8>/Step' */
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e < sugeno_model_P.In3_start) {
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b = sugeno_model_P.Step_Y0_c;
} else {
    sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b = sugeno_model_P.In3_slope;
}

/* Step: '<S9>/Step' */
if (sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e < sugeno_model_P.In4_start) {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = sugeno_model_P.Step_Y0_m;
} else {
    sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e = sugeno_model_P.In4_slope;
}

/* Sum: '<Root>/Sum6' incorporates:
 * Clock: '<S9>/Clock'
 * Constant: '<S6>/Constant'
 * Constant: '<S6>/Constant1'
 * Constant: '<S7>/Constant'
 * Constant: '<S7>/Constant1'

```

```

* Constant: '<S8>/Constant'
* Constant: '<S8>/Constant1'
* Constant: '<S9>/Constant'
* Constant: '<S9>/Constant1'
* Product: '<S6>/Product'
* Product: '<S7>/Product'
* Product: '<S8>/Product'
* Product: '<S9>/Product'
* Sum: '<Root>/Sum7'
* Sum: '<Root>/Sum9'
* Sum: '<S6>/Output'
* Sum: '<S6>/Sum'
* Sum: '<S7>/Output'
* Sum: '<S7>/Sum'
* Sum: '<S8>/Output'
* Sum: '<S8>/Sum'
* Sum: '<S9>/Output'
* Sum: '<S9>/Sum'
*/
sugeno_model_B.Sum6 = (((sugeno_model_B.u - sugeno_model_P.In1_start) *
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_l + sugeno_model_P.In1_InitialOutput) -
((sugeno_model_B.u - sugeno_model_P.In2_start) *
sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_i + sugeno_model_P.In2_InitialOutput)) -
(((sugeno_model_B.u - sugeno_model_P.In3_start) *
sugeno_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_b +
sugeno_model_P.In3_InitialOutput) - ((sugeno_model_B.u -
sugeno_model_P.In4_start) * sugeno_model_B.defuzzifiedOutputs_e +
sugeno_model_P.In4_InitialOutput));

/* Gain: '<Root>/K1' */
sugeno_model_B.K1 = sugeno_model_P.K1_Gain * sugeno_model_B.Sum6;

/* TransportDelay: '<Root>/TD11' incorporates:
* TransferFcn: '<Root>/дон1'
*/
sugeno_model_B.TD11 = 0.0;
sugeno_model_B.TD11 += sugeno_model_P.u_C_e * sugeno_model_X.u_CSTATE_c1;

/* Sum: '<Root>/Sum2' incorporates:
* TransferFcn: '<Root>/дон2'
* TransferFcn: '<Root>/сл/1'
*/
sugeno_model_B.u = (sugeno_model_P.u_C_k * sugeno_model_X.u_CSTATE_c +
sugeno_model_P.u_C_h * sugeno_model_X.u_CSTATE_ix) +
sugeno_model_B.TD11;

/* TransportDelay: '<Root>/TD1' */
{
real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD1_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD1_Delay;
sugeno_model_B.TD11 = rt_TDelayInterpolate(
tMinusDelay,
0.0,
*uBuffer,
sugeno_model_DW.TD1_IWORK.CircularBufSize,
&sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Last,
sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Tail,
sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head,
sugeno_model_P.TD1_InitOutput,
0,
0);
}

```



```

}

/* Sum: '<Root>/Sum3' incorporates:
 * TransferFcn: '<Root>/доп3'
 */
sugeno_model_B.Sum3 = (sugeno_model_B.TD11 + sugeno_model_B.u) +
    sugeno_model_P.u_C_d * sugeno_model_X.u_CSTATE_g;

/* TransportDelay: '<Root>/TD11' incorporates:
 * TransferFcn: '<Root>/сл//2_1'
 */
sugeno_model_B.TD11 = 0.0;
sugeno_model_B.TD11 += sugeno_model_P.u_1_C * sugeno_model_X.u_1_CSTATE;

/* Sum: '<Root>/Sum4' incorporates:
 * TransferFcn: '<Root>/возд//2_1'
 */
sugeno_model_B.Sum4 = sugeno_model_P.u_1_C_f * sugeno_model_X.u_1_CSTATE_1 +
    sugeno_model_B.TD11;

/* TransportDelay: '<Root>/TD11' */
{
    real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD11_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD11_Delay;
    sugeno_model_B.TD11 = rt_TDelayInterpolate(
        tMinusDelay,
        0.0,
        *uBuffer,
        sugeno_model_DW.TD11_IWORK.CircularBufSize,
        &sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Last,
        sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Tail,
        sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head,
        sugeno_model_P.TD11_InitOutput,
        0,
        0);
}

/* Sum: '<Root>/Sum8' incorporates:
 * TransferFcn: '<Root>/прям1'
 */
sugeno_model_B.Sum8 = sugeno_model_P.u_C_d5 * sugeno_model_X.u_CSTATE_p +
    sugeno_model_B.TD11;

/* TransportDelay: '<Root>/TD10' */
{
    real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD10_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD10_Delay;
    sugeno_model_B.TD10 = rt_TDelayInterpolate(
        tMinusDelay,
        0.0,
        *uBuffer,
        sugeno_model_DW.TD10_IWORK.CircularBufSize,
        &sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Last,
        sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Tail,
        sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head,
        sugeno_model_P.TD10_InitOutput,
        0,
        0);
}

```

```

/* TransportDelay: '<Root>/TD12' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD12_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD12_Delay;
  sugeno_model_B.TD12 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.CircularBufSize,
    &sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Last,
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Tail,
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head,
    sugeno_model_P.TD12_InitOutput,
    0,
    0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD2' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD2_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD2_Delay;
  sugeno_model_B.TD2 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.CircularBufSize,
    &sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Last,
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Tail,
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head,
    sugeno_model_P.TD2_InitOutput,
    0,
    0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD3' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD3_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD3_Delay;
  sugeno_model_B.TD3 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.CircularBufSize,
    &sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Last,
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Tail,
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head,
    sugeno_model_P.TD3_InitOutput,
    0,
    0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD4' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD4_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD4_Delay;
  sugeno_model_B.TD4 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,

```

```

    *uBuffer,
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.CircularBufSize,
    &sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Last,
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Tail,
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head,
    sugeno_model_P.TD4_InitOutput,
    0,
    0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD5' */
{
    real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD5_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD5_Delay;
    sugeno_model_B.TD5 = rt_TDelayInterpolate(
        tMinusDelay,
        0.0,
        *uBuffer,
        sugeno_model_DW.TD5_IWORK.CircularBufSize,
        &sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Last,
        sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Tail,
        sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head,
        sugeno_model_P.TD5_InitOutput,
        0,
        0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD6' */
{
    real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD6_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD6_Delay;
    sugeno_model_B.TD6 = rt_TDelayInterpolate(
        tMinusDelay,
        0.0,
        *uBuffer,
        sugeno_model_DW.TD6_IWORK.CircularBufSize,
        &sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Last,
        sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Tail,
        sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head,
        sugeno_model_P.TD6_InitOutput,
        0,
        0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD7' */
{
    real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD7_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD7_Delay;
    sugeno_model_B.TD7 = rt_TDelayInterpolate(
        tMinusDelay,
        0.0,
        *uBuffer,
        sugeno_model_DW.TD7_IWORK.CircularBufSize,
        &sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Last,
        sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Tail,
        sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head,
        sugeno_model_P.TD7_InitOutput,
        0,
        0);
}

```

```

}

/* TransportDelay: '<Root>/TD8' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD8_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD8_Delay;
  sugeno_model_B.TD8 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    sugeno_model_DW.TD8_IWORK.CircularBufSize,
    &sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Last,
    sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Tail,
    sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head,
    sugeno_model_P.TD8_InitOutput,
    0,
    0);
}

/* TransportDelay: '<Root>/TD9' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD9_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  real_T tMinusDelay = simTime - sugeno_model_P.TD9_Delay;
  sugeno_model_B.TD9 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    sugeno_model_DW.TD9_IWORK.CircularBufSize,
    &sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Last,
    sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Tail,
    sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head,
    sugeno_model_P.TD9_InitOutput,
    0,
    0);
}

/* TransferFcn: '<Root>/в03д//1' */
sugeno_model_B.u_d_f = 0.0;
sugeno_model_B.u_d_f += sugeno_model_P.u_C_o * sugeno_model_X.u_CSTATE_ad;

/* TransferFcn: '<Root>/вых1' */
sugeno_model_B.u_n = 0.0;
sugeno_model_B.u_n += sugeno_model_P.u_C_oq * sugeno_model_X.u_CSTATE_f;

/* TransferFcn: '<Root>/вых1_1' */
sugeno_model_B.u_1 = 0.0;
sugeno_model_B.u_1 += sugeno_model_P.u_1_C_g * sugeno_model_X.u_1_CSTATE_j;

/* TransferFcn: '<Root>/обп//1' */
sugeno_model_B.u_i = 0.0;
sugeno_model_B.u_i += sugeno_model_P.u_C_ei * sugeno_model_X.u_CSTATE_b;

/* TransferFcn: '<Root>/обп//2_1' */
sugeno_model_B.u_1_c = 0.0;
sugeno_model_B.u_1_c += sugeno_model_P.u_1_C_a * sugeno_model_X.u_1_CSTATE_li;

/* TransferFcn: '<Root>/обп1' */
sugeno_model_B.u_c = 0.0;
sugeno_model_B.u_c += sugeno_model_P.u_C_j * sugeno_model_X.u_CSTATE_an;
if (rtmIsMajorTimeStep(sugeno_model_M)) {

```

```

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD1' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD1_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD1_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Tail <
      (sugeno_model_DW.TD1_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
      (sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Tail+1) : 0);
  }

  (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD1_IWORK.CircularBufSize)
  [sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head] = simTime;
  (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head] = sugeno_model_B.K1;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD11' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD11_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD11_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Tail <
      (sugeno_model_DW.TD11_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
      (sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Tail+1) : 0);
  }

  (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD11_IWORK.CircularBufSize)
  [sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head] = simTime;
  (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_i;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD10' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD10_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD10_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Tail <
      (sugeno_model_DW.TD10_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
      (sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Tail+1) : 0);
  }

  (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD10_IWORK.CircularBufSize)
  [sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head] = simTime;
  (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head] = sugeno_model_B.Sum4;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD12' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**)&sugeno_model_DW.TD12_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD12_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Tail) {

```

```

sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Tail <
(sugeno_model_DW.TD12_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Tail+1) : 0);
}

(*uBuffer + sugeno_model_DW.TD12_IWORK.CircularBufSize)
[sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_1_c;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD2' */
{
real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD2_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head <
(sugeno_model_DW.TD2_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head+1) : 0);
if (sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Tail) {
sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Tail <
(sugeno_model_DW.TD2_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + sugeno_model_DW.TD2_IWORK.CircularBufSize)
[sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_d;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD3' */
{
real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD3_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head <
(sugeno_model_DW.TD3_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head+1) : 0);
if (sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Tail) {
sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Tail <
(sugeno_model_DW.TD3_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + sugeno_model_DW.TD3_IWORK.CircularBufSize)
[sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_n;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD4' */
{
real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD4_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head <
(sugeno_model_DW.TD4_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head+1) : 0);
if (sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Tail) {
sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Tail <
(sugeno_model_DW.TD4_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + sugeno_model_DW.TD4_IWORK.CircularBufSize)
[sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_d_f;
}

```

```

}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD5' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD5_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD5_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Tail <
      (sugeno_model_DW.TD5_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
      (sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Tail+1) : 0);
  }

  (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD5_IWORK.CircularBufSize)
  [sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head] = simTime;
  (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head] = sugeno_model_B.Sum3;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD6' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD6_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD6_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Tail <
      (sugeno_model_DW.TD6_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
      (sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Tail+1) : 0);
  }

  (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD6_IWORK.CircularBufSize)
  [sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head] = simTime;
  (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_d_f;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD7' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD7_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD7_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head+1) : 0);
  if (sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Tail <
      (sugeno_model_DW.TD7_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
      (sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Tail+1) : 0);
  }

  (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD7_IWORK.CircularBufSize)
  [sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head] = simTime;
  (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head] = sugeno_model_B.TD12;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD8' */
{
  real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD8_PWORK.TUbufferPtrs[0];
  real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head <
    (sugeno_model_DW.TD8_IWORK.CircularBufSize-1)) ?

```

```

(sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head+1) : 0);
if (sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Tail) {
    sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Tail <
        (sugeno_model_DW.TD8_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
        (sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Tail+1) : 0);
}

(*uBuffer + sugeno_model_DW.TD8_IWORK.CircularBufSize)
[sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head] = sugeno_model_B.Sum6;
}

/* Update for TransportDelay: '<Root>/TD9' */
{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &sugeno_model_DW.TD9_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head = ((sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head <
        (sugeno_model_DW.TD9_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
        (sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head+1) : 0);
    if (sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head == sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Tail) {
        sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Tail = ((sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Tail <
            (sugeno_model_DW.TD9_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
            (sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Tail+1) : 0);
    }

    (*uBuffer + sugeno_model_DW.TD9_IWORK.CircularBufSize)
    [sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head] = simTime;
    (*uBuffer)[sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head] = sugeno_model_B.u_d_f;
}
}

/* end MajorTimeStep */

void sugeno_model_derivatives(void)
{
    XDot_sugeno_model_T * _rtXdot;
    _rtXdot = ((XDot_sugeno_model_T *) sugeno_model_M->derivs);

    /* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/вex1' */
    _rtXdot->u_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE += sugeno_model_P.u_A * sugeno_model_X.u_CSTATE;
    _rtXdot->u_CSTATE += sugeno_model_B.TD10;

    /* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/вых2' */
    _rtXdot->u_CSTATE_i = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE_i += sugeno_model_P.u_A_k * sugeno_model_X.u_CSTATE_i;
    _rtXdot->u_CSTATE_i += sugeno_model_B.u_1;

    /* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/низ1' */
    _rtXdot->u_CSTATE_k = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE_k += sugeno_model_P.u_A_e * sugeno_model_X.u_CSTATE_k;
    _rtXdot->u_CSTATE_k += sugeno_model_B.TD8;

    /* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/шт1' */
    _rtXdot->u_CSTATE_a = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE_a += sugeno_model_P.u_A_j * sugeno_model_X.u_CSTATE_a;
    _rtXdot->u_CSTATE_a += sugeno_model_B.TD9;

    /* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/шт2' */
    _rtXdot->u_CSTATE_h = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE_h += sugeno_model_P.u_A_js * sugeno_model_X.u_CSTATE_h;
    _rtXdot->u_CSTATE_h += sugeno_model_B.TD4;

    /* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/дон2' */

```



```

_rtXdot->u_CSTATE_c = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_c += sugeno_model_P.u_A_g * sugeno_model_X.u_CSTATE_c;
_rtXdot->u_CSTATE_c += sugeno_model_B.TD7;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/сл//1' */
_rtXdot->u_CSTATE_ix = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ix += sugeno_model_P.u_A_ks * sugeno_model_X.u_CSTATE_ix;
_rtXdot->u_CSTATE_ix += sugeno_model_B.TD2;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/доп1' */
_rtXdot->u_CSTATE_c1 = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_c1 += sugeno_model_P.u_A_g4 * sugeno_model_X.u_CSTATE_c1;
_rtXdot->u_CSTATE_c1 += sugeno_model_B.TD6;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/доп3' */
_rtXdot->u_CSTATE_g = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_g += sugeno_model_P.u_A_n * sugeno_model_X.u_CSTATE_g;
_rtXdot->u_CSTATE_g += sugeno_model_B.TD3;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/сл//2_1' */
_rtXdot->u_1_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->u_1_CSTATE += sugeno_model_P.u_1_A * sugeno_model_X.u_1_CSTATE;
_rtXdot->u_1_CSTATE += sugeno_model_B.TD5;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/возд//2_1' */
_rtXdot->u_1_CSTATE_1 = 0.0;
_rtXdot->u_1_CSTATE_1 += sugeno_model_P.u_1_A_g * sugeno_model_X.u_1_CSTATE_1;
_rtXdot->u_1_CSTATE_1 += sugeno_model_B.Sum1;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/прям1' */
_rtXdot->u_CSTATE_p = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_p += sugeno_model_P.u_A_1 * sugeno_model_X.u_CSTATE_p;
_rtXdot->u_CSTATE_p += sugeno_model_B.u_d;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/возд//1' */
_rtXdot->u_CSTATE_ad = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ad += sugeno_model_P.u_A_lh * sugeno_model_X.u_CSTATE_ad;
_rtXdot->u_CSTATE_ad += sugeno_model_B.u_d;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/вых1' */
_rtXdot->u_CSTATE_f = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_f += sugeno_model_P.u_A_b * sugeno_model_X.u_CSTATE_f;
_rtXdot->u_CSTATE_f += sugeno_model_B.Sum8;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/вых1_1' */
_rtXdot->u_1_CSTATE_j = 0.0;
_rtXdot->u_1_CSTATE_j += sugeno_model_P.u_1_A_i * sugeno_model_X.u_1_CSTATE_j;
_rtXdot->u_1_CSTATE_j += sugeno_model_B.u_n;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/обп//1' */
_rtXdot->u_CSTATE_b = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_b += sugeno_model_P.u_A_10 * sugeno_model_X.u_CSTATE_b;
_rtXdot->u_CSTATE_b += sugeno_model_B.TD12;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/обп//2_1' */
_rtXdot->u_1_CSTATE_li = 0.0;
_rtXdot->u_1_CSTATE_li += sugeno_model_P.u_1_A_in *
sugeno_model_X.u_1_CSTATE_li;
_rtXdot->u_1_CSTATE_li += sugeno_model_B.u_c;

/* Derivatives for TransferFcn: '<Root>/обп1' */
_rtXdot->u_CSTATE_an = 0.0;

```

```

_rtXdot->u_CSTATE_an += sugeno_model_P.u_A_jl * sugeno_model_X.u_CSTATE_an;
_rtXdot->u_CSTATE_an += sugeno_model_B.Sum4;
}
{
  /* Setup solver object */
  rtsiSetSimTimeStepPtr(&sugeno_model_M->solverInfo,
    &sugeno_model_M->Timing.simTimeStep);
  rtsiSetTPtr(&sugeno_model_M->solverInfo, &rtmGetTPtr(sugeno_model_M));
  rtsiSetStepSizePtr(&sugeno_model_M->solverInfo,
    &sugeno_model_M->Timing.stepSize0);
  rtsiSetDXPtr(&sugeno_model_M->solverInfo, &sugeno_model_M->derivs);
  rtsiSetContStatesPtr(&sugeno_model_M->solverInfo, (real_T **)
    &sugeno_model_M->contStates);
  rtsiSetNumContStatesPtr(&sugeno_model_M->solverInfo,
    &sugeno_model_M->Sizes.numContStates);
  rtsiSetNumPeriodicContStatesPtr(&sugeno_model_M->solverInfo,
    &sugeno_model_M->Sizes.numPeriodicContStates);
  rtsiSetPeriodicContStateIndicesPtr(&sugeno_model_M->solverInfo,
    &sugeno_model_M->periodicContStateIndices);
  rtsiSetPeriodicContStateRangesPtr(&sugeno_model_M->solverInfo,
    &sugeno_model_M->periodicContStateRanges);
  rtsiSetErrorStatusPtr(&sugeno_model_M->solverInfo, (&rtmGetErrorStatus
    (sugeno_model_M)));
  rtsiSetRTModelPtr(&sugeno_model_M->solverInfo, sugeno_model_M);
}

rtsiSetSimTimeStep(&sugeno_model_M->solverInfo, MAJOR_TIME_STEP);
sugeno_model_M->intgData.y = sugeno_model_M->odeY;
sugeno_model_M->intgData.f[0] = sugeno_model_M->odeF[0];
sugeno_model_M->intgData.f[1] = sugeno_model_M->odeF[1];
sugeno_model_M->intgData.f[2] = sugeno_model_M->odeF[2];
sugeno_model_M->contStates = ((X_sugeno_model_T *) &sugeno_model_X);
rtsiSetSolverData(&sugeno_model_M->solverInfo, (void *)
  &sugeno_model_M->intgData);
rtsiSetSolverName(&sugeno_model_M->solverInfo, "ode3");
rtmSetTPtr(sugeno_model_M, &sugeno_model_M->Timing.tArray[0]);
sugeno_model_M->Timing.stepSize0 = 640.0;

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD1' */
{
  real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD1_RWORK.TUbufferArea[0];
  sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Tail = 0;
  sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Head = 0;
  sugeno_model_DW.TD1_IWORK.Last = 0;
  sugeno_model_DW.TD1_IWORK.CircularBufSize = 1024;
  pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD1_InitOutput;
  pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD1_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD11' */
{
  real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD11_RWORK.TUbufferArea[0];
  sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Tail = 0;
  sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Head = 0;
  sugeno_model_DW.TD11_IWORK.Last = 0;
  sugeno_model_DW.TD11_IWORK.CircularBufSize = 1024;
  pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD11_InitOutput;
  pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
  sugeno_model_DW.TD11_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

```

```

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD10' */
{
    real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD10_RWORK.TUbufferArea[0];
    sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Tail = 0;
    sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Head = 0;
    sugeno_model_DW.TD10_IWORK.Last = 0;
    sugeno_model_DW.TD10_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD10_InitOutput;
    pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    sugeno_model_DW.TD10_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD12' */
{
    real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD12_RWORK.TUbufferArea[0];
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Tail = 0;
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Head = 0;
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.Last = 0;
    sugeno_model_DW.TD12_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD12_InitOutput;
    pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    sugeno_model_DW.TD12_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD2' */
{
    real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD2_RWORK.TUbufferArea[0];
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Tail = 0;
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Head = 0;
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.Last = 0;
    sugeno_model_DW.TD2_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD2_InitOutput;
    pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    sugeno_model_DW.TD2_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD3' */
{
    real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD3_RWORK.TUbufferArea[0];
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Tail = 0;
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Head = 0;
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.Last = 0;
    sugeno_model_DW.TD3_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD3_InitOutput;
    pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    sugeno_model_DW.TD3_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD4' */
{
    real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD4_RWORK.TUbufferArea[0];
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Tail = 0;
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Head = 0;
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.Last = 0;
    sugeno_model_DW.TD4_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD4_InitOutput;
    pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
    sugeno_model_DW.TD4_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD5' */
{

```

```

real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD5_RWORK.TUbufferArea[0];
sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Tail = 0;
sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Head = 0;
sugeno_model_DW.TD5_IWORK.Last = 0;
sugeno_model_DW.TD5_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD5_InitOutput;
pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD5_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD6' */
{
real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD6_RWORK.TUbufferArea[0];
sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Tail = 0;
sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Head = 0;
sugeno_model_DW.TD6_IWORK.Last = 0;
sugeno_model_DW.TD6_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD6_InitOutput;
pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD6_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD7' */
{
real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD7_RWORK.TUbufferArea[0];
sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Tail = 0;
sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Head = 0;
sugeno_model_DW.TD7_IWORK.Last = 0;
sugeno_model_DW.TD7_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD7_InitOutput;
pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD7_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD8' */
{
real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD8_RWORK.TUbufferArea[0];
sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Tail = 0;
sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Head = 0;
sugeno_model_DW.TD8_IWORK.Last = 0;
sugeno_model_DW.TD8_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD8_InitOutput;
pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD8_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* Start for TransportDelay: '<Root>/TD9' */
{
real_T *pBuffer = &sugeno_model_DW.TD9_RWORK.TUbufferArea[0];
sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Tail = 0;
sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Head = 0;
sugeno_model_DW.TD9_IWORK.Last = 0;
sugeno_model_DW.TD9_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = sugeno_model_P.TD9_InitOutput;
pBuffer[1024] = sugeno_model_M->Timing.t[0];
sugeno_model_DW.TD9_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/вєрх1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/вых2' */

```

```

sugeno_model_X.u_CSTATE_i = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/низ1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_k = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/шт1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_a = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/шт2' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_h = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/доп2' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_c = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/сл//1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_ix = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/доп1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_c1 = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/доп3' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_g = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/сл//2_1' */
sugeno_model_X.u_1_CSTATE = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/возд//2_1' */
sugeno_model_X.u_1_CSTATE_l = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/прям1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_p = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/возд//1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_ad = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/вых1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_f = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/вых1_1' */
sugeno_model_X.u_1_CSTATE_j = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/обп//1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_b = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/обп//2_1' */
sugeno_model_X.u_1_CSTATE_li = 0.0;

/* InitializeConditions for TransferFcn: '<Root>/обп1' */
sugeno_model_X.u_CSTATE_an = 0.0;
}

/* Model terminate function */
void sugeno_model_terminate(void)
{
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD1' */

/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD11' */

/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD10' */

/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD12' */

```

```
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD2' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD3' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD4' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD5' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD6' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD7' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD8' */  
/* Terminate for TransportDelay: '<Root>/TD9' */  
}  
  
/*  
* File trailer for generated code.  
*  
* [EOF]  
*/
```

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора с алгоритмом вывода Мамдани во внешнем каскаде

```

#include "mamdani_model.h"
#include "mamdani_model_private.h"
B_mamdani_model_T mamdani_model_B;
X_mamdani_model_T mamdani_model_X;
DW_mamdani_model_T mamdani_model_DW;
ExtY_mamdani_model_T mamdani_model_Y;
static RT_MODEL_mamdani_model_T mamdani_model_M_;
RT_MODEL_mamdani_model_T *const mamdani_model_M = &mamdani_model_M_;
static void mamdani_model_trimf(const real_T x[101], const real_T params[3],
    real_T y[101]);
static real_T mamdani_model_trimf_p(real_T x, const real_T params[3]);
static void mamdani_model_trimf_pf(const real_T x[101], const real_T params[3],
    real_T y[101]);

void mamdani_EvaluateRuleConsequents(const real_T rtu_antecedentOutputs[5],
    real_T *rty_aggregatedOutputs)
{
    real_T outputMFCache[5];
    real_T aggregatedOutputs;
    int32_T ruleID;
    static const int8_T b[5] = { 1, 2, 2, 5, 5 };
    aggregatedOutputs = 0.0;
    outputMFCache[0] = -0.5;
    outputMFCache[1] = -0.25;
    outputMFCache[2] = 0.0;
    outputMFCache[3] = 0.25;
    outputMFCache[4] = 0.5;
    for (ruleID = 0; ruleID < 5; ruleID++) {
        aggregatedOutputs += outputMFCache[b[ruleID] - 1] *
            rtu_antecedentOutputs[ruleID];
    }

    *rty_aggregatedOutputs = aggregatedOutputs;
}

static void mamdani_model_trimf(const real_T x[101], const real_T params[3],
    real_T y[101])
{
    real_T a;
    real_T b;
    real_T c;
    real_T x_0;
    int32_T i;
    a = params[0];
    b = params[1];
    c = params[2];
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        x_0 = x[i];
        y[i] = 0.0;
        if ((a != b) && (a < x_0) && (x_0 < b)) {
            y[i] = 1.0 / (b - a) * (x_0 - a);
        }

        if ((b != c) && (b < x_0) && (x_0 < c)) {
            y[i] = 1.0 / (c - b) * (c - x_0);
        }

        if (x_0 == b) {

```

```

    y[i] = 1.0;
  }
}
}

```

```

void mamda_EvaluateRuleConsequents_o(const real_T rtu_antecedentOutputs[5],
const real_T rtu_samplePoints[101], real_T rty_aggregatedOutputs[101],
B_EvaluateRuleConsequents_m_p_T *localB)
{
  real_T x_idx_0;
  real_T x_idx_1;
  int32_T i;
  int32_T sampleID;
  boolean_T tmp;
  static const int8_T b[5] = { 1, 2, 2, 5, 5 };

  localB->dv1[0] = -0.75;
  localB->dv1[1] = -0.5;
  localB->dv1[2] = -0.25;
  mamdani_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
  for (i = 0; i < 101; i++) {
    rty_aggregatedOutputs[i] = 0.0;
    localB->outputMFCache[5 * i] = localB->dv[i];
  }

  localB->dv1[0] = -0.5;
  localB->dv1[1] = -0.25;
  localB->dv1[2] = 0.0;
  mamdani_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
  for (i = 0; i < 101; i++) {
    localB->outputMFCache[5 * i + 1] = localB->dv[i];
  }

  localB->dv1[0] = -0.25;
  localB->dv1[1] = 0.0;
  localB->dv1[2] = 0.25;
  mamdani_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
  for (i = 0; i < 101; i++) {
    localB->outputMFCache[5 * i + 2] = localB->dv[i];
  }

  localB->dv1[0] = 0.0;
  localB->dv1[1] = 0.25;
  localB->dv1[2] = 0.5;
  mamdani_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
  for (i = 0; i < 101; i++) {
    localB->outputMFCache[5 * i + 3] = localB->dv[i];
  }

  localB->dv1[0] = 0.25;
  localB->dv1[1] = 0.5;
  localB->dv1[2] = 0.75;
  mamdani_model_trimf(rtu_samplePoints, localB->dv1, localB->dv);
  for (i = 0; i < 101; i++) {
    localB->outputMFCache[5 * i + 4] = localB->dv[i];
  }

  for (i = 0; i < 5; i++) {
    for (sampleID = 0; sampleID < 101; sampleID++) {
      x_idx_0 = localB->outputMFCache[(5 * sampleID + b[i]) - 1];
      x_idx_1 = rtu_antecedentOutputs[i];
      localB->x = x_idx_0;
    }
  }
}

```



```

tmp = rtIsNaN(x_idx_0);
x_idx_0 = rty_aggregatedOutputs[sampleID];
if (!(localB->x > x_idx_1)) {
    if (tmp) {
        if (rtIsNaN(x_idx_1)) {
            x_idx_1 = localB->x;
        }
    } else {
        x_idx_1 = localB->x;
    }
}

if (x_idx_0 < x_idx_1) {
    rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_1;
} else if (rtIsNaN(x_idx_0)) {
    if (!rtIsNaN(x_idx_1)) {
        rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_1;
    } else {
        rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_0;
    }
} else {
    rty_aggregatedOutputs[sampleID] = x_idx_0;
}
}
}
}

static real_T mamdani_model_trimf_p(real_T x, const real_T params[3])
{
    real_T y;
    y = 0.0;
    if ((params[0] != params[1]) && (params[0] < x) && (x < params[1])) {
        y = 1.0 / (params[1] - params[0]) * (x - params[0]);
    }

    if ((params[1] != params[2]) && (params[1] < x) && (x < params[2])) {
        y = 1.0 / (params[2] - params[1]) * (params[2] - x);
    }

    if (x == params[1]) {
        y = 1.0;
    }

    return y;
}

static void mamdani_model_trimf_pf(const real_T x[101], const real_T params[3],
    real_T y[101])
{
    mamdani_model_B.a = params[0];
    mamdani_model_B.b = params[1];
    mamdani_model_B.c = params[2];
    for (mamdani_model_B.i_g = 0; mamdani_model_B.i_g < 101; mamdani_model_B.i_g++)
    {
        mamdani_model_B.x = x[mamdani_model_B.i_g];
        y[mamdani_model_B.i_g] = 0.0;
        if ((mamdani_model_B.a != mamdani_model_B.b) && (mamdani_model_B.a <
            mamdani_model_B.x) && (mamdani_model_B.x < mamdani_model_B.b)) {
            y[mamdani_model_B.i_g] = 1.0 / (mamdani_model_B.b - mamdani_model_B.a) *
                (mamdani_model_B.x - mamdani_model_B.a);
        }
    }

    if ((mamdani_model_B.b != mamdani_model_B.c) && (mamdani_model_B.b <

```

```

    mamdani_model_B.x) && (mamdani_model_B.x < mamdani_model_B.c)) {
    y[mamdani_model_B.i_g] = 1.0 / (mamdani_model_B.c - mamdani_model_B.b) *
    (mamdani_model_B.c - mamdani_model_B.x);
    }

    if (mamdani_model_B.x == mamdani_model_B.b) {
    y[mamdani_model_B.i_g] = 1.0;
    }
    }
}

void mamdani_model_step(void)
{
    boolean_T tmp;
    static const int8_T b[14] = { 1, 3, 5, 5, 5, 5, 3, 1, 1, 1, 3, 4, 5, 3 };

    static const int8_T b_0[28] = { 5, 5, 5, 5, 1, 1, 3, 5, 5, 5, 5, 1, 1, 3, 5, 5,
    5, 5, 1, 1, 4, 5, 5, 5, 5, 1, 1, 4 };

    if (rtmIsMajorTimeStep(mamdani_model_M)) {
        rtsiSetSolverStopTime(&mamdani_model_M->solverInfo,
            ((mamdani_model_M->Timing.clockTick0+1)*
            mamdani_model_M->Timing.stepSize0));
    }
    if (rtmIsMinorTimeStep(mamdani_model_M)) {
        mamdani_model_M->Timing.t[0] = rtsiGetT(&mamdani_model_M->solverInfo);
    }

    mamdani_model_B.u = mamdani_model_P.u_C * mamdani_model_X.u_CSTATE;
    if (rtmIsMajorTimeStep(mamdani_model_M)) {
        mamdani_model_Y.Output = (mamdani_model_P.u_C_1 * mamdani_model_X.u_CSTATE_h
            + mamdani_model_B.u) * mamdani_model_P._Gain;
    }

    mamdani_model_B.u_e = 0.0;
    mamdani_model_B.u_e += mamdani_model_P.u_C_f * mamdani_model_X.u_CSTATE_c;

    mamdani_model_B.area = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[0] = -100.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 100.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache[0] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u_e,
        mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 100.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 200.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache[1] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u_e,
        mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 100.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 200.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 300.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache[2] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u_e,
        mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 200.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 300.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 400.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache[3] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u_e,
        mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 300.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 400.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 500.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache[4] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u_e,

```

```

    mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = -55.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 55.0;
mamdani_model_B.inputMFCache[5] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u,
    mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 55.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 110.0;
mamdani_model_B.inputMFCache[6] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u,
    mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 55.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 110.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 165.0;
mamdani_model_B.inputMFCache[7] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u,
    mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 110.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 165.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 220.0;
mamdani_model_B.inputMFCache[8] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u,
    mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 165.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 220.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 275.0;
mamdani_model_B.inputMFCache[9] = mamdani_model_trimf_p(mamdani_model_B.u,
    mamdani_model_B.dv1);
for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 7; mamdani_model_B.i++) {
    mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
        mamdani_model_B.inputMFCache[b[mamdani_model_B.i] - 1];
    if (1.0 > mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p) {
        mamdani_model_B.u = mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
    } else {
        mamdani_model_B.u = 1.0;
    }
}

mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
    mamdani_model_B.inputMFCache[b[mamdani_model_B.i + 7] + 4];
if (mamdani_model_B.u > mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p) {
    mamdani_model_B.u = mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
}

mamdani_model_B.area += mamdani_model_B.u;
mamdani_model_B.antecedentOutputs_i[mamdani_model_B.i] = mamdani_model_B.u;
}

memset(&mamdani_model_B.aggregatedOutputs[0], 0, 404U * sizeof(real_T));
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID << 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

```

```

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID << 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 1] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID << 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 2] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID << 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 3] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID << 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,

```

```

    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 4] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 1];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
mamdani_model_trmf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 5] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 1];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
mamdani_model_trmf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 6] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 1];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
mamdani_model_trmf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 7] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;

```

```

    mamdani_model_B.outputID++) {
mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 1];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
mamdani_model_trmf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 8] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
        + 1];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
mamdani_model_trmf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 9] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
        + 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
mamdani_model_trmf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 10] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
        + 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;

```

```

mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
  mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 11] =
  mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
  mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
  + 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
  mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 12] =
  mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
  mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
  + 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
  mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 13] =
  mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
  mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
  + 2];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
  mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
  mamdani_model_B.outputID++) {
  mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 14] =
  mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

```

```

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 3];
}

```

```

mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 15] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

```

```

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 3];
}

```

```

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 16] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

```

```

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 3];
}

```

```

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 17] =
    mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

```

```

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
    + 3];
}

```



```

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 18] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.outputID] =
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[(mamdani_model_B.outputID << 2)
            + 3];
}

mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
mamdani_model_trimf_pf(mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    mamdani_model_B.dv1, mamdani_model_B.dv);
for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 101;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    mamdani_model_B.outputMFCache[20 * mamdani_model_B.outputID + 19] =
        mamdani_model_B.dv[mamdani_model_B.outputID];
}

for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 4;
    mamdani_model_B.outputID++) {
    for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 7; mamdani_model_B.i++) {
        for (mamdani_model_B.sampleID = 0; mamdani_model_B.sampleID < 101;
            mamdani_model_B.sampleID++) {
            mamdani_model_B.u = mamdani_model_B.outputMFCache[((b_0[7 *
                mamdani_model_B.outputID + mamdani_model_B.i] + 5 *
                mamdani_model_B.outputID) + 20 * mamdani_model_B.sampleID) - 1];
            mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
                mamdani_model_B.antecedentOutputs_i[mamdani_model_B.i];
            mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs = mamdani_model_B.u;
            tmp = rtIsNaN(mamdani_model_B.u);
            mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_g = 101 *
                mamdani_model_B.outputID + mamdani_model_B.sampleID;
            mamdani_model_B.u =
                mamdani_model_B.aggregatedOutputs[mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_g];
            if (!(mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs >
                mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p) && (!tmp)) {
                mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
                    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs;
            }

            if (mamdani_model_B.u < mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p)
            {
                mamdani_model_B.aggregatedOutputs[mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_g]
                    = mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
            } else {
                mamdani_model_B.aggregatedOutputs[mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_g]
                    = mamdani_model_B.u;
            }
        }
    }
}
}
}

```

```

if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
    mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[0] = 0.5;
    mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[1] = 0.5;
    mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[2] = 0.5;
    mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[3] = 0.5;
} else {
    for (mamdani_model_B.outputID = 0; mamdani_model_B.outputID < 4;
        mamdani_model_B.outputID++) {
        mamdani_model_B.u = 0.0;
        mamdani_model_B.area = 0.0;
        for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 101; mamdani_model_B.i++)
            {
                mamdani_model_B.area += mamdani_model_B.agggregatedOutputs[101 *
                    mamdani_model_B.outputID + mamdani_model_B.i];
            }

        if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
            mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[mamdani_model_B.outputID] =
                (mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID +
                    400] +
                mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b[mamdani_model_B.outputID])
                / 2.0;
        } else {
            for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 101; mamdani_model_B.i++)
                {
                    mamdani_model_B.u += mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_b
                        [(mamdani_model_B.i << 2) + mamdani_model_B.outputID] *
                        mamdani_model_B.agggregatedOutputs[101 * mamdani_model_B.outputID +
                            mamdani_model_B.i];
                }

            mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[mamdani_model_B.outputID] =
                1.0 / mamdani_model_B.area * mamdani_model_B.u;
        }
    }
}

    mamdani_model_B.area = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[0] = mamdani_model_trimf_p
        (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[1], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[1] = mamdani_model_trimf_p
        (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[1], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[2] = mamdani_model_trimf_p
        (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[1], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[3] = mamdani_model_trimf_p
        (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[1], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;

```

```

mamdani_model_B.inputMFCache_c[4] = mamdani_model_trimf_p
(mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[1], mamdani_model_B.dv1);
for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 5; mamdani_model_B.i++) {
    mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
        mamdani_model_B.inputMFCache_c[mamdani_model_B.i];
    mamdani_model_B.area += mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
    mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k[mamdani_model_B.i] =
        mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
}

mamdani_EvaluateRuleConsequents(mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k,
&mamdani_model_B.TD15);

if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
    mamdani_model_B.u = 0.5;
} else {
    mamdani_model_B.u = 1.0 / mamdani_model_B.area * mamdani_model_B.TD15;
}

    mamdani_model_B.area = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[0] = mamdani_model_trimf_p
(mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[0], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[1] = mamdani_model_trimf_p
(mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[0], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[2] = mamdani_model_trimf_p
(mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[0], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[3] = mamdani_model_trimf_p
(mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[0], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[4] = mamdani_model_trimf_p
(mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[0], mamdani_model_B.dv1);
for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 5; mamdani_model_B.i++) {
    mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
        mamdani_model_B.inputMFCache_c[mamdani_model_B.i];
    mamdani_model_B.area += mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
    mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k[mamdani_model_B.i] =
        mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
}

mamdani_EvaluateRuleConsequents(mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k,
&mamdani_model_B.TD15);

if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs = 0.5;
} else {
    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs = 1.0 / mamdani_model_B.area *
        mamdani_model_B.TD15;
}

```

```

    mamdani_model_B.area = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[0] = mamdani_model_trimf_p
    (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[2], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[1] = mamdani_model_trimf_p
    (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[2], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[2] = mamdani_model_trimf_p
    (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[2], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[3] = mamdani_model_trimf_p
    (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[2], mamdani_model_B.dv1);
    mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
    mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
    mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[4] = mamdani_model_trimf_p
    (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[2], mamdani_model_B.dv1);
    for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 5; mamdani_model_B.i++) {
        mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b = 1.0;
        mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
            mamdani_model_B.inputMFCache_c[mamdani_model_B.i];
        if (1.0 > mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p) {
            mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b =
                mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
        }

        mamdani_model_B.area += mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b;
        mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k[mamdani_model_B.i] =
            mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b;
    }

    mamda_EvaluateRuleConsequents_o(mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k,
    mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_l,
    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
    &mamdani_model_B.sf_EvaluateRuleConsequents_o);
    if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
        mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m = 0.0;
    } else {
        mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p = 0.0;
        mamdani_model_B.area = 0.0;
        for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 101; mamdani_model_B.i++) {
            mamdani_model_B.area +=
                mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.i];
        }

        if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
            mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m =
                (mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_l[0] +
                mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_l[100]) / 2.0;
        } else {
            for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 101; mamdani_model_B.i++) {
                {

```

```

mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p +=
  mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_l[mamdani_model_B.i] *
  mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.i];
}

mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m = 1.0 / mamdani_model_B.area *
  mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
}
}

mamdani_model_B.area = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[0] = -0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.25;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[0] = mamdani_model_trimf_p
  (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[3], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.0;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.5;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[1] = mamdani_model_trimf_p
  (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[3], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.25;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[2] = 0.75;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[2] = mamdani_model_trimf_p
  (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[3], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.5;
mamdani_model_B.dv1[1] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.0;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[3] = mamdani_model_trimf_p
  (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[3], mamdani_model_B.dv1);
mamdani_model_B.dv1[0] = 0.75;
mamdani_model_B.dv1[1] = 1.0;
mamdani_model_B.dv1[2] = 1.25;
mamdani_model_B.inputMFCache_c[4] = mamdani_model_trimf_p
  (mamdani_model_B.rtb_defuzzifiedOutputs_i_c[3], mamdani_model_B.dv1);
for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 5; mamdani_model_B.i++) {
  mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b = 1.0;
  mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p =
    mamdani_model_B.inputMFCache_c[mamdani_model_B.i];
  if (1.0 > mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p) {
    mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b =
      mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
  }

  mamdani_model_B.area += mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b;
  mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k[mamdani_model_B.i] =
    mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_b;
}

mamda_EvaluateRuleConsequents_o(mamdani_model_B.rtb_antecedentOutputs_e_k,
  mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_f,
  mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m,
  &mamdani_model_B.sf_EvaluateRuleConsequents_g);

if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
  mamdani_model_B.area = 0.0;
} else {
  mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p = 0.0;
  mamdani_model_B.area = 0.0;
  for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 101; mamdani_model_B.i++) {
    mamdani_model_B.area +=

```

```

    mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.i];
}

if (mamdani_model_B.area == 0.0) {
    mamdani_model_B.area = (mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_f[0] +
        mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_f[100]) / 2.0;
} else {
    for (mamdani_model_B.i = 0; mamdani_model_B.i < 101; mamdani_model_B.i++)
    {
        mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p +=
            mamdani_model_P.OutputSamplePoints_Value_f[mamdani_model_B.i] *
            mamdani_model_B.rtb_aggregatedOutputs_d_m[mamdani_model_B.i];
    }

    mamdani_model_B.area = 1.0 / mamdani_model_B.area *
        mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p;
}

mamdani_model_B.Sum12 = mamdani_model_P.u_C_g * mamdani_model_X.u_CSTATE_1 *
(mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs + mamdani_model_B.u) +
mamdani_model_P.u_C_fk * mamdani_model_X.u_CSTATE_p *
(mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m + mamdani_model_B.area);

mamdani_model_B.area = mamdani_model_M->Timing.t[0];

mamdani_model_B.u = mamdani_model_M->Timing.t[0];
if (mamdani_model_B.u < mamdani_model_P.In5_start) {
    mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p = mamdani_model_P.Step_Y0;
} else {
    mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p = mamdani_model_P.In5_slope;
}

if (mamdani_model_B.u < mamdani_model_P.In6_start) {
    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs = mamdani_model_P.Step_Y0_c;
} else {
    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs = mamdani_model_P.In6_slope;
}

if (mamdani_model_B.u < mamdani_model_P.In7_start) {
    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m = mamdani_model_P.Step_Y0_p;
} else {
    mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m = mamdani_model_P.In7_slope;
}

if (mamdani_model_B.u < mamdani_model_P.In8_start) {
    mamdani_model_B.u = mamdani_model_P.Step_Y0_g;
} else {
    mamdani_model_B.u = mamdani_model_P.In8_slope;
}

mamdani_model_B.Sum19 = (((mamdani_model_B.area - mamdani_model_P.In5_start) *
    mamdani_model_B.rtb_TmpSignalConversionAtSFun_p +
    mamdani_model_P.In5_InitialOutput) - ((mamdani_model_B.area -
    mamdani_model_P.In6_start) * mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs +
    mamdani_model_P.In6_InitialOutput)) - (((mamdani_model_B.area -
    mamdani_model_P.In7_start) * mamdani_model_B.defuzzifiedOutputs_m +
    mamdani_model_P.In7_InitialOutput) - ((mamdani_model_B.area -
    mamdani_model_P.In8_start) * mamdani_model_B.u +
    mamdani_model_P.In8_InitialOutput));

mamdani_model_B.K2 = mamdani_model_P.K2_Gain * mamdani_model_B.Sum19;

```

```

mamdani_model_B.TD15 = 0.0;
mamdani_model_B.TD15 += mamdani_model_P.u_C_a * mamdani_model_X.u_CSTATE_pm;

mamdani_model_B.area = (mamdani_model_P.u_C_go * mamdani_model_X.u_CSTATE_d +
mamdani_model_P.u_C_o * mamdani_model_X.u_CSTATE_dp) + mamdani_model_B.TD15;

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD13_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD13_Delay;
mamdani_model_B.TD15 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD13_InitOutput,
    0,
    0);
}

mamdani_model_B.Sum16 = (mamdani_model_B.TD15 + mamdani_model_B.area) +
mamdani_model_P.u_C_e * mamdani_model_X.u_CSTATE_f;

mamdani_model_B.TD15 = 0.0;
mamdani_model_B.TD15 += mamdani_model_P.u_2_C * mamdani_model_X.u_2_CSTATE;

mamdani_model_B.Sum17 = mamdani_model_P.u_2_C_j * mamdani_model_X.u_2_CSTATE_c
+ mamdani_model_B.TD15;

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD15_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD15_Delay;
mamdani_model_B.TD15 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD15_InitOutput,
    0,
    0);
}

mamdani_model_B.Sum21 = mamdani_model_P.u_C_h * mamdani_model_X.u_CSTATE_n +
mamdani_model_B.TD15;

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD14_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD14_Delay;
mamdani_model_B.TD14 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD14_IWORK.CircularBufSize,

```

```

&mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Last,
mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Tail,
mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head,
mamdani_model_P.TD14_InitOutput,
0,
0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD16_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD16_Delay;
mamdani_model_B.TD16 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD16_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD16_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD17_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD17_Delay;
mamdani_model_B.TD17 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD17_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD17_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD18_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD18_Delay;
mamdani_model_B.TD18 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD18_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD18_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD19_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];

```



```

real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD19_Delay;
mamdani_model_B.TD19 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD19_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD19_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD20_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD20_Delay;
mamdani_model_B.TD20 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD20_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD20_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD21_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD21_Delay;
mamdani_model_B.TD21 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD21_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD21_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD22_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD22_Delay;
mamdani_model_B.TD22 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD22_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD22_InitOutput,
    0,
    0);
}

```

```

    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD23_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD23_Delay;
mamdani_model_B.TD23 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD23_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD23_InitOutput,
    0,
    0);
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD24_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
real_T tMinusDelay = simTime - mamdani_model_P.TD24_Delay;
mamdani_model_B.TD24 = rt_TDelayInterpolate(
    tMinusDelay,
    0.0,
    *uBuffer,
    mamdani_model_DW.TD24_IWORK.CircularBufSize,
    &mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Last,
    mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Tail,
    mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head,
    mamdani_model_P.TD24_InitOutput,
    0,
    0);
}

mamdani_model_B.u_j_f = 0.0;
mamdani_model_B.u_j_f += mamdani_model_P.u_C_ox * mamdani_model_X.u_CSTATE_o;

mamdani_model_B.u_2 = 0.0;
mamdani_model_B.u_2 += mamdani_model_P.u_2_C_a * mamdani_model_X.u_2_CSTATE_1;

mamdani_model_B.u_1 = 0.0;
mamdani_model_B.u_1 += mamdani_model_P.u_C_ou * mamdani_model_X.u_CSTATE_a;

mamdani_model_B.u_b = 0.0;
mamdani_model_B.u_b += mamdani_model_P.u_C_d * mamdani_model_X.u_CSTATE_fu;

mamdani_model_B.u_2_c = 0.0;
mamdani_model_B.u_2_c += mamdani_model_P.u_2_C_f *
    mamdani_model_X.u_2_CSTATE_n;

mamdani_model_B.u_j = 0.0;
mamdani_model_B.u_j += mamdani_model_P.u_C_hv * mamdani_model_X.u_CSTATE_lq;
if (rtmIsMajorTimeStep(mamdani_model_M)) {
    {
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD13_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head <
    (mamdani_model_DW.TD13_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
    (mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head+1) : 0);
    }
}

```

```

if (mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Tail)
{
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Tail <
        (mamdani_model_DW.TD13_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
        (mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Tail+1) : 0);
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD13_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head] = mamdani_model_B.K2;
}

{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &mamdani_model_DW.TD15_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head <
        (mamdani_model_DW.TD15_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
        (mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head+1) : 0);
    if (mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Tail)
    {
        mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Tail <
            (mamdani_model_DW.TD15_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
            (mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Tail+1) : 0);
    }

    (*uBuffer + mamdani_model_DW.TD15_IWORK.CircularBufSize)
    [mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head] = simTime;
    (*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_b;
}

{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &mamdani_model_DW.TD14_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head <
        (mamdani_model_DW.TD14_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
        (mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head+1) : 0);
    if (mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Tail)
    {
        mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Tail <
            (mamdani_model_DW.TD14_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
            (mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Tail+1) : 0);
    }

    (*uBuffer + mamdani_model_DW.TD14_IWORK.CircularBufSize)
    [mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head] = simTime;
    (*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head] = mamdani_model_B.Sum17;
}

{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &mamdani_model_DW.TD16_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head <
        (mamdani_model_DW.TD16_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
        (mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head+1) : 0);
    if (mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Tail)
    {
        mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Tail <
            (mamdani_model_DW.TD16_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
            (mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Tail+1) : 0);
    }

    (*uBuffer + mamdani_model_DW.TD16_IWORK.CircularBufSize)

```

```

[mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_2_c;
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD17_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD17_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head+1) : 0);
if (mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Tail)
{
mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD17_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD17_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_e;
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD18_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD18_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head+1) : 0);
if (mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Tail)
{
mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD18_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD18_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_l;
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD19_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD19_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head+1) : 0);
if (mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Tail)
{
mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD19_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD19_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_j_f;
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD20_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head <

```

```

(mamdani_model_DW.TD20_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head+1) : 0);
if (mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Tail)
{
    mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD20_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Tail+1) : 0);
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD20_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head] = mamdani_model_B.Sum16;
}

{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &mamdani_model_DW.TD21_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD21_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head+1) : 0);
    if (mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Tail)
    {
        mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD21_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Tail+1) : 0);
    }
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD21_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_j_f;
}

{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &mamdani_model_DW.TD22_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD22_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head+1) : 0);
    if (mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Tail)
    {
        mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD22_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Tail+1) : 0);
    }
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD22_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head] = mamdani_model_B.TD16;
}

{
    real_T **uBuffer = (real_T**) &mamdani_model_DW.TD23_PWORK.TUbufferPtrs[0];
    real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD23_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head+1) : 0);
    if (mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Tail)
    {
        mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD23_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Tail+1) : 0);
    }
}

```

```

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD23_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head] = mamdani_model_B.Sum19;
}

{
real_T **uBuffer = (real_T**)&mamdani_model_DW.TD24_PWORK.TUbufferPtrs[0];
real_T simTime = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head = ((mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head <
(mamdani_model_DW.TD24_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head+1) : 0);
if (mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head == mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Tail)
{
mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Tail = ((mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Tail <
(mamdani_model_DW.TD24_IWORK.CircularBufSize-1)) ?
(mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Tail+1) : 0);
}
}

(*uBuffer + mamdani_model_DW.TD24_IWORK.CircularBufSize)
[mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head] = simTime;
(*uBuffer)[mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head] = mamdani_model_B.u_j_f;
}
}
if (rtmIsMajorTimeStep(mamdani_model_M)) {
rt_ertODEUpdateContinuousStates(&mamdani_model_M->solverInfo);

++mamdani_model_M->Timing.clockTick0;
mamdani_model_M->Timing.t[0] = rtsiGetSolverStopTime
(&mamdani_model_M->solverInfo);

{
mamdani_model_M->Timing.clockTick1++;
}
}

void mamdani_model_derivatives(void)
{
XDot_mamdani_model_T *_rtXdot;
_rtXdot = ((XDot_mamdani_model_T *) mamdani_model_M->derivs);

_rtXdot->u_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE += mamdani_model_P.u_A * mamdani_model_X.u_CSTATE;
_rtXdot->u_CSTATE += mamdani_model_B.TD14;

_rtXdot->u_CSTATE_h = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_h += mamdani_model_P.u_A_g * mamdani_model_X.u_CSTATE_h;
_rtXdot->u_CSTATE_h += mamdani_model_B.u_2;

_rtXdot->u_CSTATE_c = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_c += mamdani_model_P.u_A_j * mamdani_model_X.u_CSTATE_c;
_rtXdot->u_CSTATE_c += mamdani_model_B.TD23;

_rtXdot->u_CSTATE_l = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_l += mamdani_model_P.u_A_k * mamdani_model_X.u_CSTATE_l;
_rtXdot->u_CSTATE_l += mamdani_model_B.TD24;

_rtXdot->u_CSTATE_p = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_p += mamdani_model_P.u_A_h * mamdani_model_X.u_CSTATE_p;
_rtXdot->u_CSTATE_p += mamdani_model_B.TD19;

_rtXdot->u_CSTATE_d = 0.0;

```

```

_rtXdot->u_CSTATE_d += mamdani_model_P.u_A_p * mamdani_model_X.u_CSTATE_d;
_rtXdot->u_CSTATE_d += mamdani_model_B.TD22;

_rtXdot->u_CSTATE_dp = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_dp += mamdani_model_P.u_A_n * mamdani_model_X.u_CSTATE_dp;
_rtXdot->u_CSTATE_dp += mamdani_model_B.TD17;

_rtXdot->u_CSTATE_pm = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_pm += mamdani_model_P.u_A_a * mamdani_model_X.u_CSTATE_pm;
_rtXdot->u_CSTATE_pm += mamdani_model_B.TD21;

_rtXdot->u_CSTATE_f = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_f += mamdani_model_P.u_A_i * mamdani_model_X.u_CSTATE_f;
_rtXdot->u_CSTATE_f += mamdani_model_B.TD18;

_rtXdot->u_2_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->u_2_CSTATE += mamdani_model_P.u_2_A * mamdani_model_X.u_2_CSTATE;
_rtXdot->u_2_CSTATE += mamdani_model_B.TD20;

_rtXdot->u_2_CSTATE_c = 0.0;
_rtXdot->u_2_CSTATE_c += mamdani_model_P.u_2_A_c *
mamdani_model_X.u_2_CSTATE_c;
_rtXdot->u_2_CSTATE_c += mamdani_model_B.Sum12;

_rtXdot->u_CSTATE_n = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_n += mamdani_model_P.u_A_f * mamdani_model_X.u_CSTATE_n;
_rtXdot->u_CSTATE_n += mamdani_model_B.u_e;

_rtXdot->u_CSTATE_o = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_o += mamdani_model_P.u_A_o * mamdani_model_X.u_CSTATE_o;
_rtXdot->u_CSTATE_o += mamdani_model_B.u_e;

_rtXdot->u_2_CSTATE_l = 0.0;
_rtXdot->u_2_CSTATE_l += mamdani_model_P.u_2_A_i *
mamdani_model_X.u_2_CSTATE_l;
_rtXdot->u_2_CSTATE_l += mamdani_model_B.u_l;

_rtXdot->u_CSTATE_a = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_a += mamdani_model_P.u_A_hy * mamdani_model_X.u_CSTATE_a;
_rtXdot->u_CSTATE_a += mamdani_model_B.Sum21;

_rtXdot->u_CSTATE_fu = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_fu += mamdani_model_P.u_A_av * mamdani_model_X.u_CSTATE_fu;
_rtXdot->u_CSTATE_fu += mamdani_model_B.TD16;

_rtXdot->u_2_CSTATE_n = 0.0;
_rtXdot->u_2_CSTATE_n += mamdani_model_P.u_2_A_b *
mamdani_model_X.u_2_CSTATE_n;
_rtXdot->u_2_CSTATE_n += mamdani_model_B.u_j;

_rtXdot->u_CSTATE_lq = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_lq += mamdani_model_P.u_A_m * mamdani_model_X.u_CSTATE_lq;
_rtXdot->u_CSTATE_lq += mamdani_model_B.Sum17;
}

```

```

void mamdani_model_initialize(void)
{
    rt_InitInfAndNaN(sizeof(real_T));

    {
        rtsiSetSimTimeStepPtr(&mamdani_model_M->solverInfo,

```

```

        &mamdani_model_M->Timing.simTimeStep);
    rtsiSetTPtr(&mamdani_model_M->solverInfo, &rtmGetTPtr(mamdani_model_M));
    rtsiSetStepSizePtr(&mamdani_model_M->solverInfo,
        &mamdani_model_M->Timing.stepSize0);
    rtsiSetDXPtr(&mamdani_model_M->solverInfo, &mamdani_model_M->derivs);
    rtsiSetContStatesPtr(&mamdani_model_M->solverInfo, (real_T **)
        &mamdani_model_M->contStates);
    rtsiSetNumContStatesPtr(&mamdani_model_M->solverInfo,
        &mamdani_model_M->Sizes.numContStates);
    rtsiSetNumPeriodicContStatesPtr(&mamdani_model_M->solverInfo,
        &mamdani_model_M->Sizes.numPeriodicContStates);
    rtsiSetPeriodicContStateIndicesPtr(&mamdani_model_M->solverInfo,
        &mamdani_model_M->periodicContStateIndices);
    rtsiSetPeriodicContStateRangesPtr(&mamdani_model_M->solverInfo,
        &mamdani_model_M->periodicContStateRanges);
    rtsiSetErrorStatusPtr(&mamdani_model_M->solverInfo, (&rtmGetErrorStatus
        (mamdani_model_M)));
    rtsiSetRTModelPtr(&mamdani_model_M->solverInfo, mamdani_model_M);
}

rtsiSetSimTimeStep(&mamdani_model_M->solverInfo, MAJOR_TIME_STEP);
mamdani_model_M->intgData.y = mamdani_model_M->odeY;
mamdani_model_M->intgData.f[0] = mamdani_model_M->odeF[0];
mamdani_model_M->intgData.f[1] = mamdani_model_M->odeF[1];
mamdani_model_M->intgData.f[2] = mamdani_model_M->odeF[2];
mamdani_model_M->contStates = ((X_mamdani_model_T *) &mamdani_model_X);
rtsiSetSolverData(&mamdani_model_M->solverInfo, (void *)
    &mamdani_model_M->intgData);
rtsiSetSolverName(&mamdani_model_M->solverInfo, "ode3");
rtmSetTPtr(mamdani_model_M, &mamdani_model_M->Timing.tArray[0]);
mamdani_model_M->Timing.stepSize0 = 640.0;

{
    real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD13_RWORK.TUbufferArea[0];
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Tail = 0;
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Head = 0;
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.Last = 0;
    mamdani_model_DW.TD13_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD13_InitOutput;
    pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD13_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
    real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD15_RWORK.TUbufferArea[0];
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Tail = 0;
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Head = 0;
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.Last = 0;
    mamdani_model_DW.TD15_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD15_InitOutput;
    pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
    mamdani_model_DW.TD15_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
    real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD14_RWORK.TUbufferArea[0];
    mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Tail = 0;
    mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Head = 0;
    mamdani_model_DW.TD14_IWORK.Last = 0;
    mamdani_model_DW.TD14_IWORK.CircularBufSize = 1024;
    pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD14_InitOutput;
    pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
}

```



```

mamdani_model_DW.TD14_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD16_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD16_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD16_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD16_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD16_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD17_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD17_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD17_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD17_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD17_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD18_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD18_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD18_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD18_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD18_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD19_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD19_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD19_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD19_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD19_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD20_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD20_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD20_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD20_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD20_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD21_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Head = 0;

```

```

mamdani_model_DW.TD21_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD21_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD21_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD21_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD22_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD22_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD22_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD22_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD22_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD23_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD23_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD23_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD23_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD23_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

{
real_T *pBuffer = &mamdani_model_DW.TD24_RWORK.TUbufferArea[0];
mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Tail = 0;
mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Head = 0;
mamdani_model_DW.TD24_IWORK.Last = 0;
mamdani_model_DW.TD24_IWORK.CircularBufSize = 1024;
pBuffer[0] = mamdani_model_P.TD24_InitOutput;
pBuffer[1024] = mamdani_model_M->Timing.t[0];
mamdani_model_DW.TD24_PWORK.TUbufferPtrs[0] = (void *) &pBuffer[0];
}

mamdani_model_X.u_CSTATE = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_h = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_c = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_l = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_p = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_d = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_dp = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_pm = 0.0;

mamdani_model_X.u_CSTATE_f = 0.0;

mamdani_model_X.u_2_CSTATE = 0.0;

mamdani_model_X.u_2_CSTATE_c = 0.0;

```

```
mamdani_model_X.u_CSTATE_n = 0.0;
mamdani_model_X.u_CSTATE_o = 0.0;
mamdani_model_X.u_2_CSTATE_l = 0.0;
mamdani_model_X.u_CSTATE_a = 0.0;
mamdani_model_X.u_CSTATE_fu = 0.0;
mamdani_model_X.u_2_CSTATE_n = 0.0;
mamdani_model_X.u_CSTATE_lq = 0.0;
}

void mamdani_model_terminate(void)
{
```

Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора
для электропривода постоянного тока

```

/*
 * File: test.c
 *
 RT_MODEL_test_T *const test_M = &test_M_;

/* Forward declaration for local functions */
static real_T test_trmf(real_T x, const real_T params[3]);
void sMultiWordMul(const uint32_T u1[], int32_T n1, const uint32_T u2[], int32_T
    n2, uint32_T y[], int32_T n)
{
    int32_T i;
    int32_T j;
    int32_T k;
    int32_T ni;
    uint32_T a0;
    uint32_T a1;
    uint32_T b1;
    uint32_T cb;
    uint32_T cb1;
    uint32_T cb2;
    uint32_T u1i;
    uint32_T w01;
    uint32_T w10;
    uint32_T yk;
    boolean_T isNegative1;
    boolean_T isNegative2;
    isNegative1 = ((u1[n1 - 1] & 2147483648U) != 0U);
    isNegative2 = ((u2[n2 - 1] & 2147483648U) != 0U);
    cb1 = 1U;

    /* Initialize output to zero */
    for (k = 0; k < n; k++) {
        y[k] = 0U;
    }

    for (i = 0; i < n1; i++) {
        cb = 0U;
        u1i = u1[i];
        if (isNegative1) {
            u1i = ~u1i + cb1;
            cb1 = (uint32_T)(u1i < cb1);
        }

        a1 = u1i >> 16U;
        a0 = u1i & 65535U;
        cb2 = 1U;
        ni = n - i;
        ni = n2 <= ni ? n2 : ni;
        k = i;
        for (j = 0; j < ni; j++) {
            u1i = u2[j];
            if (isNegative2) {
                u1i = ~u1i + cb2;
                cb2 = (uint32_T)(u1i < cb2);
            }

            b1 = u1i >> 16U;

```

```

    uli &= 65535U;
    w10 = a1 * uli;
    w01 = a0 * b1;
    yk = y[k] + cb;
    cb = (uint32_T)(yk < cb);
    uli *= a0;
    yk += uli;
    cb += (yk < uli);
    uli = w10 << 16U;
    yk += uli;
    cb += (yk < uli);
    uli = w01 << 16U;
    yk += uli;
    cb += (yk < uli);
    y[k] = yk;
    cb += w10 >> 16U;
    cb += w01 >> 16U;
    cb += a1 * b1;
    k++;
}

if (k < n) {
    y[k] = cb;
}
}

/* Apply sign */
if (isNegative1 != isNegative2) {
    cb = 1U;
    for (k = 0; k < n; k++) {
        yk = ~y[k] + cb;
        y[k] = yk;
        cb = (uint32_T)(yk < cb);
    }
}
}

real_T sMultiWord2Double(const uint32_T u1[], int32_T n1, int32_T e1)
{
    real_T y;
    int32_T exp_0;
    int32_T i;
    uint32_T cb;
    uint32_T uli;
    y = 0.0;
    exp_0 = e1;
    if ((u1[n1 - 1] & 2147483648U) != 0U) {
        cb = 1U;
        for (i = 0; i < n1; i++) {
            uli = ~u1[i];
            cb += uli;
            y -= ldexp(cb, exp_0);
            cb = (uint32_T)(cb < uli);
            exp_0 += 32;
        }
    } else {
        for (i = 0; i < n1; i++) {
            y += ldexp(u1[i], exp_0);
            exp_0 += 32;
        }
    }
}

```

```

return y;
}

/* Function for MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents' */
static real_T test_trimf(real_T x, const real_T params[3])
{
    real_T y;
    y = 0.0;
    if ((params[0] != params[1]) && (params[0] < x) && (x < params[1])) {
        y = 1.0 / (params[1] - params[0]) * (x - params[0]);
    }

    if ((params[1] != params[2]) && (params[1] < x) && (x < params[2])) {
        y = 1.0 / (params[2] - params[1]) * (params[2] - x);
    }

    if (x == params[1]) {
        y = 1.0;
    }

    return y;
}

/* Model step function */
void test_step(void)
{
    codertarget_arduino_base_inter_T *obj;
    real_T aggregatedOutputs;
    real_T rtb_TSamp;
    real_T x_idx_1;
    int32_T rtb_Encoder_0;
    uint32_T tmp;
    uint32_T tmp_0;
    uint16_T rtb_AnalogInput_0;
    int8_T outputMFCache[7];
    static const real_T b[3] = { -25.0, -16.67, -8.333 };

    static const real_T c[3] = { -16.47, -8.133, 0.2 };

    static const real_T d[3] = { -8.333, 1.11E-16, 8.333 };

    static const real_T e[3] = { 2.0, 10.333, 18.67 };

    static const real_T f[3] = { 8.333, 16.67, 25.0 };

    static const int8_T b_0[7] = { 1, 2, 3, 4, 6, 6, 7 };

    /* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Subsystem2' */
    /* MATLABSystem: '<S4>/Analog Input' */
    if (test_DW.obj_c.SampleTime != test_P.AnalogInput_SampleTime) {
        test_DW.obj_c.SampleTime = test_P.AnalogInput_SampleTime;
    }

    obj = &test_DW.obj_c;
    obj->AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE = MW_AnalogIn_GetHandle(54U);
    MW_AnalogInSingle_ReadResult
        (test_DW.obj_c.AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE, &rtb_AnalogInput_0, 3);

    /* Gain: '<S4>/Gain' incorporates:
    * Constant: '<S4>/Constant1'
    * MATLABSystem: '<S4>/Analog Input'
    * Sum: '<S4>/Sum'

```

```

*/
test_B.Gain = ((real_T)rtb_AnalogInput_0 - test_P.Constant1_Value) *
test_P.Gain_Gain;

/* MATLABSystem: '<S4>/Analog Input1' */
if (test_DW.obj_m.SampleTime != test_P.AnalogInput1_SampleTime) {
test_DW.obj_m.SampleTime = test_P.AnalogInput1_SampleTime;
}

obj = &test_DW.obj_m;
obj->AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE = MW_AnalogIn_GetHandle(55U);
MW_AnalogInSingle_ReadResult
(test_DW.obj_m.AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE, &rtb_AnalogInput_0, 3);

/* Gain: '<S4>/Gain1' incorporates:
* Constant: '<S4>/Constant2'
* MATLABSystem: '<S4>/Analog Input1'
* Sum: '<S4>/Sum1'
*/
test_B.Gain1 = ((real_T)rtb_AnalogInput_0 - test_P.Constant2_Value) *
test_P.Gain1_Gain;

/* MATLABSystem: '<S4>/Encoder' incorporates:
* Constant: '<S4>/Constant'
*/
if (test_DW.obj_p.SampleTime != test_P.Encoder_SampleTime) {
test_DW.obj_p.SampleTime = test_P.Encoder_SampleTime;
}

if (test_DW.obj_p.TunablePropsChanged) {
test_DW.obj_p.TunablePropsChanged = false;
}

MW_EncoderRead(test_DW.obj_p.Index, &rtb_Encoder_0);
if (test_P.Constant_Value > 0.0) {
MW_EncoderReset(test_DW.obj_p.Index);
}

/* Gain: '<S4>/Gain2' incorporates:
* MATLABSystem: '<S4>/Encoder'
*/
tmp = (uint32_T)test_P.Gain2_Gain_j;
tmp_0 = (uint32_T)rtb_Encoder_0;
sMultiWordMul(&tmp, 1, &tmp_0, 1, &test_B.Gain2.chunks[0U], 2);

/* SampleTimeMath: '<S8>/TSamp' incorporates:
* DataTypeConversion: '<S4>/Data Type Conversion'
*
* About '<S8>/TSamp':
*  $y = u * K$  where  $K = 1 / (w * Ts)$ 
*/
rtb_TSamp = sMultiWord2Double(&test_B.Gain2.chunks[0U], 2, 0) *
1.1641532182693481E-10 * test_P.TSamp_WtEt;

/* Gain: '<S4>/Gain4' incorporates:
* Gain: '<S4>/Gain3'
* Sum: '<S8>/Diff'
* UnitDelay: '<S8>/UD'
*
* Block description for '<S8>/Diff':
*
* Add in CPU

```

```

*
* Block description for '<S8>/UD':
*
* Store in Global RAM
*/
test_B.Gain4 = (rtb_TSamp - test_DW.UD_DSTATE) * test_P.Gain3_Gain *
  test_P.Gain4_Gain;

/* Update for UnitDelay: '<S8>/UD'
*
* Block description for '<S8>/UD':
*
* Store in Global RAM
*/
test_DW.UD_DSTATE = rtb_TSamp;

/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Subsystem2' */

/* Output: '<Root>/Voltage' */
test_Y.Voltage = test_B.Gain;

/* Output: '<Root>/Current' */
test_Y.Current = test_B.Gain1;

/* Output: '<Root>/Position' incorporates:
* Gain: '<S4>/Gain2'
*/
test_Y.Position = test_B.Gain2;

/* Gain: '<Root>/Gain3' */
test_B.velocity = test_P.Koc * test_B.Gain4;

/* Step: '<Root>/Step' */
if (test_M->Timing.t[0] < test_P.Step_Time) {
  rtb_TSamp = test_P.Step_Y0;
} else {
  rtb_TSamp = test_P.Step_YFinal;
}

/* End of Step: '<Root>/Step' */

/* Sum: '<Root>/Sum' incorporates:
* Gain: '<Root>/Gain1'
*/
test_B.error = test_P.Koc * rtb_TSamp - test_B.velocity;

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller' */
/* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents' */
rtb_TSamp = 0.0;
test_B.dv[0] = -33.33;
test_B.dv[1] = -25.0;
test_B.dv[2] = -16.67;
test_B.inputMFCache[0] = test_trimf(test_B.error, test_B.dv);
test_B.inputMFCache[1] = test_trimf(test_B.error, b);
test_B.inputMFCache[2] = test_trimf(test_B.error, c);
test_B.inputMFCache[3] = test_trimf(test_B.error, d);
test_B.inputMFCache[4] = test_trimf(test_B.error, e);
test_B.inputMFCache[5] = test_trimf(test_B.error, f);
test_B.dv[0] = 16.67;
test_B.dv[1] = 25.0;
test_B.dv[2] = 33.33;
test_B.inputMFCache[6] = test_trimf(test_B.error, test_B.dv);

```



```

/* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Consequents' */
aggregatedOutputs = 0.0;
outputMFCache[0] = -60;
outputMFCache[1] = -40;
outputMFCache[2] = -20;
outputMFCache[3] = 10;
outputMFCache[4] = 20;
outputMFCache[5] = 40;
outputMFCache[6] = 60;
for (rtb_Encoder_0 = 0; rtb_Encoder_0 < 7; rtb_Encoder_0++) {
  /* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents' */
  x_idx_1 = test_B.inputMFCache[rtb_Encoder_0];
  rtb_TSamp += x_idx_1;

  /* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Consequents' incorporates:
  * MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents'
  */
  aggregatedOutputs += (real_T)outputMFCache[b_0[rtb_Encoder_0] - 1] * x_idx_1;
}

/* MATLAB Function: '<S2>/Defuzzify Outputs' incorporates:
* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Antecedents'
* MATLAB Function: '<S2>/Evaluate Rule Consequents'
*/
if (rtb_TSamp == 0.0) {
  rtb_TSamp = 0.0;
} else {
  rtb_TSamp = 1.0 / rtb_TSamp * aggregatedOutputs;
}

/* End of MATLAB Function: '<S2>/Defuzzify Outputs' */
/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Fuzzy Logic Controller' */

/* Saturate: '<Root>/Saturation' */
if (rtb_TSamp > test_P.Saturation_UpperSat_p) {
  rtb_TSamp = test_P.Saturation_UpperSat_p;
} else if (rtb_TSamp < test_P.Saturation_LowerSat_o) {
  rtb_TSamp = test_P.Saturation_LowerSat_o;
}

/* End of Saturate: '<Root>/Saturation' */

/* Gain: '<Root>/Gain2' */
test_B.fuzzyoutput = test_P.Gain2_Gain_f * rtb_TSamp;

/* Outputs for Atomic SubSystem: '<Root>/Subsystem1' */
/* Saturate: '<S3>/Saturation' */
if (test_B.fuzzyoutput > test_P.Saturation_UpperSat) {
  rtb_TSamp = test_P.Saturation_UpperSat;
} else if (test_B.fuzzyoutput < test_P.Saturation_LowerSat) {
  rtb_TSamp = test_P.Saturation_LowerSat;
}
* Bias: '<S3>/Add Constant'
* Gain: '<S3>/Gain2'
*/
rtb_TSamp = floor(test_P.Gain2_Gain * rtb_TSamp + test_P.AddConstant_Bias);
if (rtIsNaN(rtb_TSamp) || rtIsInf(rtb_TSamp)) {
  rtb_TSamp = 0.0;
} else {
  rtb_TSamp = fmod(rtb_TSamp, 65536.0);
}

```

```

/* MATLABSystem: '<S3>/Analog Output' incorporates:
 * DataTypeConversion: '<S3>/Data Type Conversion'
 */
MW_DACWrite(0, (uint32_T)(rtb_TSamp < 0.0 ? (int32_T)(uint16_T)-(int16_T)
 (uint16_T)-rtb_TSamp : (int32_T)(uint16_T)rtb_TSamp));

/* End of Outputs for SubSystem: '<Root>/Subsystem1' */
{
    /* Sample time: [0.0s, 0.0s] */
    extmodeErrorCode_T errorCode = EXTMODE_SUCCESS;
    extmodeSimulationTime_T currentTime = (extmodeSimulationTime_T)
    test_M->Timing.t[0];

    /* Trigger External Mode event */
    errorCode = extmodeEvent(0,currentTime);
    if (errorCode != EXTMODE_SUCCESS) {
        /* Code to handle External Mode event errors
        may be added here */
    }
}

{
    /* Sample time: [0.2s, 0.0s] */
    extmodeErrorCode_T errorCode = EXTMODE_SUCCESS;
    extmodeSimulationTime_T currentTime = (extmodeSimulationTime_T)
    ((test_M->Timing.clockTick1) * 0.2);

    /* Trigger External Mode event */
    errorCode = extmodeEvent(1,currentTime);
    if (errorCode != EXTMODE_SUCCESS) {
        /* Code to handle External Mode event errors
        may be added here */
    }
}
test_M->Timing.t[0] =
((time_T)(++test_M->Timing.clockTick0)) * test_M->Timing.stepSize0;

{
    test_M->Timing.clockTick1++;
}
}

void test_initialize(void)
{
    rt_InitInfAndNaN(sizeof(real_T));

    {
        /* Setup solver object */
        rtsiSetSimTimeStepPtr(&test_M->solverInfo, &test_M->Timing.simTimeStep);
        rtsiSetTPtr(&test_M->solverInfo, &rtmGetTPtr(test_M));
        rtsiSetStepSizePtr(&test_M->solverInfo, &test_M->Timing.stepSize0);
        rtsiSetErrorStatusPtr(&test_M->solverInfo, (&rtmGetErrorStatus(test_M)));
        rtsiSetRTModelPtr(&test_M->solverInfo, test_M);
    }

    rtsiSetSimTimeStep(&test_M->solverInfo, MAJOR_TIME_STEP);
    rtsiSetSolverName(&test_M->solverInfo, "FixedStepDiscrete");
    rtmSetTPtr(test_M, &test_M->Timing.tArray[0]);
    rtmSetTFinal(test_M, -1);
    test_M->Timing.stepSize0 = 0.2;

    /* External mode info */
    test_M->Sizes.checksums[0] = (556900601U);

```

```

test_M->Sizes.checksums[1] = (1303429461U);
test_M->Sizes.checksums[2] = (495657269U);
test_M->Sizes.checksums[3] = (2197677194U);

{
    static const sysRanDType rtAlwaysEnabled = SUBSYS_RAN_BC_ENABLE;
    static RTWExtModeInfo rt_ExtModeInfo;
    static const sysRanDType *systemRan[11];
    test_M->extModeInfo = (&rt_ExtModeInfo);
    rteiSetSubSystemActiveVectorAddresses(&rt_ExtModeInfo, systemRan);
    systemRan[0] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[1] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[2] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[3] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[4] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[5] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[6] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[7] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[8] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[9] = &rtAlwaysEnabled;
    systemRan[10] = &rtAlwaysEnabled;
    rteiSetModelMappingInfoPtr(test_M->extModeInfo,
        &test_M->SpecialInfo.mappingInfo);
    rteiSetChecksumsPtr(test_M->extModeInfo, test_M->Sizes.checksums);
    rteiSetTPtr(test_M->extModeInfo, rtmGetTPtr(test_M));
}

{
    codertarget_arduino_base_inter_T *obj;

    /* InitializeConditions for UnitDelay: '<S8>/UD'
     *
     * Block description for '<S8>/UD':
     *
     * Store in Global RAM
     */
    test_DW.UD_DSTATE = test_P.DiscreteDerivative_ICPrevScaled;

    /* Start for MATLABSystem: '<S4>/Analog Input' */
    test_DW.obj_c.matlabCodegenIsDeleted = true;
    test_DW.obj_c.isInitialized = 0;
    test_DW.obj_c.SampleTime = -1.0;
    test_DW.obj_c.matlabCodegenIsDeleted = false;
    test_DW.obj_c.SampleTime = test_P.AnalogInput_SampleTime;
    obj = &test_DW.obj_c;
    test_DW.obj_c.isSetupComplete = false;
    test_DW.obj_c.isInitialized = 1;
    obj->AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE = MW_AnalogInSingle_Open(54U);
    test_DW.obj_c.isSetupComplete = true;

    /* Start for MATLABSystem: '<S4>/Analog Input1' */
    test_DW.obj_m.matlabCodegenIsDeleted = true;
    test_DW.obj_m.isInitialized = 0;
    test_DW.obj_m.SampleTime = -1.0;
    test_DW.obj_m.matlabCodegenIsDeleted = false;
    test_DW.obj_m.SampleTime = test_P.AnalogInput1_SampleTime;
    obj = &test_DW.obj_m;
    test_DW.obj_m.isSetupComplete = false;
    test_DW.obj_m.isInitialized = 1;
    obj->AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE = MW_AnalogInSingle_Open(55U);
    test_DW.obj_m.isSetupComplete = true;
}

```

```

/* Start for MATLABSystem: '<S4>/Encoder' */
test_DW.obj_p.Index = 0U;
test_DW.obj_p.matlabCodegenIsDeleted = false;
test_DW.obj_p.SampleTime = test_P.Encoder_SampleTime;
test_DW.obj_p.isSetupComplete = false;
test_DW.obj_p.isInitialized = 1;
MW_EncoderSetup(2U, 3U, &test_DW.obj_p.Index);
test_DW.obj_p.isSetupComplete = true;
test_DW.obj_p.TunablePropsChanged = false;

/* InitializeConditions for MATLABSystem: '<S4>/Encoder' */
MW_EncoderReset(test_DW.obj_p.Index);

/* End of SystemInitialize for SubSystem: '<Root>/Subsystem2' */
}
}

/* Model terminate function */
void test_terminate(void)
{
codertarget_arduino_base_inter_T *obj;

/* Terminate for Atomic SubSystem: '<Root>/Subsystem2' */
/* Terminate for MATLABSystem: '<S4>/Analog Input' */
obj = &test_DW.obj_c;
if (!test_DW.obj_c.matlabCodegenIsDeleted) {
test_DW.obj_c.matlabCodegenIsDeleted = true;
if ((test_DW.obj_c.isInitialized == 1) && test_DW.obj_c.isSetupComplete) {
obj->AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE = MW_AnalogIn_GetHandle(54U);
MW_AnalogIn_Close(test_DW.obj_c.AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE);
}
}

/* End of Terminate for MATLABSystem: '<S4>/Analog Input' */
/* Terminate for MATLABSystem: '<S4>/Analog Input1' */
obj = &test_DW.obj_m;
if (!test_DW.obj_m.matlabCodegenIsDeleted) {
test_DW.obj_m.matlabCodegenIsDeleted = true;
if ((test_DW.obj_m.isInitialized == 1) && test_DW.obj_m.isSetupComplete) {
obj->AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE = MW_AnalogIn_GetHandle(55U);
MW_AnalogIn_Close(test_DW.obj_m.AnalogInDriverObj.MW_ANALOGIN_HANDLE);
}
}

/* End of Terminate for MATLABSystem: '<S4>/Analog Input1' */
/* Terminate for MATLABSystem: '<S4>/Encoder' */
if (!test_DW.obj_p.matlabCodegenIsDeleted) {
test_DW.obj_p.matlabCodegenIsDeleted = true;
if ((test_DW.obj_p.isInitialized == 1) && test_DW.obj_p.isSetupComplete) {
MW_EncoderRelease();
}
}

/* End of Terminate for MATLABSystem: '<S4>/Encoder' */
}

```

Технические характеристики элементов испытательной установки

Таблица П 5.1 – ДПТ ПЛ-072

Наименования параметра	Значение
Тип	ПЛ-072
Мощность, Вт	180
Номинальное напряжение питания обмоток якоря, В	220
Номинальное напряжение питания обмоток возбуждения, В	220
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Номинальный ток якоря, А	1,3
КПД	0,63
Масса, кг	7,65
Сопротивление обмоток якоря, Ом	17,5
Сопротивление обмоток возбуждения, Ом	820
Механические потери, Вт	15

Таблица П 5.2 – Характеристики ПЛК

Наименования параметра	Значение
Микроконтроллер	AT91SAM3X8E
Рабочее напряжение, В	3,3
Входное напряжение (рекомендуемое), В	7-12
Входное напряжение (предельное), В	6-20
Цифровые Входы/Выходы	54
Аналоговые входы	12
Аналоговые выходы	2 (ЦАП)
Общий выходной постоянный тока на всех входах/выходах, мА	50
Постоянный ток через вывод 3,3 В	800 мА
Постоянный ток через вывод 5 В	800 мА
Флеш-память	512 КБ
ОЗУ	96 КБ
Тактовая частота, МГц	84 МГц

Таблица П 5.3 – Двухканальный операционный усилитель LM358N

Наименования параметра	Значение
Тип	LM358N
Питание, В	3-32
Биполярное питание, В	$\pm 1,5$ до ± 16
Потребляемый ток, мА	0,7
Напряжение смещения по входу, мВ	3
Ток смещения компенсации по входу, нА	2
Ток смещения компенсации по входу, нА	2
Входной ток смещение, нА	20
Скорость нарастания на выходе, В/мсек	0,3
Ток на выходе, мА	30 - 40
Максимальная частота, МГц	0,7 до 1,1
Коэффициент дифференциального усиления, дБ	100
Рабочая температура, С ⁰	0° до 70°

Таблица П 5.4 – Энкодер TRD-S500VD

Наименования параметра	Значение
Тип	TRD-S500VD
Импульсов за оборот	500
Входное напряжение, В	5
Выход	Line driver
Допустимый ток, мА	50
Выходное напряжение, В	2.5
Выходной ток, мА	20