

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

На правах рукописи



Бузикаева Алина Валерьевна

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

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент,
Черный Сергей Петрович

Комсомольск-на-Амуре – 2025

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Анализ альтернативных подходов к реализации систем управления электроприводами	12
1.1 Обзор классических подходов к реализации систем управления электроприводами	12
1.2 Анализ интеллектуальных подходов к реализации процедур управления в электроприводах.....	18
Выводы по первой главе.....	31
Глава 2. Моделирование двухкаскадной нечеткой системы автоматического регулирования электроприводом постоянного тока	32
2.1 Синтез классической системы управления электроприводом постоянного тока.....	32
2.2 Моделирование стандартной нечеткой системы электропривода с механизмом вывода Мамдани.....	34
2.3 Моделирование стандартной нечеткой системы электропривода с механизмом вывода Сугено	39
2.4 Математическое описание многокаскадного нечеткого логического регулятора	43
2.5 Синтез двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани	49
2.6 Синтез многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани.....	52
2.7 Исследование влияния элементов каскада на формирование итогового закона управления электроприводом постоянного тока.....	58

Выводы по второй главе	63
Глава 3. Моделирование двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при различных режимах работы	64
3.1 Синтез стандартной системы управления постоянного тока с двухзонным регулированием скорости.....	64
3.2 Моделирование многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом с двухзонным регулированием скорости с комбинацией алгоритмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани	68
3.3 Моделирование двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом с двухзонным регулированием скорости с комбинацией механизмов нечетких выводов Мамдани-Мамдани	77
3.4 Анализ реакции системы электропривода на отработку задающего сигнала сложной формы	79
Выводы по третьей главе.....	87
Глава 4. Моделирование многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом переменного тока	88
4.1 Моделирование двухкаскадного нечеткого логического регулятора с комбинацией механизмов выводов Сугено-Мамдани в системе электропривода переменного тока.....	94
4.2 Моделирование двухкаскадного нечеткого логического регулятора с альтернативной комбинацией механизмов выводов	97
4.3 Формирование процедур управления элементами вложенного каскада в системе электропривода переменного тока.....	104
Выводы по четвертой главе.....	108
Глава 5. Реализация алгоритмов управления электроприводом переменного тока с применением многокаскадного нечеткого логического регулятора	109

Выводы по пятой главе.....	114
Заключение	115
Список литературы	117
ПРИЛОЖЕНИЕ А	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	133
ПРИЛОЖЕНИЕ В	137

Введение

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

Интеллектуализация систем электропривода является актуальной проблемой в настоящее время. Общепринятые подходы построения СУЭП, базирующихся на нечеткой логике, предоставляют желаемые результаты, когда необходима реализация классических законов управления, например, пропорционально-интегрального или пропорционально-интегрально-дифференциального. Для слабоструктурированных технологических объектов, в основе которых лежит электропривод, необходима реализация сложных законов регулирования, которые характеризуются набором различных функциональных зависимостей. Формирование процедур управления в СУЭП может быть успешно реализовано на основе теории искусственных нейронных сетей, однако, наряду с обширным спектром их возможностей, существует ряд сопутствующих проблем. Одной из возможных альтернатив, позволяющих улучшить показатели качества технологических процессов, является применение стандартных алгоритмов нечеткого регулирования, преимущество которых обосновано и доказано для решения целого ряда задач по управлению. Вместе с тем формализация таких электротехнических комплексов приведет к существенному усложнению настройки и возрастанию количества основных параметров нечетких логических регуляторов (НЛР). Чаще всего такая ситуация приводит к увеличению объема базы знаний и перехода ее в гиперпространственное состояние, а также к значительному росту числа функций принадлежности в диапазоне управления и увеличению перечня лингвистических переменных, характеризующих состояние объекта. Возможным вариантом ослабления влияния вышеперечисленных негативных факторов является применение многокаскадных нечетких систем управления электроприводом (МНСУЭП). Наиболее приемлемыми объектами с точки зрения реализации предложенного подхода являются системы управления электроприводами постоянного и переменного тока, в математическом описании которых учтены специфические свойства. Целесообразность внедрения технологии многокаскадных нечетких логических регуляторов (МНЛР) при их реализации в виде интеллектуального управляющего модуля для систем электроприводов позволит реализовывать подобную методику управления для

целого класса такими электротехническими комплексами в условиях существенного влияния негативных факторов (неполнота и противоречивость исходных данных, нелинейность и наличие взаимосвязей между координатами).

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

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

Задачи диссертации.

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

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

3. Учет особенностей функционирования технологического объекта на базе

электропривода за счет разработки и реализации методики структурного и параметрического синтеза МНСУЭП.

Научная новизна:

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

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

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

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

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

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

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

Положения, выносимые на защиту.

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

качество основных показателей электромеханической системы.

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

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

Практическая значимость работы:

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

- синтез имитационных моделей электроприводов постоянного и переменного тока с реализацией МНЛР, функционирующих на базе различных сочетаний механизмов выводов, и формируемых ими законов управления;

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

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

Достоверность результатов и апробация работы.

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

- международная научно-практическая конференция «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2017, 2021, 2023, 2024 гг.);
- всероссийская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Научно-техническое творчество аспирантов и студентов» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2018 г.);
- XIII международная научно-техническая конференция «Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования» (г. Вологда, 2018 г.);
- II всероссийская научно-практическая конференция «Электропривод на транспорте и в промышленности» (г. Хабаровск, 2018, 2023 гг.);
- International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies «FarEastCon» (г. Владивосток, 2018, 2019, 2020 гг.);
- International Ural Conference on Electrical Power Engineering «UralCon» (г. Челябинск, 2019 г.);
- XLV Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, 2019, 2020, 2021 гг.);
- II всероссийская национальная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2019, 2020, 2021, 2022 гг.);
- всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, посвященная 60-летию кафедры "Системы электроснабжения" и 100-летию плана ГОЭЛРО «Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива» (г. Хабаровск, 2020 г.);
- XXIII краевой конкурс молодых ученых «Молодые ученые - Хабаровскому краю» (г. Хабаровск, 2021 г.);

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

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

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

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

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

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

Глава 1. Анализ альтернативных подходов к реализации систем управления электроприводами

1.1 Обзор классических подходов к реализации систем управления электроприводами

В настоящее время большинство технологических процессов оснащено электрическими приводами, на которые возлагается задача осуществления сложных перемещений рабочих органов механизма. В процессе реализации этих перемещений возникает необходимость разгона, торможения, реверса электропривода, а также поддержания постоянства регулируемой величины, изменяя ее по определенному закону. Особенности реализации необходимого закона управления далее будут рассмотрены в диссертационной работе на таких объектах регулирования, как электроприводы постоянного и переменного тока, а также системы с двухзонным регулированием.

Электрические приводы постоянного тока представляют собой наиболее распространенный тип электромеханических систем. Актуальность применения такого объекта регулирования обусловлена простотой механизмов управления и надежностью работы, особенно в случаях, требующих высокого крутящего момента на низких скоростях. Основным принцип работы электрических приводов постоянного тока заключается во взаимодействии магнитных полей внутри двигателя, генерирующих силу, которая преобразуется во вращательное движение. Регулирование скорости в приводах постоянного тока осуществляется путем изменения напряжения на якоре или тока возбуждения, что, в свою очередь, влияет на скорость и крутящий момент двигателя.

Принцип управления электроприводами постоянного тока основан на регулировании скорости, крутящего момента и положения двигателя, адаптируясь к изменениям нагрузки и обеспечивая стабильную работу. Основные методы управления приводами постоянного тока сводятся к регулированию напряжения питания якоря для управления скоростью двигателя (широко используется в тех случаях, где не требуется высокая точность) и регулированию тока в обмотке возбуждения для управления скоростью двигателя (применяется для получения

широкого диапазона скоростей и более точного управления, но может быть более сложным в реализации) [1, 2].

Приводы переменного тока, особенно те, в которых используются асинхронные и синхронные двигатели, отличаются повышенной эффективностью, сокращением затрат на техническое обслуживание и лучшей интеграцией в современные электрические сети. Электроприводы переменного тока работают по принципу преобразования электрической энергии из сети в механическую энергию, используя переменный ток для питания электродвигателя. Главной особенностью электроприводов переменного тока является их способность регулировать не только скорость, но и крутящий момент двигателя переменного тока за счет изменения частоты и напряжения, подаваемых на двигатель. Это достигается за счет использования сложных электронных устройств и алгоритмов управления, которые модулируют подачу питания в режиме реального времени.

Управление приводами переменного тока осуществляется сложнее, чем электроприводами постоянного тока ввиду динамической природы переменного тока и реакции двигателя на него. С целью регулировки угловой скорости вращения ротора, а также крутящего момента на валу двигателя, применяют либо скалярное, либо векторное управление электроприводом.

При скалярном методе управлении осуществляется поддержание постоянного соотношения напряжения и частоты (U/f) для управления скоростью двигателя. Несмотря на простоту реализации, такой метод обеспечивает ограниченный контроль над крутящим моментом двигателя и не подходит в тех моментах, где требуется необходимость точного контроля скорости или крутящего момента. Векторное управление обеспечивает независимое управление скоростью и моментом двигателя путем динамической регулировки величины и фазы напряжения, подаваемого на двигатель, что позволяет обеспечить заданные показатели качества. Прямое управление моментом - технология, позволяющая напрямую управлять моментом и потоком двигателя без использования модулятора, обеспечивая тем самым быструю реакцию на изменения нагрузки двигателя. Каждый из методов управления обладает своими преимуществами и

выбирается в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к электроприводам (необходимость в точности, эффективности или простоте).

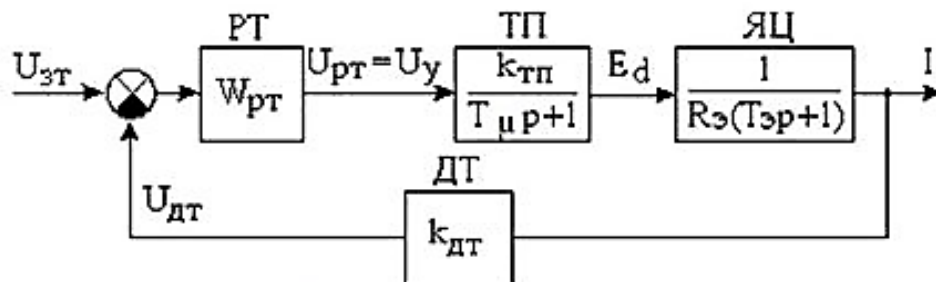
Электрические приводы постоянного тока с двухзонным регулированием скорости в настоящее время применимы для большого количества технологических механизмов, например, концевые моталки, прокатные станы, металлорежущие станки и т.п. Специфика двухзонного регулирования заключается в возможности плавного переключения между двумя различными зонами управления – одна из которых функционирует на низких скоростях с высоким крутящим моментом, а другая предназначена для работы на высоких скоростях с малым моментом сопротивления на валу. Такая возможность переключения обеспечивает оптимальную эффективность и производительность электропривода независимо от нагрузки или скоростных условий. В низкоскоростной зоне часто используются методы управления, аналогичные тем, что применяются в приводах постоянного тока, с упором на управление крутящим моментом, в то время как в высокоскоростной зоне используются технологии приводов переменного тока с упором на эффективное управление скоростью.

На сегодняшний день двухзонные системы регулирования находят свое применение в различных областях промышленности:

- промышленная автоматизация: обеспечение точного управления оборудованием, работающим на различных скоростях и при различных нагрузках, например, конвейерами, подъемниками и роботизированными манипуляторами;
- системы возобновляемой энергетики: оптимизация работы ветряных турбин и других преобразователей возобновляемой энергии, которые работают в широком диапазоне условий окружающей среды;
- электромобили: повышение производительности в широком диапазоне условий движения от старт-стопного движения до скоростных магистралей [3,4].

Расчет регуляторов в системах управления электроприводами постоянного и переменного тока осуществляется на основе классических методов

подчиненного регулирования. Некоторым рядом особенностей при настройке обладают регуляторы систем управления с двухзонным регулированием.



РТ – регулятор тока якоря; ТП – тиристорный преобразователь якоря; ДТ – датчик тока якоря; ЯЦ – якорная цепь двигателя

Рисунок 1.1 - Структурная схема контура тока

Рисунок 1.1 иллюстрирует структурную схему внутреннего контура тока с передаточной функцией

$$W_{\text{РТ}} = \frac{R_{\text{э}} T_{\text{э}}}{2 T_{\mu} k_{\text{ТП}} k_{\text{ДТ}}} \cdot \frac{T_{\text{э}} p + 1}{T_{\text{э}} p},$$

где $R_{\text{э}}$ – полное сопротивление якорной цепи;

$T_{\text{э}}$ – электромагнитная постоянная времени двигателя;

T_{μ} – постоянная времени преобразователя якоря;

$k_{\text{ТП}}$ – коэффициент усиления тиристорного преобразователя якоря;

$k_{\text{ДТ}}$ – коэффициент датчика тока якоря.

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 1.2.



РС – регулятор скорости; М – электромагнитный вращающий момент двигателя;

M_c – статический момент нагрузки

Рисунок 1.2 – Структурная схема контура скорости

Передаточная функция регулятора скорости имеет следующий вид:

$$W_{pc} = \frac{CT_M k_{дт}}{4T_\mu R_\Sigma k_{дс}} \cdot \frac{8T_\mu p + 1}{8T_\mu p},$$

где C – конструктивный коэффициент двигателя;

R_Σ – полное сопротивление якорной цепи;

T_μ – постоянная времени преобразователя якоря;

T_M – электромеханическая постоянная времени двигателя;

$k_{дс}$ – коэффициент передачи датчика скорости;

$k_{дт}$ – коэффициент датчика тока якоря.

Синтез регулятора скорости производился в соответствии с симметричным оптимумом. В двухзонном автоматизированном электроприводе при уменьшении потока уменьшается коэффициент в объекте регулирования контура скорости (за счет ослабления поля двигателя). Если контур скорости был оптимизирован на модульный оптимум, то эти изменения вызывают уменьшение частоты среза и уменьшение быстродействия, т.е. контур становится более демпфированным. При существующем уменьшении поля может произойти даже потеря работоспособности контура. Для того чтобы коэффициент в контуре скорости оставался неизменным при любом значении поля двигателя, на выходе регулятора скорости устанавливают делительное устройство, как показано на рисунке 1.3.

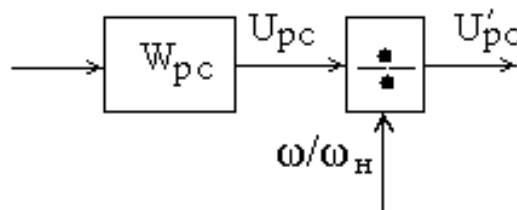
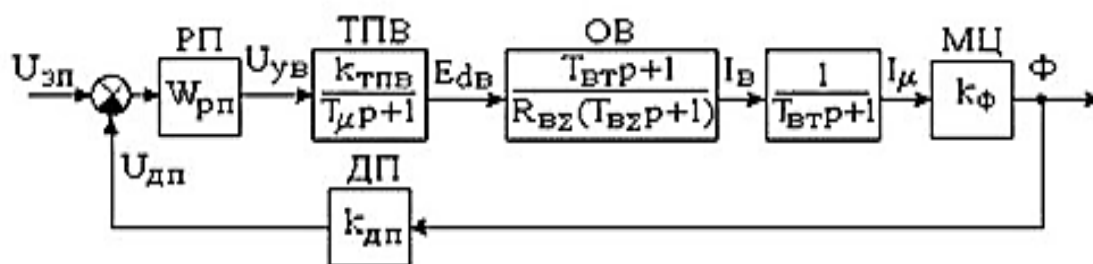


Рисунок 1.3 - Делительное устройство на выходе регулятора скорости

На рисунке 1.4 приведена структурная схема регулятора потока. Оптимизация производится на модульный оптимум, полагая наличие датчика потока.



РП – регулятор потока возбуждения; ТПВ – тиристорный преобразователь возбуждения; ОВ – обмотка возбуждения; МЦ – магнитная цепь; ДП – датчик потока

Рисунок 1.4 – Структурная схема контура потока

Передаточная функция регулятора потока представлена в виде

$$W_{рп} = \frac{R_{вΣ}}{2T_{\mu}k_{ТПВ}k_{\phi}k_{дп}p} \cdot \frac{T_{вΣ}p+1}{T_{вΣ}p},$$

где $R_{вΣ}$ – полное сопротивление цепи возбуждения;

$T_{вΣ}$ – суммарная постоянная времени обмотки возбуждения, $T_{вΣ} = T_{в} + T_{вТ}$;

$T_{в}$ – постоянная времени обмотки возбуждения;

$T_{вТ}$ – постоянная времени вихревых токов;

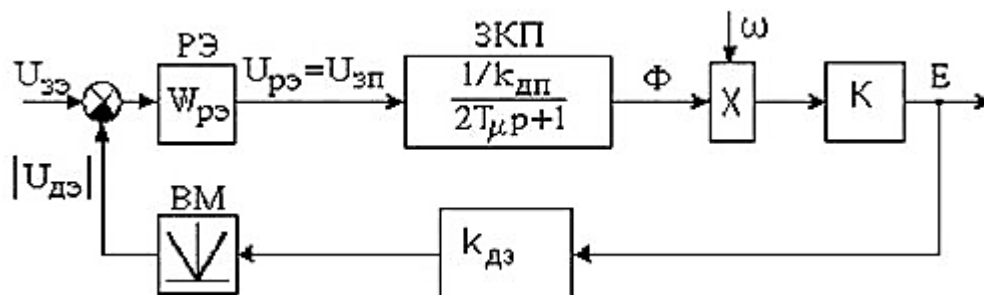
T_{μ} – постоянная времени преобразователя якоря;

k_{ϕ} – динамический коэффициент, связывающий изменение магнитного потока и тока возбуждения;

$k_{ТПВ}$ – коэффициент усиления преобразователя возбуждения;

$k_{дп}$ – коэффициент передачи датчика потока.

Структурная схема контура ЭДС представлена на рисунке 1.5.



РЭ – регулятор ЭДС; ВМ – выявитель модуля;

Рисунок 1.5 – Структурная схема контура ЭДС

Ниже приведена передаточная функция, описывающая регулятор ЭДС:

$$W_{pэ} = \frac{k_{дп}}{2T_{\muв}K\omega_n k_{дэ}p},$$

где $T_{\muв}$ – постоянная времени преобразователя возбуждения;

K – коэффициент пропорциональности магнитного потока;

ω_n – номинальная скорость;

$k_{дэ}$ – коэффициент передачи датчика ЭДС;

$k_{дп}$ – коэффициент передачи датчика потока.

Оптимальная настройка контура ЭДС будет выполняться только в одной расчетной точке, т.е. при скорости, при которой была проведена оптимизация. Для сохранения коэффициента усиления в контуре ЭДС неизменным при изменении скорости, на выходе регулятора ЭДС добавлено делительное устройство, как показано на рисунке 1.6.

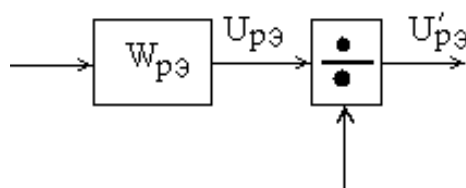


Рисунок 1.6 - Делительное устройство на выходе регулятора ЭДС

Одной из основных проблем при реализации систем с двухзонным регулированием скорости является наличие существенного количества нелинейностей в каналах управления. Устранить негативное влияние нелинейностей на основные параметры объекта регулирования технологическим процессом на основе классических методов представляется достаточно сложным, поэтому применение методов интеллектуального управления является актуальным [5].

1.2 Анализ интеллектуальных подходов к реализации процедур управления в электроприводах

Современные системы управления электроприводами представляют собой сложные комплексы взаимодействующих технических устройств и элементов, работа которых основана на различных физических принципах. Различно также

их конструктивное выполнение и технические характеристики. Несмотря на многообразие отдельных систем электроприводов и входящих в них элементов, последние могут быть сведены к нескольким основным типам, различающимся по их назначению и взаимодействию в системе управления.

В связи с предъявлением все более высоких требований к процессам управления в различных областях техники проблема идентификации становится исключительно важной. Нельзя обеспечить качественное управление системой, если неизвестна с достаточной точностью ее математическая модель и не оговорена система ограничений. Методика поиска процедуры управления объектом, когда и сам объект, и критерий управления им уже описаны в точных терминах, устарела и не является актуальной. С течением времени объекты управления развивались, стали более сложными, из-за чего типовые наработанные приемы стали неприменимы к нетрадиционным объектам управления.

Решение многих сложных научных и технических задач значительно упрощается при моделировании. Ключевым моментом при изучении систем электроприводов в современной теории автоматического управления является задача синтеза математического описания моделей и алгоритмов регулирования в условиях неполноты и противоречивости априорной информации о таких объектах.

Одна из основных тенденций развития искусственного интеллекта заключается в интеллектуализации методов управления, а в частности, законов регулирования в СУЭП. Для СУЭП предъявляются требования, отличные от классического математического подхода. К ним же применяются свойства, которые определяются динамичностью системы управления, отсутствием формализуемой цели существования объекта, отсутствием желаемых характеристик и оптимальности, неполнотой информации об объекте управления. Поэтому возникает проблема с идентификацией и математическим описанием таких систем.

Одним из ведущих направлений, которому посвящено достаточное большое количество исследований в последние годы, является развитие ИСУЭП, функционирующих на базе теории нечетких множеств. Реализация процедур управления для технологических процессов в электротехнических комплексах затруднена по целому ряду причин, основными из которых являются особенности существования и функционирования технологического объекта, его многокоординатность, многокритериальность, а также неполнота информационной составляющей, которая связана не только с математическим описанием, но и с особенностями внутренних взаимосвязей между координат объекта. Кроме того, необходимо отметить, что наличие нелинейностей естественного и искусственного вида заставляет трансформировать реализуемый закон управления для достижения необходимых или желаемых характеристик объекта с учетом технических требований [6].

Нечеткое управление не требует знания точной модели объекта, а организует приближенную стратегию управления, моделируя способ мышления человека. Оно выражает в простых лингвистических терминах любой необходимый для задачи управления алгоритм, линейный или нелинейный, который должен быть предварительно составлен экспертом. НЛР являются экспертными регуляторами, и алгоритмы их синтеза трудно формализовать для систем электроприводов, обладающих свойствами уникальности.

Исследование направлено на создание рекомендаций и формирование теоретической базы для универсальных подходов по реализации сложных законов управления для систем электроприводов, учитывающих все особенности их функционирования, взаимосвязи между координатами и сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода. Процесс реализации поставленных задач сводится к решению проблем, которые связаны с информационной избыточностью лингвистических переменных, алгоритмической сложностью продукционной базы знаний, распределением нечетких термов в блоке фаззификации, а также изменением количества элементов внутреннего каскада интеллектуального модуля при автоматическом регулировании электроприводами. Внедрение

многокаскадности НЛР в ИСУЭП, где внешний каскад нечеткого модуля рассматривается в роли экспертной системы, управляющей регуляторами вложенного каскада, позволяет снизить информационную нагрузку продукционной базы знаний, количество лингвистических переменных, а также сократить алгоритмическую сложность в блоках фаззификации и дефаззификации.

Интеллектуальная система, имеющая в своем составе двухкаскадный набор НЛР, формирует альтернативные варианты построения функций принадлежности. Приведенные вариации сигналов не ограничивают возможности регулятора, он остается восприимчивым к изменениям внешних факторов вплоть до установленных крайних точек диапазонов регулирования. Такой подход к реализации нечетких систем позволяет существенно повысить универсальность интеллектуального регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки и перенастройки, а также сократить информационную избыточность и алгоритмическую сложность таких регуляторов при реализации виде единого модуля.

Целью диссертационного исследования является разработка подхода, позволяющего синтезировать многокаскадную нечеткую СУЭП при наличии существенных противоречащих ограничений и неполноты информации, а также выработка рекомендаций, позволяющих осуществлять перенастройку таких систем с учетом изменения требований к реализации процедур и стратегий управления. Внедрение технологии многокаскадного нечеткого управления позволяет организовывать процесс управления различными классами систем электроприводов, что в конечном результате приводит к формированию экспертной системы.

Большинство существующих современных СУЭП характеризуются неполнотой информации и существенной сложностью математического описания, а также большим количеством допущений и ограничивающих факторов. В целом, функционирование таких систем электроприводов характеризуется существенной нелинейностью и условиями ограниченностью математического описания, как в части системы дифференциальных уравнений, так и в части ограничений,

накладываемых на систему в целом. Преодоление этих недостатков с применением типичных нечетких подходов сопряжено с трудностями, связанными как с алгоритмической сложностью базы знаний, информационной избыточностью используемых лингвистических переменных, так и существенным количеством нечетких термов в заданном диапазоне регулирования.

При реализации общепринятых процедур управления, основанных на мягких вычислениях, возникают сложности с реализацией адаптивных свойств ИСУЭП. Сочетание различных алгоритмов нечеткого логического вывода позволяет решать многокритериальные и многофакторные задачи интеллектуального управления. При этом различное сочетание нечетких выводов усиливает различные свойства таких систем, например, робастность, многозадачность, совокупное управление в областях больших и малых сигналов и т.д.

Алгоритмы и процедуры, применяемые в МНЛР, могут быть использованы в качестве модулей прогнозирования в системах управления электроприводами с двузонным регулированием, а также аналогичных технологических процессах, применяемых в электроэнергетике, робототехнике и на транспорте.

Для устранения всех недостатков моделирования существуют современные подходы. Основной тенденцией развития методов управления является их интеллектуализация. Основными направлениями исследований в области искусственного интеллекта являются [7, 8]:

- искусственные нейронные сети,
- системы с нечеткой логикой,
- генетические алгоритмы и эволюционное программирование.

Существует множество различных систем, функционирование которых осуществляется с применением целого ряда методик, использующих в своей основе элементы искусственного интеллекта. К таким системам относятся и системы, базирующиеся на теории нечетких множеств. Эти подходы находят свое применение там, где традиционные методы малоэффективны или в результате неприемлемы из-за отсутствия полного и точного понимания о

функционировании и целях существования таких СУЭП. Использование так называемых нечетких систем управления, в основе работы которых лежит технология применения мягких вычислений, является в настоящее время актуальным способом реализации процедур управления и имеет широкие перспективы развития в будущем. Качественное управление системой автоматического регулирования осуществляется только при условиях точного математического описания модели и при наличии достоверной системы ограничений.

Реализация и моделирование нечетких систем электроприводов подразумевает использование в своей структуре НЛР. Типичными объектами управления для такого рода систем являются модели электроприводов постоянного и переменного тока. НЛР в таких системах, как правило, моделирует пропорционально-интегральный или пропорционально-интегрально-дифференцирующий закон управления с учетом ряда дополнительных информационных каналов. При этом в традиционном классическом понимании синтез ИСУЭП 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. Такой подход в построении нечетких систем электроприводов 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 СУЭП, важнейшей особенностью которых является наличие внутренней взаимосвязи между несколькими параметрами и описание такой взаимосвязи, представляется весьма сложной аналитической задачей. В результате чего возникает необходимость поиска новых подходов, связанных с расширением информационных и интеллектуальных возможностей систем электропривода, реализованных на аппарате мягких вычислений. На сегодняшний день можно выделить три возможных пути повышения

интеллектуальных и информативных свойств систем электропривода, использующих в своей структуре НЛР. К ним относятся прямое увеличение количества входных параметров нечеткого модуля, использование НЛР с пространственными функциями принадлежности и реализация многокаскадной структуры НЛР.

Прямое увеличение количества входных параметров нечеткого модуля обуславливает повышение информационной составляющей, но зачастую приводит к существенному росту алгоритмической сложности НЛР при распределении функций принадлежности в заданных диапазонах управления, а также к значительному росту количества продукционных правил. Кроме того, реализация этого подхода для СУЭП, который характеризуется неполнотой информации о внутренних связях между целым рядом координат, наталкивается на трудности, связанными с выборкой экспертов.

Реализация нечетких систем с пространственными функциями принадлежности устраняет 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 диапазоне регулирования.

Функционально структура НЛР с пространственными функциями принадлежности может быть реализована с применением технологии многокаскадной системы. Для реализации такого подхода на регуляторы во внешнем и внутреннем каскадах необходимо наложить ряд дополнительных требований. Второй каскад может быть представлен набором подобных НЛР, 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 [9-16].

Введение многокаскадности позволяет повысить интеллектуальность системы и расширить диапазон применения нечетких систем электроприводов. Структура МНЛР включает в себя два каскада простейших нечетких модулей с различными комбинациями механизмов выводов. При этом первый (внешний) каскад содержит набор элементарных НЛР, настроенных на выработку управляющих воздействий в определенной зоне итогового нечеткого множества принятия решений. Выбор количества таких регуляторов определяется диапазоном изменения входного сигнала и требованиями по точности регулирования. Второй (внешний) каскад реализуется в виде одного интеллектуального переключающего устройства, функциями которого являются решение задач классификации и экстраполяции, а также непосредственный выбор необходимого нечеткого модуля из внутреннего каскада.

Различия в структурах МНЛР обусловлены сочетаниями алгоритмов нечеткого вывода в каскадах интеллектуального регулятора. Для реализации прогнозирующих модулей или при необходимости использования нечетких результатов вывода в расширенном формате целесообразно применение НЛР с сочетанием механизмов нечеткого логического вывода Мамдани-Мамдани. В случае применения механизма нечеткого логического вывода Сугено во внешнем каскаде зачастую необходимо введение дополнительных координат, что определяет возможность дополнительного повышения информативности СУЭП в целом, но в месте, с тем приводит к существенному усложнению такого регулятора. Основными проблемами МНСУЭП являются сложности при выборе согласования нечетких выводов внутри каскадов, а также их структурная реализация при передаче координат системы через каскады.

Классическим примером реализации задачи регулирования электроприводом можно считать формирование пропорционально-интегрально-дифференцирующий закона управления. Внешний каскад в таком интеллектуальном модуле можно рассматривать как систему, которая на основе имеющихся данных осуществляет управление регуляторами, находящимися во вложенном каскаде, и представляет собой внешний интеллектуальный

переключатель, как часть пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора — устройства в управляющем контуре с обратной связью. Такая структура используется в системах электроприводов для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса. Вложенный каскад сформирован из набора простейших НЛР, которые отличаются друг от друга областью определения элементов управляющего сигнала.

Необходимо отметить, что структурно МНЛР реализован по некоторой аналогии со слоистой нейронной сетью. Такое решение продиктовано тем, что задача распознавания является классическим примером применения теории нейронных сетей. Однако существенная алгоритмическая сложность нейросетевого подхода определила необходимости в поиске альтернативных методик решения подобного класса задач.

Решение проблемы распознавания образов за счет расширения интеллектуальности системы с помощью введения нечетких многокаскадных модулей, позволяет повысить функциональность системы, а также приблизить ее к модели человеческого мышления, что является одной из главных проблем задачи распознавания образов.

Технология внедрения единого интеллектуального управляющего модуля позволит осуществлять реализацию СУЭП в условиях существенного влияния негативных факторов, например, неполнота и противоречивость исходных данных, нелинейность, а также наличие взаимосвязей между координатами. Сочетание различных алгоритмов нечеткого логического вывода позволит решать задачи интеллектуального управления.

Наряду с теорией нечетких множеств достигнуть решения таких многофакторных и многокритериальных задач можно путем применения нейронных сетей. Под нейронными сетями понимаются вычислительные структуры, которые моделируют простые биологические процессы, обычно ассоциируемые с процессами человеческого мозга. Вычислительные структуры адаптируются и обучаются путем анализа положительных и отрицательных

воздействий. Нелинейным преобразователем в таких сетях является нейрон. Передаточные функции всех нейронов в сети фиксированы, а веса являются параметрами сети и могут изменяться.

В общем случае нейронные сети, равно как и системы автоматизации, функционирующие на базе нечеткой логики, по своим возможностям в части аппроксимации функции любой сложности являются аналогичными. В целом эффективность применения этих подходов для решения задач управления и классификации является достаточно высокой.

Нейронные сети являются универсальными аппроксимирующими системами, которые способны решать любые поставленные перед ними задачи. Построение нейросети выполняется в два этапа. Первый этап заключается в выборе типа (архитектуры) сети – необходимо указать число входов и передаточные функции, каким образом они будут соединяться, и что будет использоваться в качестве входов и выходов сети. На втором этапе построения нейросетей выполняется обучение (подбор весов) сети, от качества которого зависит способность решать поставленные перед ней проблемы и задачи во время функционирования. Самым важным свойством нейросети сети является их способность обучаться, основываясь на входные данные окружающей среды, и, как результат обучения, повышать свою производительность.

Для того чтобы нейронные сети могли корректно выполнять поставленные задачи, их необходимо обучать. Существует два подхода к обучению нейросетей: обучение с учителем и обучение без учителя. Алгоритм обучения с учителем предъявляет сети обучающую выборку. Для успешного функционирования такого алгоритма обучения нейросети предполагается наличие экспертов, создающих из обучающего множества входного вектора требуемое значение выходного вектора. Далее происходит изменение весовых коэффициентов сети до того момента, пока не будет достигнут приемлемый низкий уровень отклонения выходного вектора от целевого.

Основной проблемой при решении задач путем применения нейронных сетей, обученных «с учителем», является недостаток набора достоверных данных

для обучения алгоритма. Также, чтобы добиться максимально низкого уровня отклонения, потребуется большое число итераций, что приведет к довольно длительному процессу обучения нейросети.

Главным отличием процесса обучения с учителем от процесса обучения без учителя является отсутствие во втором целевых выходных образов. Обучающая выборка алгоритма обучения нейросетей без учителя состоит лишь из входных векторов. Процесс обучения так же заключается в подстраивании весов сети, но при этом необходимо получить согласованные выходные векторы, т.е. чтобы при предъявлении достаточно близких выходных векторов выдавались одинаковые выходы. В таком алгоритме обучения при отсутствии целевых выходных образов сложно определить момент сходимости алгоритма. Кроме того, для выше приведенного алгоритма характерна проблема извлечения знаний, решение которой вытекает в отдельную достаточно трудоемкую задачу.

Однако наряду с достаточно широким спектром положительных качеств нейронных сетей существует и ряд недостатков, которые сопутствуют решению сложных задач. Проблема синтеза нейросетей напрямую зависит от заданной проблематики, поэтому дать общие подробные рекомендации сложно, и сам процесс является трудоемким и порой может не принести удовлетворительных результатов. В целом, необходимо отметить, что математический аппарат в теории нейронных сетей достаточно хорошо развит, однако настройка и реализация таких интеллектуальных систем сопровождается целым рядом описанных выше проблем [17-22].

Кроме искусственных нейронных сетей большой популярностью в настоящее время пользуются генетические алгоритмы. Под термином «генетический алгоритм» понимается несложная модель эволюции в природе, которая формируется путем применения ЭВМ и реализует механизмы естественного отбора и генетического наследования, сопутствующих процессу эволюции живых организмов. В основе генетических алгоритмов лежит метод уменьшения достаточно широкого пространства поиска решения задач. Спектр применения генетических алгоритмов крайне широк: начиная от элементарных

задач компоновки и оптимизации, и заканчивая созданием искусственного интеллекта.

Принцип действия генетического алгоритма можно описать тремя этапами. Первый – создание популяции, где формируется большое количество возможных решений имеющихся задач, которые в дальнейшем определяют пространство поиска. Второй этап – оценивание эффективности созданной популяции. Реализация этапа заключается в подборе и выводе значения, пригодного для потенциального решения проблемы. В ходе прохождения итераций алгоритма должно быть достигнуто ожидаемое оптимальное значение. После остановки осуществляется выбор самой приспособленной хромосомы. В случае невыполнения условия остановки алгоритма по результатам естественного отбора будет осуществляться переход на третий этап генетического алгоритма – скрещивание и мутация. На заключительном этапе генетического алгоритма осуществляется выбор и применение генетических операторов.

К основным отличительным признакам генетических алгоритмов в сравнении с традиционными методами оптимизации относятся: формирование обратного кодирования значений; поиск с нескольких точек; отсутствие необходимости дифференцирования целевой функции (функции пригодности); применение не детерминированного метода отбора, а вероятностного.

В ходе анализа предложенного направления (генетического алгоритма) были выявлены положительные стороны и недостатки. К сильным сторонам генетических алгоритмов можно отнести достаточно простой математический аппарат, возможность поиска решения за счет распараллеливания вычислительного процесса, а также эффективность работы с большим объемом данных. Вместе с тем генетические алгоритмы обладают набором ограничивающих факторов, среди которых можно отметить низкую понятийную составляющую, малое быстроедействие и зависимость от качества обучающей выборки. Указанные недостатки не позволяют в полном объеме применять такую интеллектуальную технологию для решения задач по управлению сложными технологическими объектами [8, 23-25].

Анализируя вышесказанное и учитывая точность аппроксимации функции наиболее выгодно применение технологии многокаскадного регулирования, которая при прочих равных условиях позволяет решать задачи многокритериального управления в СУЭП. Такая технология представляет собой более понятный интуитивный аппарат, в основе которого заложены ситуативные связи. Расширение системы не вызывает существующих изменений в алгоритме управления в целом.

Выводы по первой главе

1. Выполнен сравнительный анализ основных направлений исследования в области искусственного интеллекта. Выявлены основные достоинства и недостатки нейронных сетей, генетических алгоритмов и нечетких систем.
2. На основе анализа достоинств и недостатков искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов намечены основные направления развития ИСУЭП с применением нечеткой логики.
3. Обоснована правомерность выбора систем электроприводов, функционирующих на основе теории нечетких множеств, для рассматриваемых технологических объектов.
4. На основе анализа систем автоматического регулирования электроприводами постоянного и переменного тока были выявлены положительные и отрицательные качества различных задач, решаемых в рамках реализации законов управления таких систем, а также определены пути устранения обозначенных недостатков.

Глава 2. Моделирование двухкаскадной нечеткой системы автоматического регулирования электроприводом постоянного тока

2.1 Синтез классической системы управления электроприводом постоянного тока

Анализ стандартного подхода по решению задач управления с использованием теории нечетких множеств осуществлен на примере имитационной модели электропривода постоянного тока (рисунок 2.1). Для систем регулирования положением, работающих в режимах токоограничения и ограничения скорости (например, подъемные установки, прокатные и обжимные станы, привод механизмов напор/натяжения и поворота экскаватора, тяговые электроприводы тепловозов, электровозов и пр.) регулятор внешнего контура (контура положения), как правило, настраивается на параболический вид. Условно результирующая характеристика нелинейного регулятора положения синтезируется из трех участков: линейного, смещенного параболического и участка насыщения [26]. Для построения параболического участка желаемой формы, а также соединения линейно нарастающей области с участком насыщения без разрыва функции, предлагается применение теории нечетких множеств как универсального аппроксимирующего инструмента.

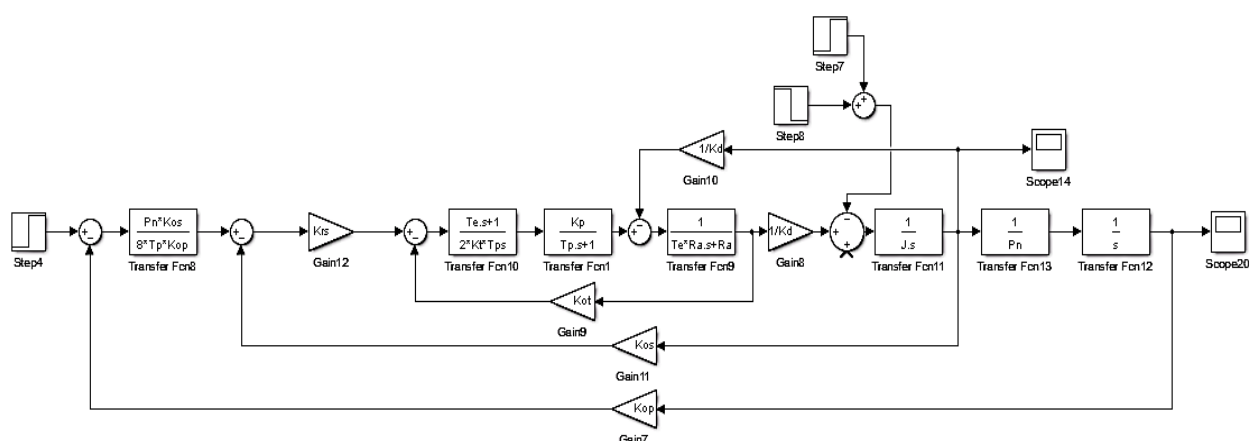


Рисунок 2.1 – Имитационная модель электрического привода постоянного тока независимого возбуждения модели П62

На вход системы электропривода подается управляющий сигнал $U_H = 8$ В. В результате моделирования, ток якоря достигает максимального значения и

снижается до нуля в установившемся режиме с допустимым перерегулированием. Время регулирования составляет 0,25 с. Графики переходных процессов системы представлены на рисунках 2.2, 2.3 и 2.4 [27-29].

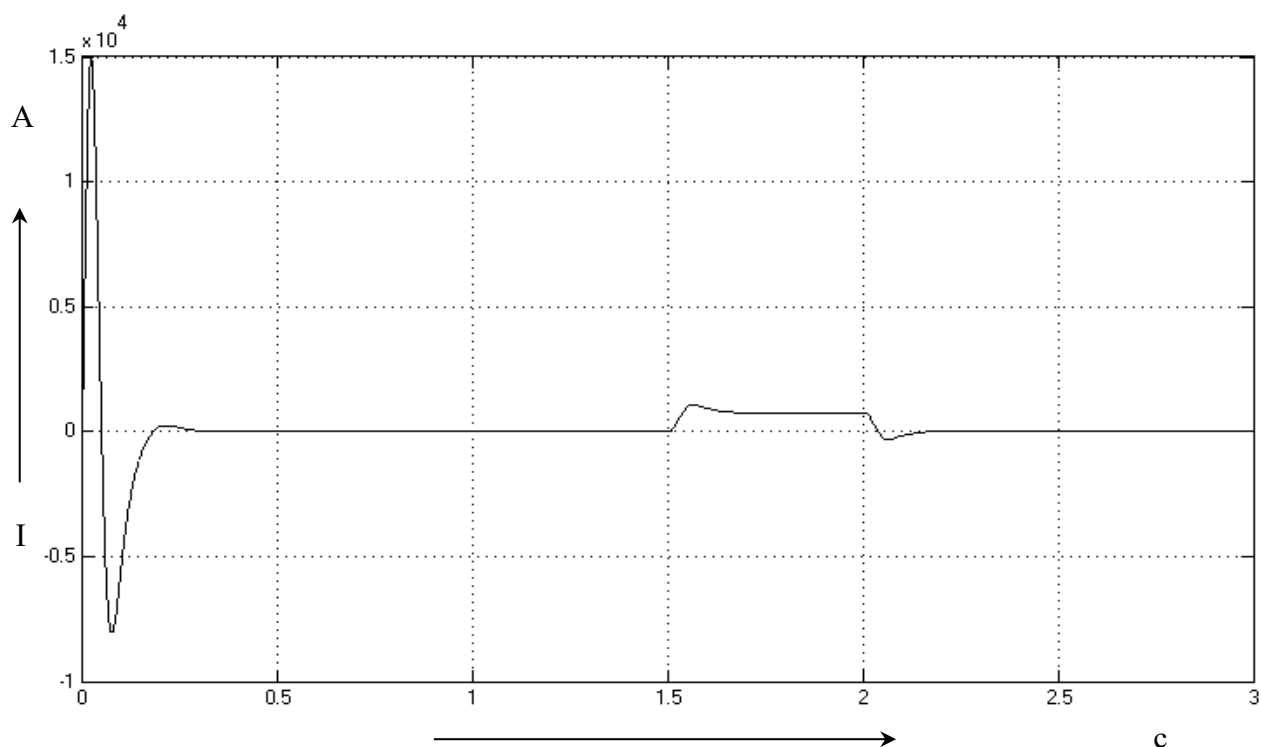


Рисунок 2.2 - Переходный процесс тока двигателя при воздействии нагрузки в момент времени $t_1=1,5$ и снятии ее в момент времени $t_2=2$ с

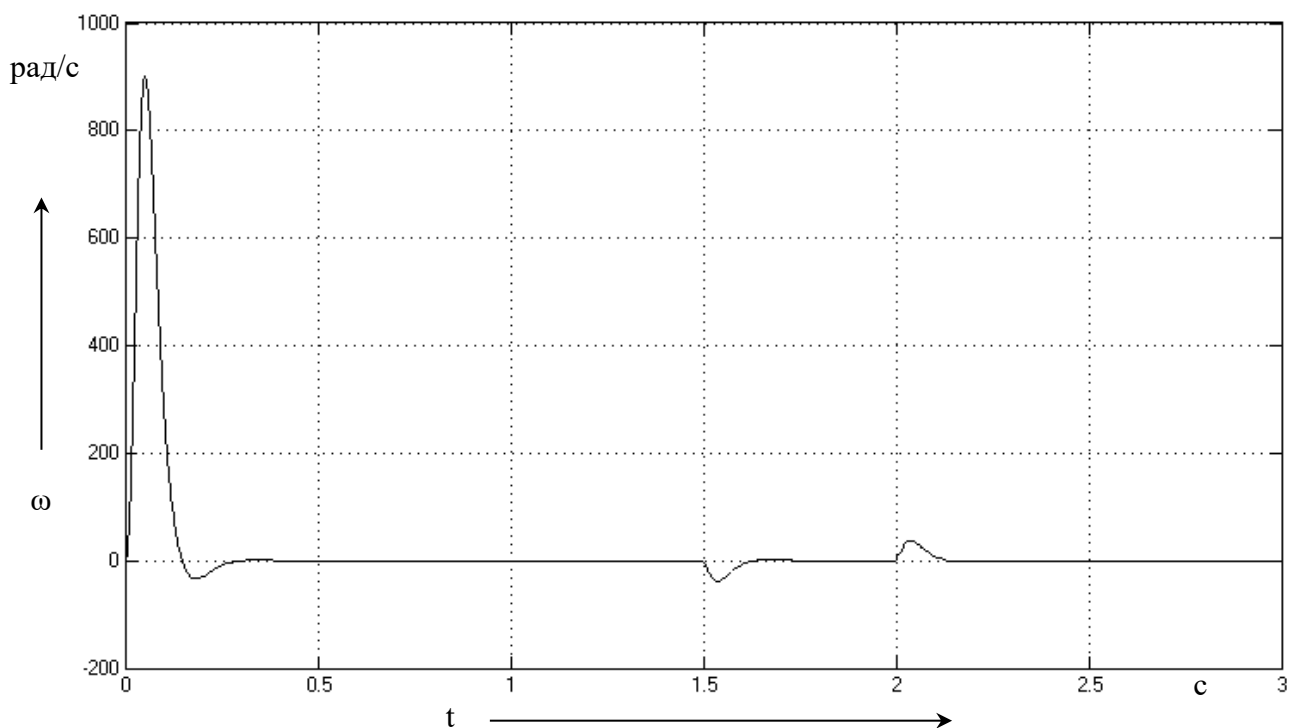


Рисунок 2.3 - Переходный процесс скорости двигателя при воздействии нагрузки в момент времени $t_1=1,5$ с и снятии ее в момент времени $t_2=2$ с

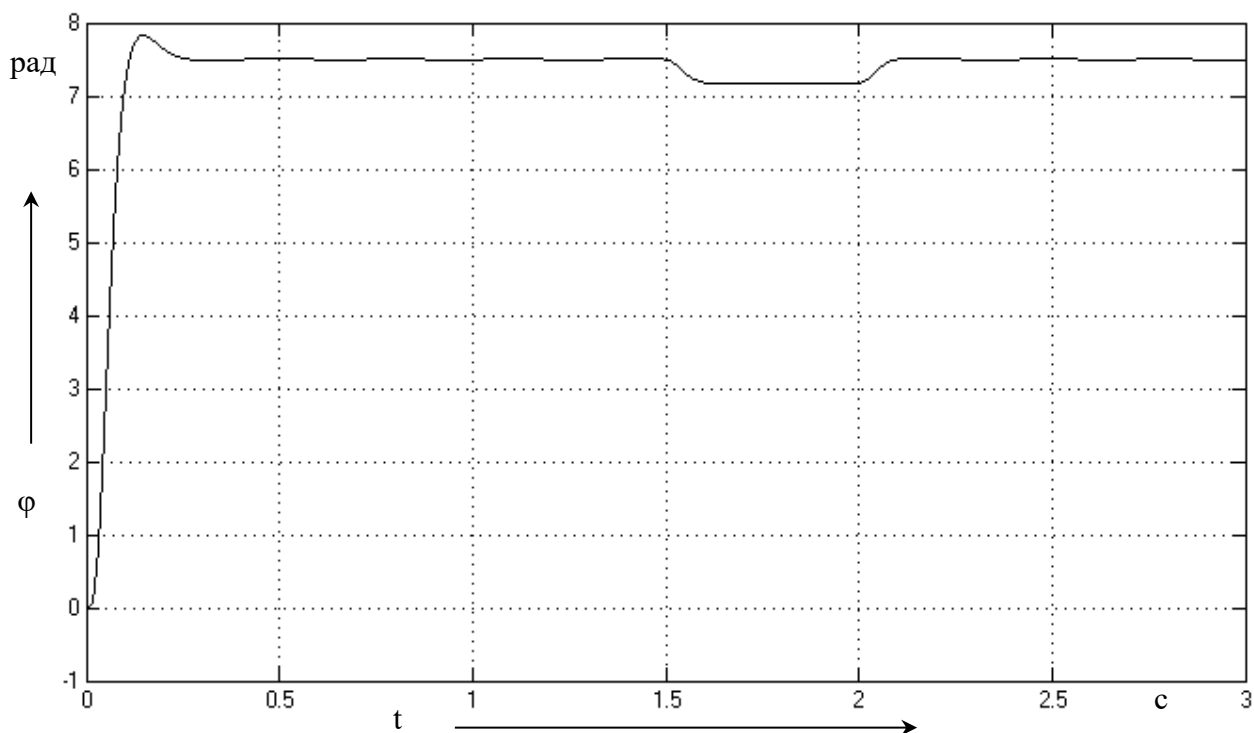


Рисунок 2.4 - Переходный процесс положения двигателя при воздействии нагрузки в момент времени $t_1=1,5$ с и снятии ее в момент времени $t_2=2$ с

Анализируя результат моделирования, видно, что система стабильна. Присутствует допустимое перерегулирование. Система нормально отрабатывает нагрузку в интервале 1,5 – 2 с. В установившемся режиме переходный процесс по положению выходит на значение 7,5 рад.

2.2 Моделирование стандартной нечеткой системы электропривода с механизмом вывода Мамдани

Синтез нечеткой СУЭП осуществлялся в ходе моделирования типовой системы управления электроприводом постоянного тока путем замены классического регулятора положения на НЛР с механизмом вывода Мамдани (рисунок 2.5).

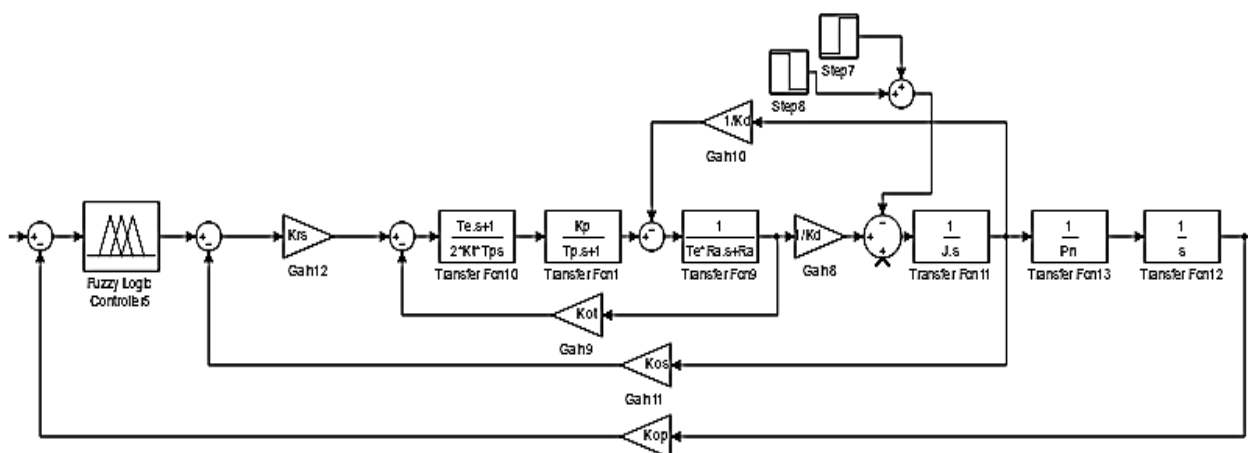


Рисунок 2.5 – Модель электропривода постоянного тока с нечетким регулятором

НЛР, представленный на рисунке 2.6, анализирует сигнал ошибки и имеет на своем входе лингвистическую переменную $input1$, выход регулятора формализуется одной лингвистической переменной $output1$. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечеткого логического вывода Мамдани.

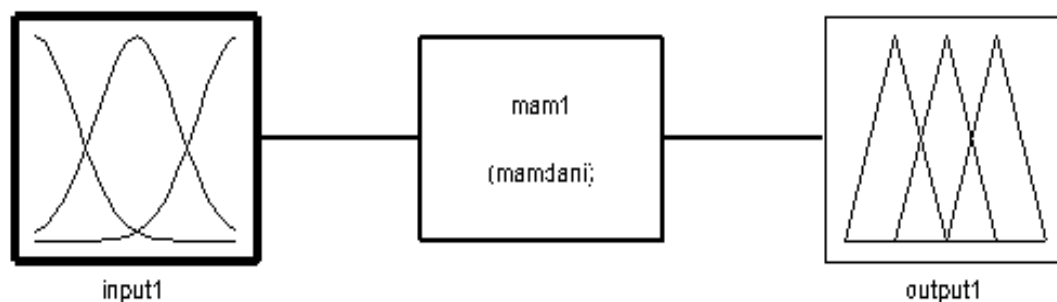


Рисунок 2.6 – Функциональная схема НЛР

Лингвистическая переменная $input1$, формализующая понятие входного сигнала НЛР – сигнал ошибки по положению, реализована с использованием пяти аппроксимированных функций принадлежности треугольного вида (рисунок 2.7). Распределение констант в блоке фаззификации представляет собой базовое терм-множество X лингвистической переменной, которое состоит из следующих элементов: $X = \{BN, N, Z, P, BP\}$, где BN – наибольшее отрицательное значение; N – отрицательное значение; Z – нулевое значение; P – положительное значение; BP – наибольшее положительное значение (названия нечетких переменных лингвистической переменной $input1$). Выбор диапазона области определения

лингвистических переменных производится по переходному процессу СУЭП с классическим регулятором и составляет $[-8; 8]$.

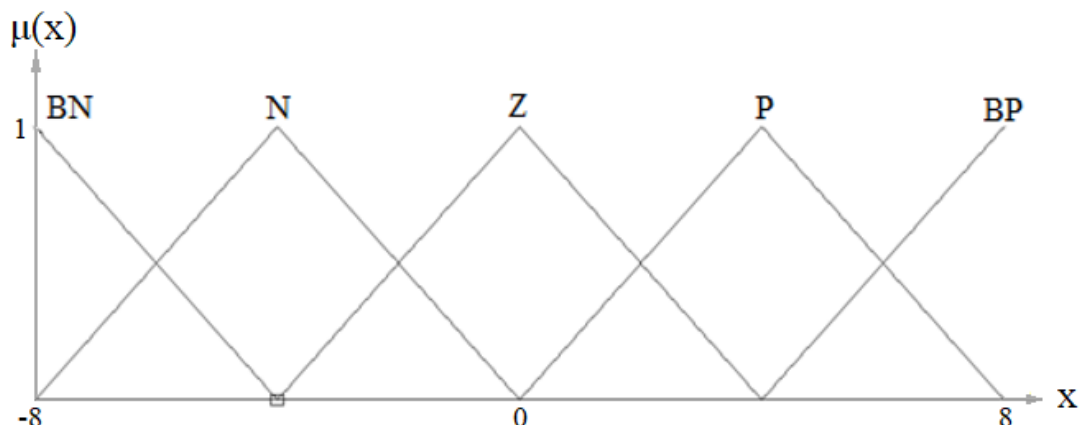
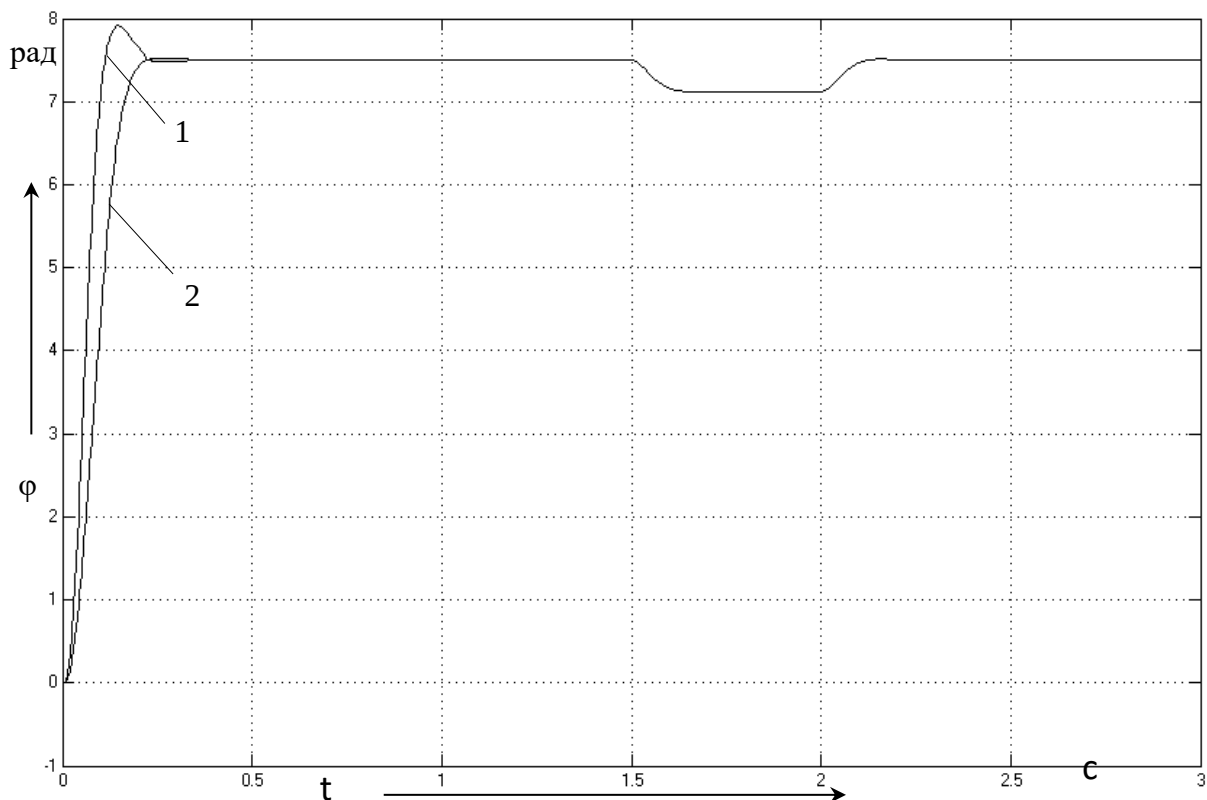


Рисунок 2.7 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению»

Понятие выходного сигнала НЛР - скорости изменения ошибки по положению - формализовано лингвистической переменной *output1*. Анализ выходной динамической характеристики СУЭП с классическим регулятором позволяет определить диапазон области определения лингвистической переменной *output1*. Базовое терм-множество X лингвистической переменной состоит из следующих элементов: $X = \{BN, N, Z, P, BP\}$, где BN – наибольшее отрицательное значение; N – отрицательное значение; Z – нулевое значение; P – положительное значение; BP – наибольшее положительное значение (названия нечетких переменных лингвистической переменной *output1*) [30-34, 101]. В области определения $[-39,17; 39,17]$ базового терм-множества лингвистической переменной «скорость изменения ошибки по положению» (аналогично рисунку 2.7) распределены пять аппроксимированных функций принадлежности нечетких переменных треугольного вида.

Нечеткая продукционная база знаний НЛР моделируется с применением общепринятых методик и будет состоять из 4 продукционных правил:

1. If (input1 is «Z») then (output1 is «Z»);
2. If (input1 is «BP») then (output1 is «BP»);
3. If (input1 is «P») then (output1 is «BP»);
4. If (input1 is «N») then (output1 is «N»).



1 – классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП с НЛР

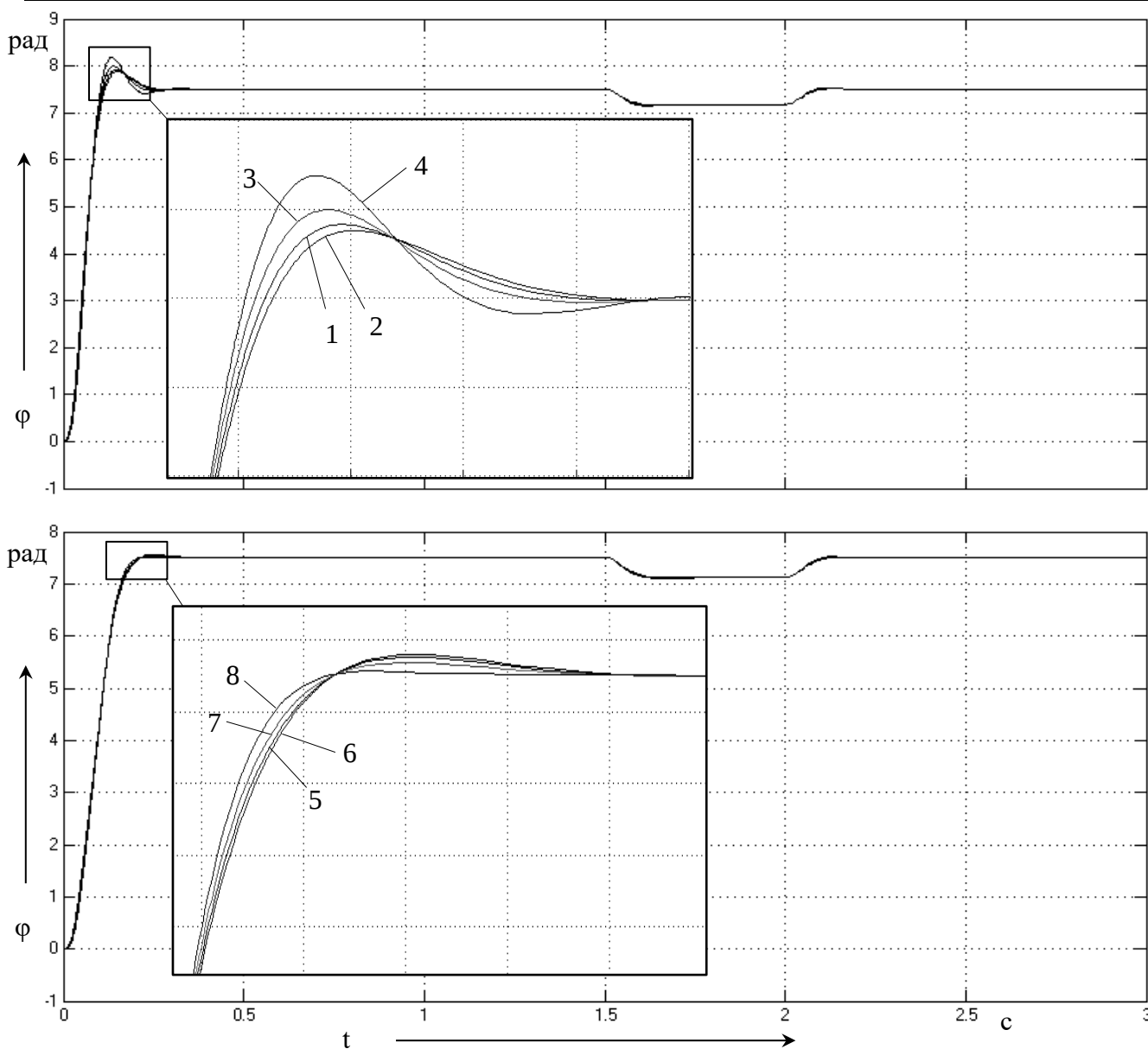
Рисунок 2.8 – Динамические характеристики СУЭП с классическим регулятором и НЛР с алгоритмом вывода Мамдани

Анализ динамических процессов, приведенных на рисунке 2.8, показывают, что классическая СУЭП обладает перерегулированием, в то время ИСУЭП с НЛР не имеет перерегулирования и полностью компенсирует возмущающее воздействие.

Анализ эффективности работы НЛР с механизмом вывода Мамдани осуществлялся по оценке реакции системы на нестационарность параметров тиристорного преобразователя при изменении его коэффициентов в диапазоне от -30% до 15% от номинального значения (таблица 2.1). На рисунке 2.9 приведено семейство переходных характеристик, отражающих влияние изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя в диапазоне от -30% до 15% объекта управления.

Таблица 2.1 – Нестационарность коэффициента усиления тиристорного преобразователя в ИСУЭП с НЛР Мамдани

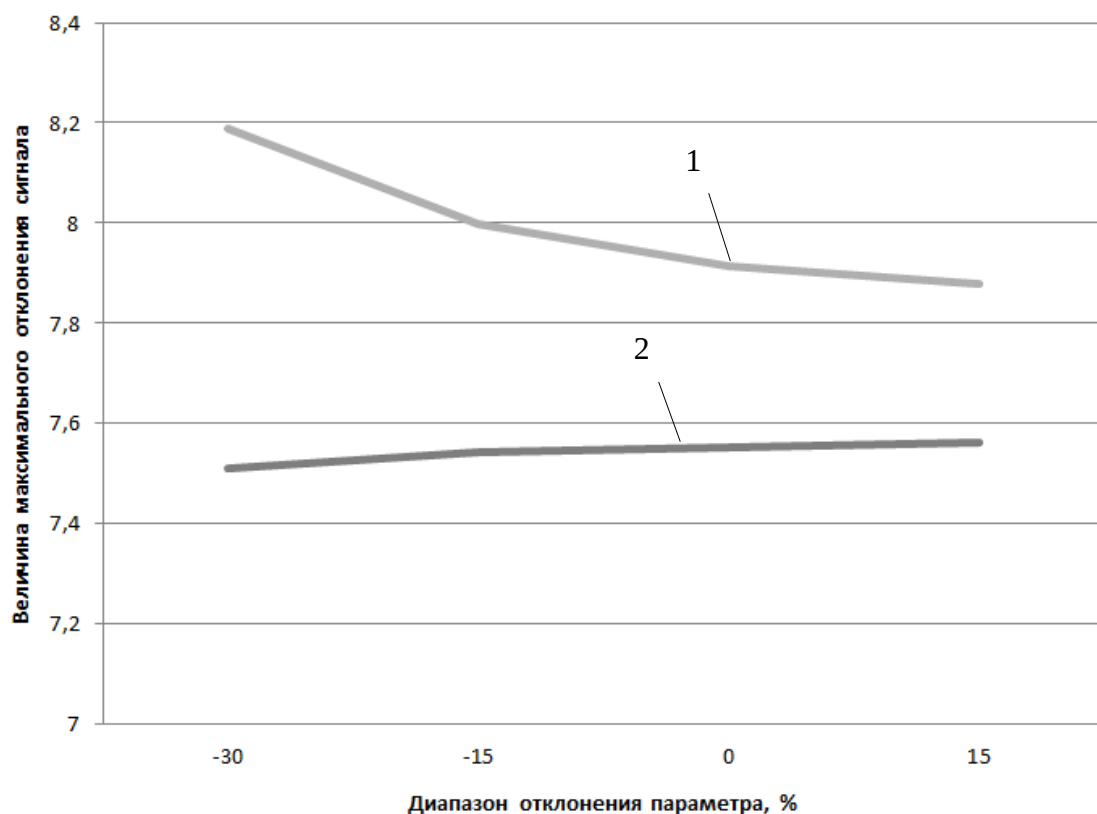
Область изменения параметра, %	-30	-15	0	+15
Значение K_p	23,625	28,6875	33,75	38,8125
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	8,189	7,996	7,9137	7,8791
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с НЛР	7,51	7,54	7,55	7,56



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

Рисунок 2.9 - Семейство переходных характеристик, отражающих влияние изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя в диапазоне от -30% до 15%

На рисунке 2.10 приведена диаграмма, отображающая отклонение основных параметров технологического процесса при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в широком диапазоне значений. Результаты моделирования, представленные на рисунке 2.10, показывают невосприимчивость к недетерминированному изменению внутренних параметров.



1 – классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП с НЛР с механизмом вывода Мамдани

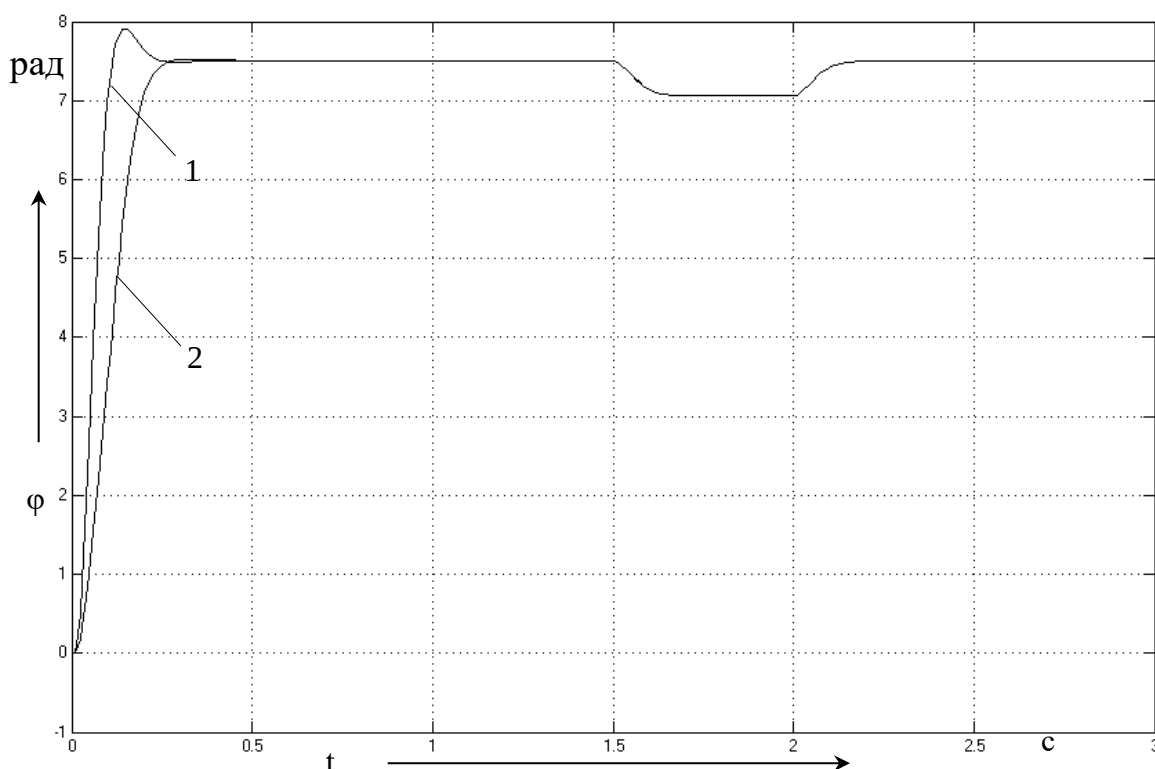
Рисунок 2.10 - Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в широком диапазоне значений

2.3 Моделирование стандартной нечеткой системы электропривода с механизмом вывода Сугено

Подобным образом осуществляется синтез и моделирование ИСУЭП с алгоритмом вывода Сугено. Отличительным признаком при настройке интеллектуального блока является формирование и распределение нечетких термов в блоке дефазификации [35-37, 109]. Тогда с учетом использования упрощенного алгоритма нечеткого вывода продукционная база правил будет иметь вид:

1. If (input1 is «Z») then (output1= 0);
2. If (input1 is «BP») then (output1= 19,5);
3. If (input1 is «P») then (output1= 19,5);
4. If (input1 is «N») then (output1= -8).

Анализ переходных характеристик, проиллюстрированных на рисунке 2.11, позволяет сделать вывод, что ИСУЭП с НЛР удовлетворяет предъявляемым требованиям и показывает качественные характеристики по положению.



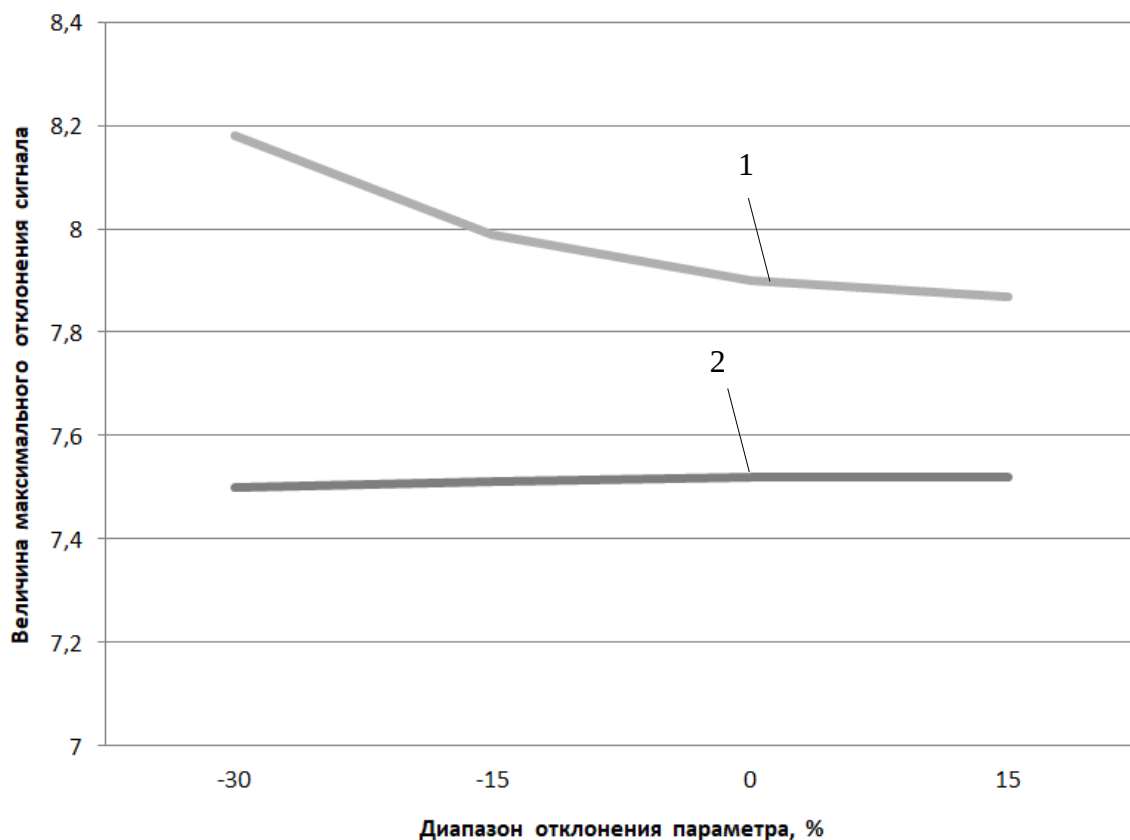
1 – классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП с НЛР

Рисунок 2.11 – Динамические характеристики СУЭП с классическим регулятором и НЛР с механизмом вывода Сугено

Оценка работоспособности ИСУЭП с механизмом вывода Сугено в случае нестационарности параметров тиристорного преобразователя проводилась аналогично методике, приведенной в пункте 2.2. Изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя представлено в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Нестационарность коэффициента усиления тиристорного преобразователя в ИСУЭП с регулятором Сугено

Диапазон изменения параметра, %	-30	-15	0	+15
Значение K_p	23,625	28,6875	33,75	38,8125
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	8,189	7,996	7,913	7,8791
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с НЛР	7,501	7,510	7,520	7,520



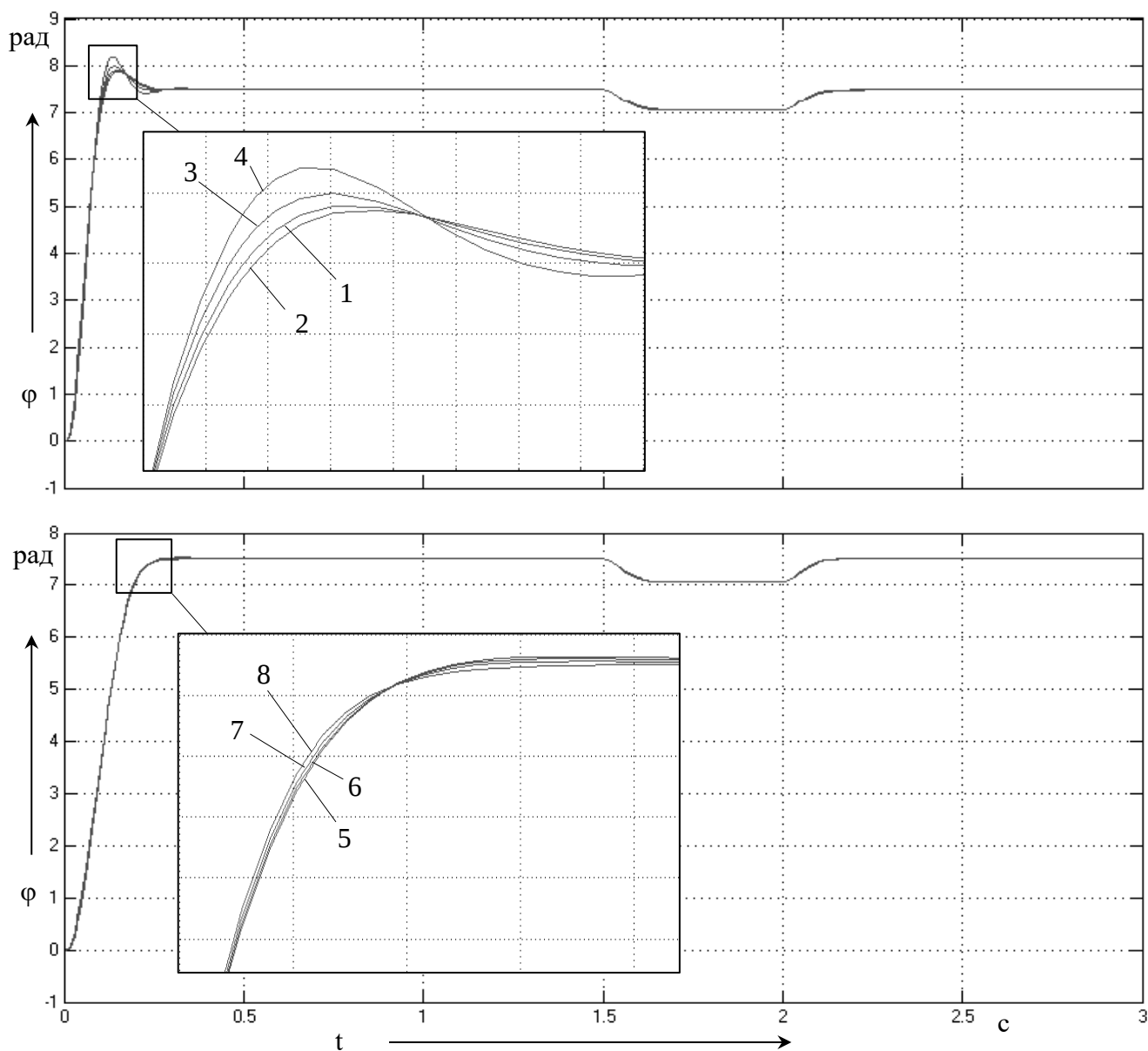
1 – СУЭП с классическим регулятором, 2 – ИСУЭП с НЛР Сугено

Рисунок 2.12 - Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в широком диапазоне значений

Характеристики, приведенные на рисунке 2.12, отображает отклонение основных показателей качества процесса регулирования при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в заданном диапазоне. Анализ представленных характеристик позволяет сделать вывод, что ИСУЭП с НЛР остается устойчивой к недетерминированным внутренним возмущениям.

Результат реакции СУЭП на ступенчатое воздействие управляющего и возмущающего сигнала (рисунок 2.13) показывает, что система стабильна и

выходные характеристики классической и нечеткой СУЭП в статическом режиме имеют одинаковый заданный уровень. Кроме того, следует отметить, что ИСУЭП с НЛР нечувствительна к вариациям внутренних параметров регулятора положения.



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

Рисунок 2.13 - Семейство переходных характеристик, отражающих влияние изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя в диапазоне от -30% до 15%

2.4 Математическое описание многокаскадного нечеткого логического регулятора

Вследствие отсутствия возможности перенастройки законов управления в условиях существенного изменения режимов работы СУЭП использование стандартных моделей нечетких систем представляется ограниченным. Кроме того повышение точности математического описания системы электропривода приводит к росту количества лингвистических переменных в НЛР, и, как следствие, сопровождается резким увеличением объема базы знаний. Для ослабления указанных недостатков предлагается использовать двухкаскадную иерархическую структуру, внешний каскад которой является интеллектуальным переключающим устройством, а вложенный каскад состоит из набора нечетких модулей, позволяющих переключать режимы работы [38-44, 103].

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

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

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

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

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

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

где z_i – переменная вывода i -го правила;

C_i – функция принадлежности консеквента i -го правила.

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

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

Приведение к четкости целесообразно проводить центроидным методом:

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

При формировании нечеткого вывода с применением алгоритма Сугено изменится лишь консеквент продукционного правила, который может быть записан в виде полинома:

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

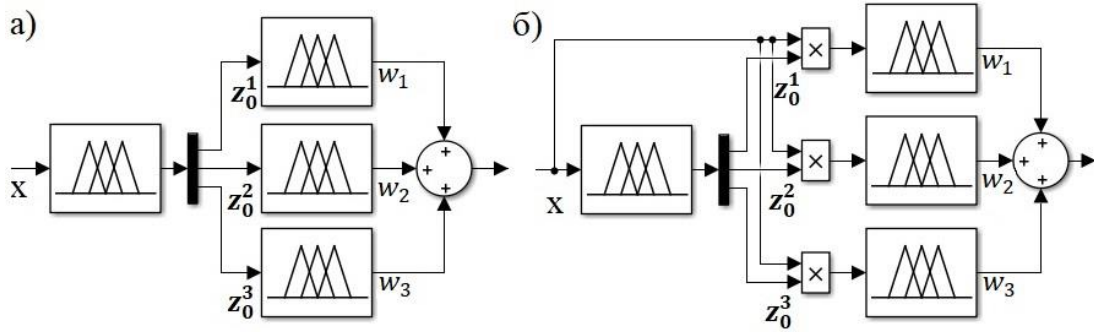


Рисунок 2.14 – Структурная схема МНЛР

а – с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани;
б – с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани

Для МНЛР (рисунок 2.14(а)) выходное состояние переменных вывода внешнего каскада можно записать в виде следующего набора выходных значений:

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

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

Индивидуальные выходы правил имеют вид:

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

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

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

β_i – уровень отсечения для каждого состояния входной лингвистической переменной НЛР вложенного модуля,

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

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

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

Для случая алгоритма нечеткого вывода Сугено нулевого порядка (рисунок 2.14 (б)) компонент формулы

$$C_i^j(z) = C_i = \text{const}$$

будет дополнен сигналом, содержащим информацию о состоянии входа МНЛР:

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

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

Для повышения интеллектуальности системы электропривода введем многокаскадность, что позволит расширить диапазон применения нечетких систем. Для формирования модели МНЛР необходимо реализовать интеллектуальную систему, включающую в себя ряд простейших регуляторов Мамдани, имеющих единственные функции принадлежности на входе и выходе, и интеллектуальное переключающее устройство с алгоритмом вывода Сугено, обладающее единственной лингвистической переменной на входе и тремя информационными выходами [45-50, 104, 107].

Введем в СУЭП интеллектуальное переключающее устройство, состоящее из одного НЛР с механизмом вывода Сугено и тремя элементами умножения, формирующими совокупность задающих воздействий для модулей внутреннего каскада. Основной функцией интеллектуального переключающего устройства является переключение режимов работы интеллектуальных модулей внутреннего каскада (рисунок 2.15).

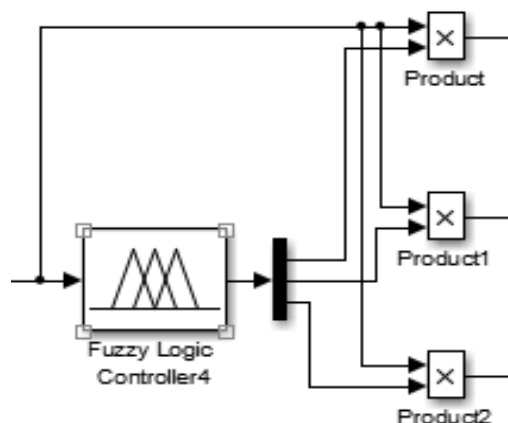


Рисунок 2.15 – Модель интеллектуального переключающего устройства с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани

НЛР, представленный на рисунке 2.16, анализирует сигнал ошибки, и имеет на своем входе одну лингвистическую переменную $input1$, а выход регулятора формализуется тремя информационными выходами $output1$, $output2$, $output3$. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечеткого алгоритма вывода Сугено.

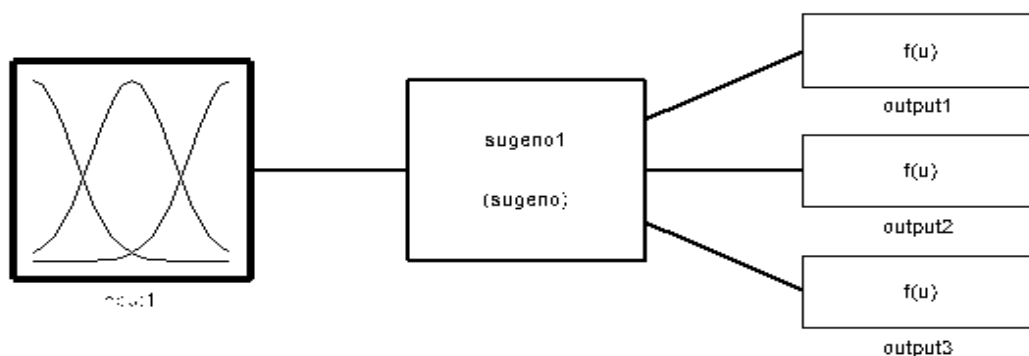


Рисунок 2.16 – Функциональная схема НЛР с механизмом вывода Сугено

Лингвистическая переменная $input1$ формализует понятия входного сигнала НЛР – сигнал ошибки по положению. Область определения представляет собой диапазон $[0; 10,4]$. Базовое терм-множество X лингвистической переменной состоит из следующих элементов: $X = \{Z, P, BP\}$, где Z – нулевое значение; P – положительное значение; BP – наибольшее положительное значение (названия нечетких терм лингвистической переменной $input1$). В области определения базового терм-множества лингвистической переменной распределены три

аппроксимированные функций принадлежности нечетких переменных в виде трапеций (рисунок 2.17).

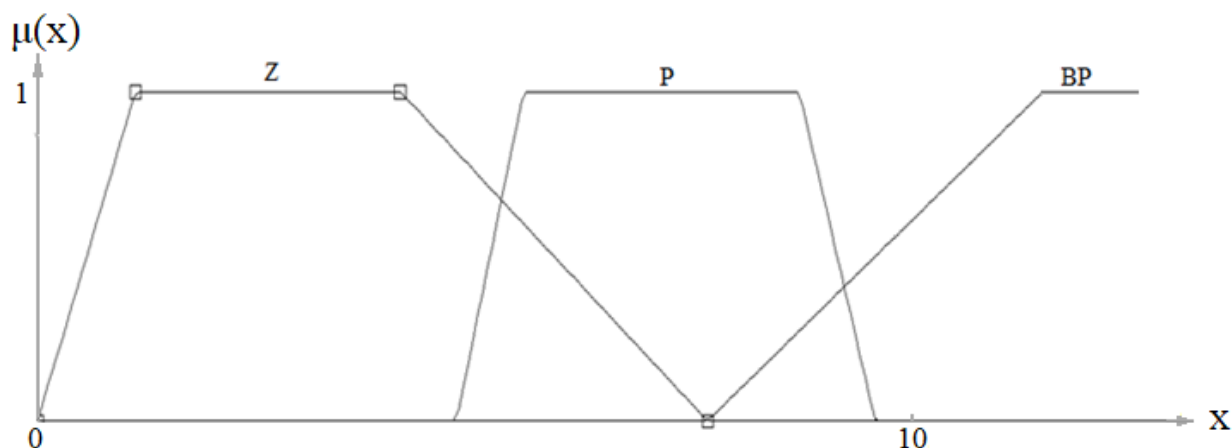


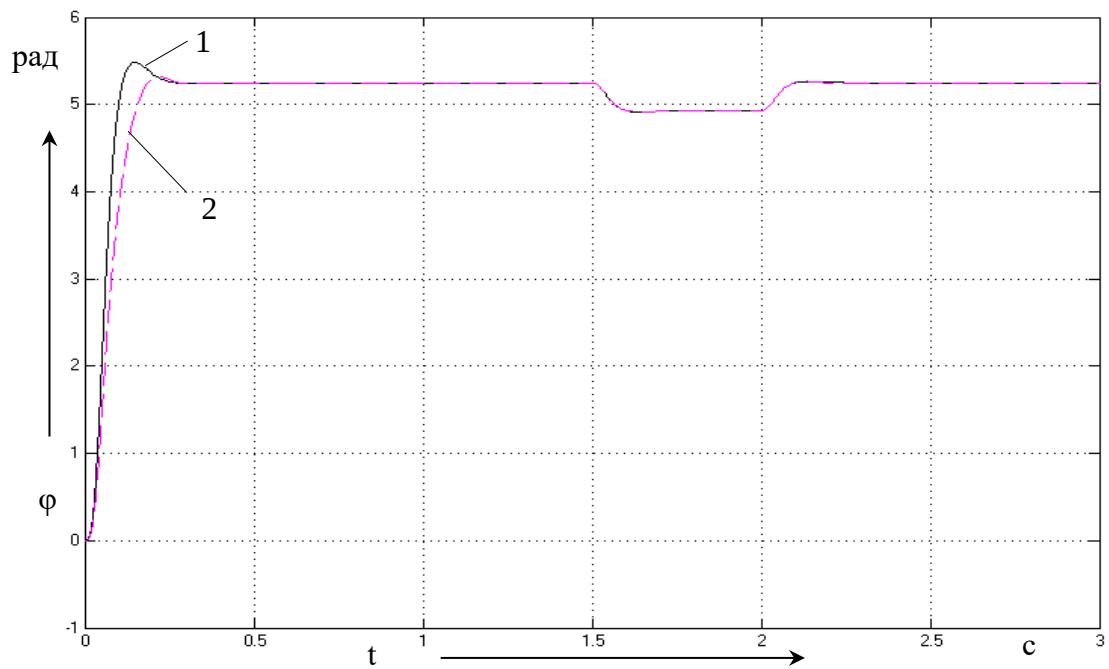
Рисунок 2.17 – Распределение нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению»

Лингвистические переменные $output1$, $output2$ и $output3$ формализуют понятие выходного сигнала НЛР. Диапазон регулирования представляет собой область $[0;1]$. Базовое терм-множество X лингвистических переменных состоит из двух элементов: $X = \{Z, O\}$, где Z – постоянная величина, равная нулю; O – постоянная величина, равная единице.

Нечеткая продукционная база знаний НЛР представляет собой перечень из трёх правил и имеет следующий вид:

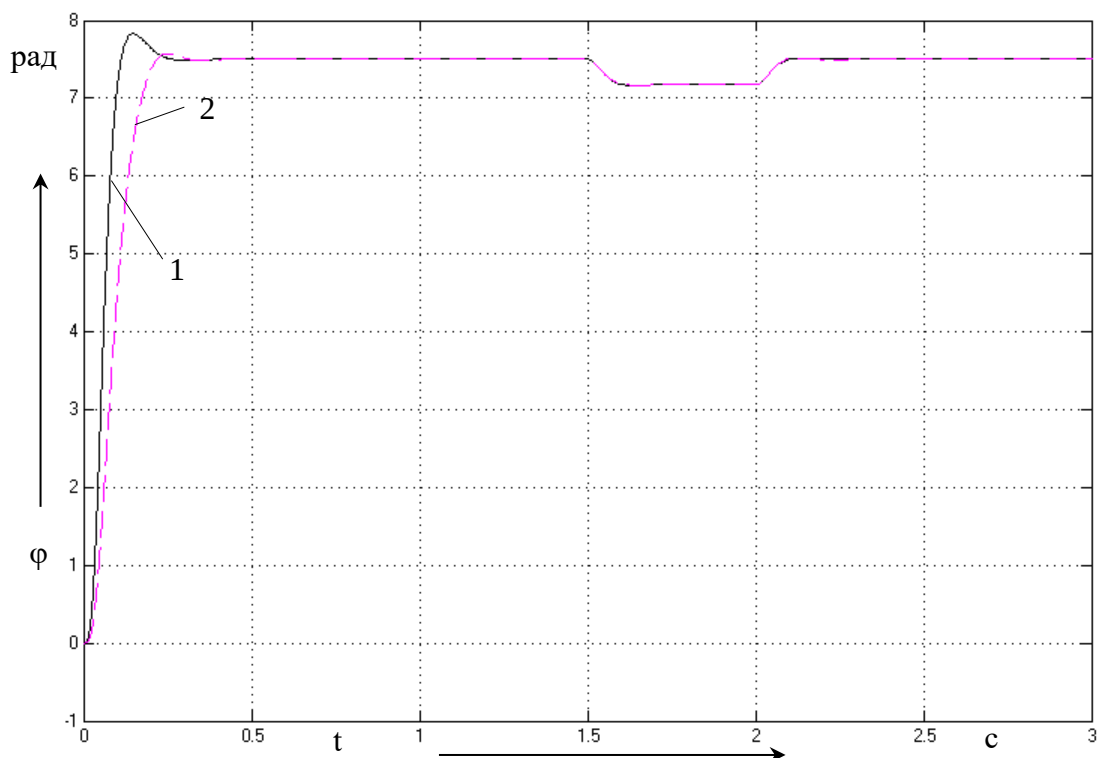
1. If (input1 is «Z») then (output1 = 0), (output2 = 1), (output3 = 0);
2. If (input1 is «P») then (output1 = 1), (output2 = 0), (output3 = 0);
3. If (input1 is «BP») then (output1 = 0), (output2 = 0), (output3 = 1).

Внутренний каскад МНЛР состоит из набора нечетких модулей с единственными входной и выходной лингвистическими переменными, отличающихся друг от друга областью определения в блоках фаззификации и дефаззификации. В представленном случае синтез внутреннего каскада МНЛР зависит от вариации задающего сигнала в интервале $[-30\%; 30\%]$ от исходной величины, а также области определения входных и выходных лингвистических переменных, в результате чего формируется набор из трех простейших НЛР. В результате моделирования МНСУЭП постоянного тока были получены графики переходных процессов, приведенные на рисунках 2.18 - 2.20.



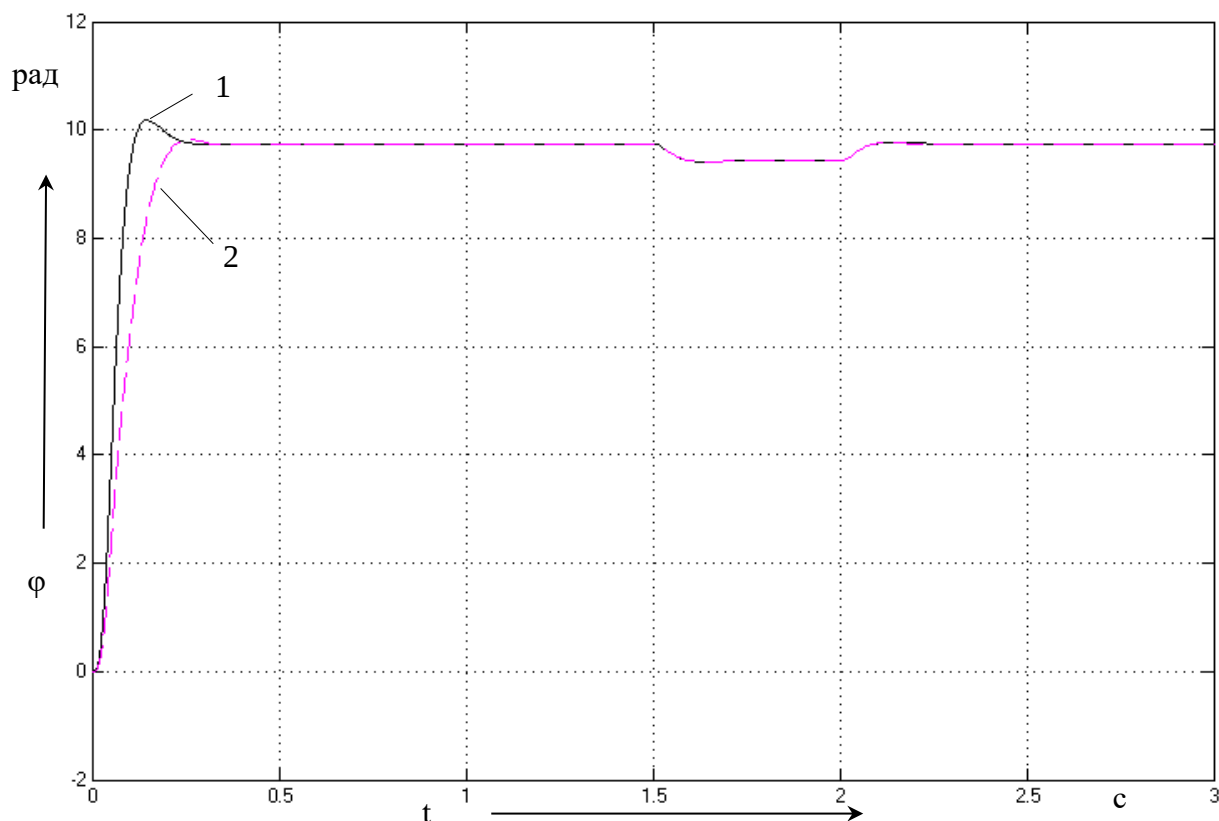
1 – СУЭП с классическим регулятором, 2 – МНСУЭП с НЛР

Рисунок 2.18 – Переходные характеристики классической и интеллектуальной СУЭП при подаче уменьшенного управляющего сигнала на 30% от исходного значения



1 – СУЭП с классическим регулятором, 2 – МНСУЭП с НЛР

Рисунок 2.19 – Переходные характеристики классической и интеллектуальной системы автоматического регулирования при подаче управляющего сигнала



1 – СУЭП с классическим регулятором, 2 – МНСУЭП с НЛР

Рисунок 2.20 – Переходные характеристики классической и интеллектуальной системы автоматического регулирования при подаче увеличенного управляющего сигнала на 30% от исходного значения

2.5 Синтез двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани

Используя выше описанное структурное решение, была получена модель ИСУЭП с МНЛР (рисунок 2.21) [15].

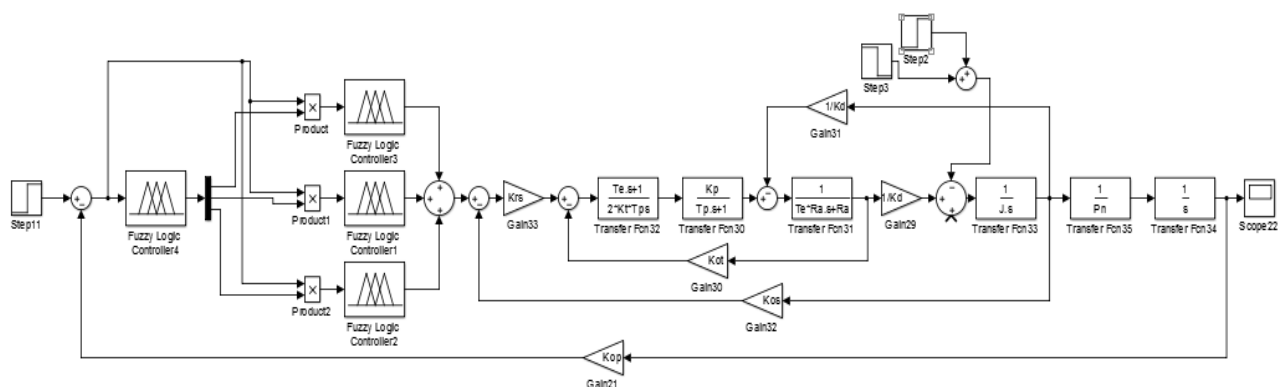


Рисунок 2.21 – Имитационная модель нечеткой СУЭП

Функциональная схема МНЛР с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани для системы управления электроприводом постоянного тока представлена на рисунке 2.22.

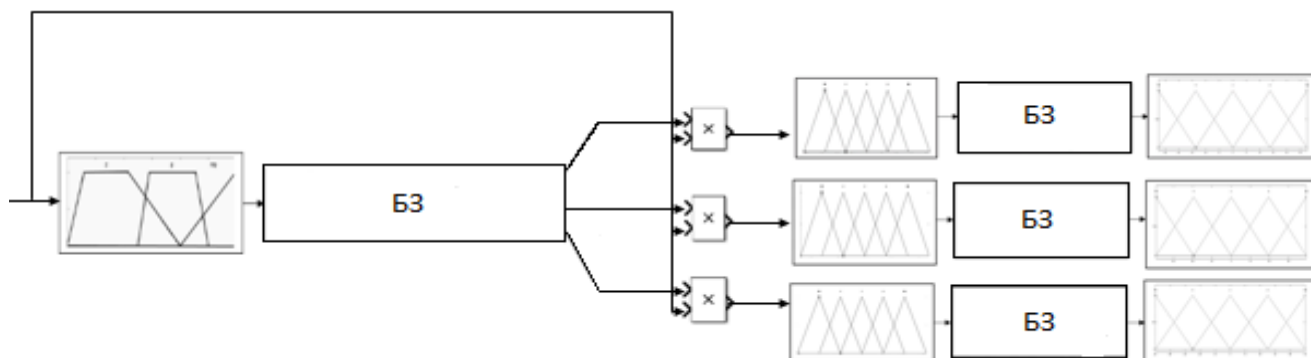


Рисунок 2.22 – Функциональная схема двухкаскадного интеллектуального модуля

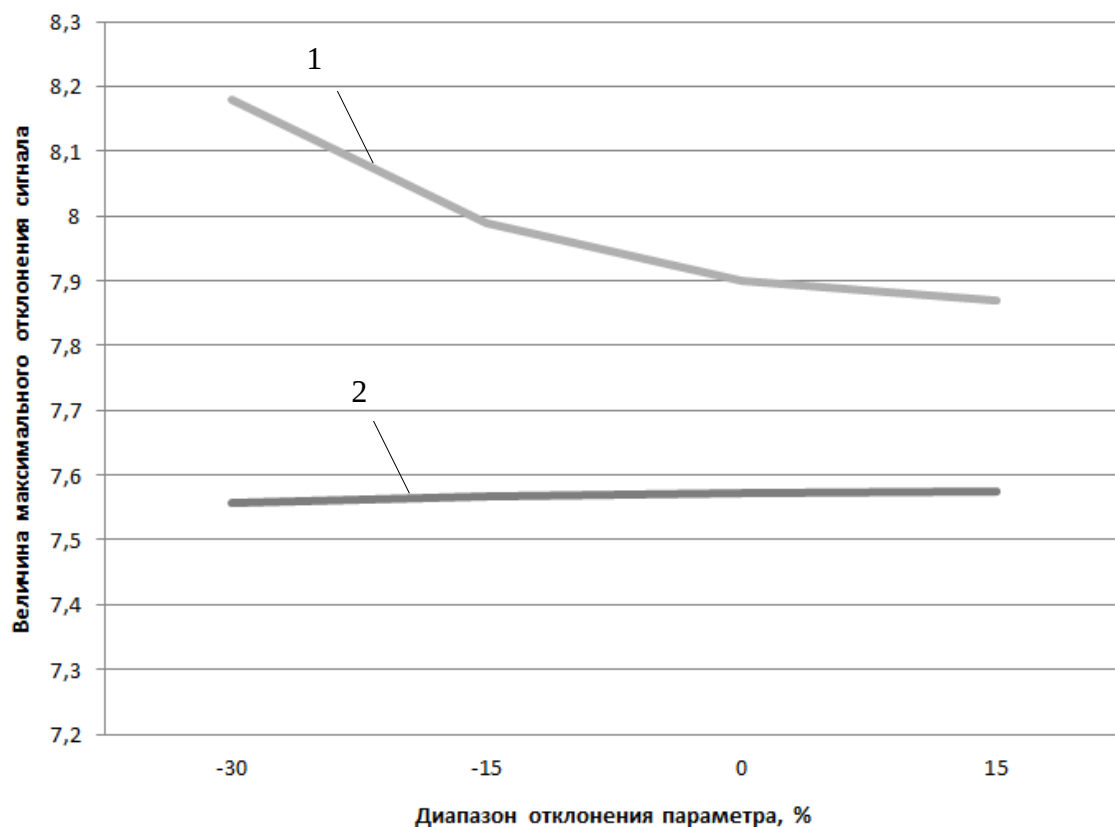
Анализ эффективности работы МНСУЭП постоянного тока осуществлялся по оценке реакции системы на нестационарность параметров тиристорного преобразователя при изменении его коэффициентов в диапазоне от -30% до 15% от номинального значения. Вариация коэффициента усиления тиристорного преобразователя приведена в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Нестационарность коэффициента усиления тиристорного преобразователя в МНСУЭП постоянного тока с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани

Диапазон изменения параметра, %	-30	-15	0	+15
Значение K_p	23,625	28,6875	33,75	38,8125
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	8,189	7,996	7,913	7,879
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с МНЛР	7,558	7,566	7,571	7,574

Для оценки отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в заданном диапазоне была построена диаграмма, приведенная на рисунке 2.23, анализ которой позволяет сделать вывода, что МНСУЭП с сочетанием алгоритмов Сугено-

Мамдани остается не восприимчивой к изменению внутренних параметров.



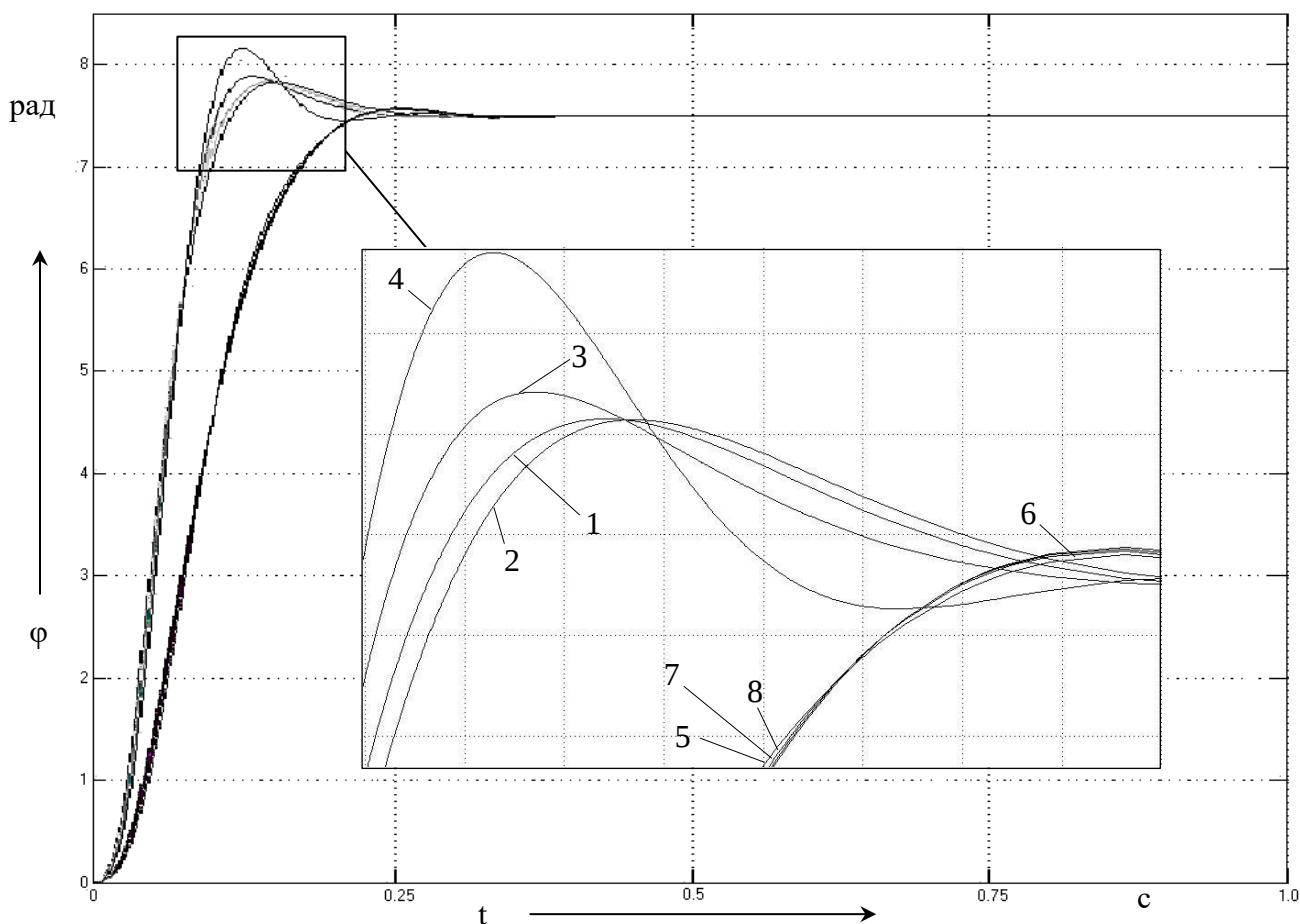
1 – СУЭП с классическим регулятором,

2 – МНСУЭП с сочетанием алгоритмов Сугено-Мамдани

Рисунок 2.23 - Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в широком диапазоне значений

В результате моделирования были получены переходные характеристики, анализ которых позволяет сделать вывод, что МНСУЭП постоянного тока проявляет робастные свойства по отношению к внутренним возмущениям, связанным с нестационарностью параметров технологического процесса (рисунок 2.24).

Необходимо отметить, что выбор предложенного сочетания алгоритмов нечеткого логического вывода обусловлен, прежде всего, простотой настройки блоков дефаззификации и упрощением базы правил, а, следовательно, и существенным сокращением вычислительных затрат, кроме того предлагаемый подход обеспечивает более гибкую настройку СУЭП [115, 116].



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

Рисунок 2.24 – Семейство переходных характеристик, отражающих влияние изменения параметра K_p в диапазоне от -30% до 15%

2.6 Синтез многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани

Дальнейший ход исследования предложенного подхода сводился к замене алгоритма нечеткого логического вывода во внешнем переключающем модуле. Кроме того была осуществлена структурная трансформация интеллектуального блока, в ходе которой были убраны элементы, реализующие функцию перемножения сигналов (рисунок 2.25). Применение этих блоков было обусловлено особенностями формирования выходного сигнала механизма вывода Сугено в форме константы, что повлекло за собой необходимость внедрения составляющей ошибки во вложенный каскад интеллектуальной системы управления электроприводом.

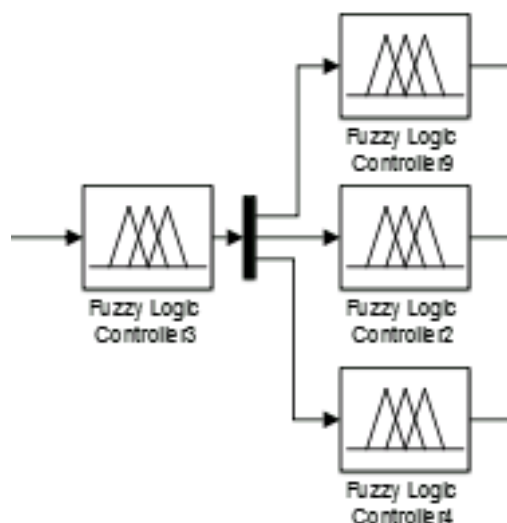


Рисунок 2.25 – Имитационная модель МНЛР с сочетанием механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани

Настройка интеллектуального переключающего устройства, состоящего из одного НЛР с механизмом вывода Мамдани, была выполнена аналогичным образом, как и для регулятора с алгоритмом вывода Сугено. НЛР, представленный на рисунке 2.26, анализирует сигнал ошибки, и имеет на своем входе одну лингвистическую переменную *input1*, а выход регулятора формализуется тремя информационными выходными воздействиями *output1*, *output2*, *output3*. Функционирование данного регулятора осуществляется с применением нечеткого алгоритма вывода Мамдани [119].

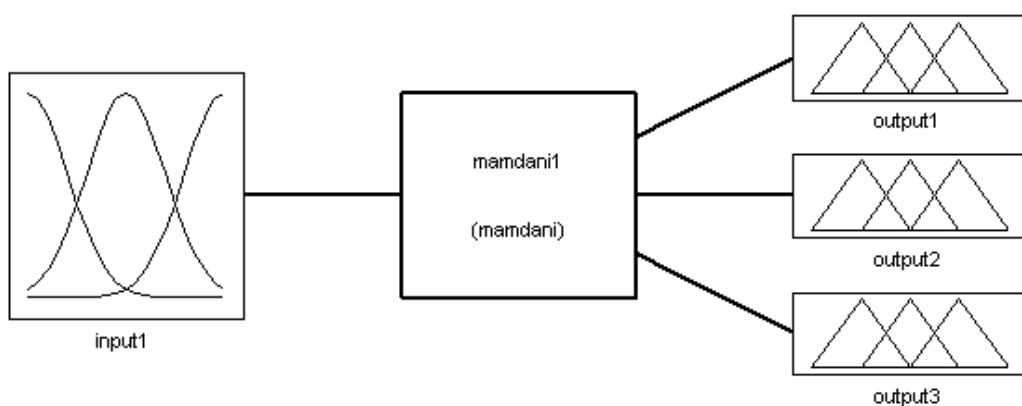


Рисунок 2.26 – Функциональная схема НЛР с механизмом вывода Мамдани

Формализация понятия входного сигнала (сигнал ошибки по положению) осуществляется лингвистической переменной *input1*. Диапазон распределения функций принадлежности лингвистической переменной *input1* отличается от

диапазона аналогичной входной переменной НЛР с алгоритмом вывода Сугено и представляет собой область $[0; 14,2]$, в которой распределены три трапецевидные функции принадлежности (аналогично рисунку 2.17). Базовое терм-множество X лингвистической переменной сформировано тремя нечеткими переменными и имеет следующий вид: $X = \{Z, P, BP\}$, где Z – нулевое значение; P – положительное значение; BP – наибольшее положительное значение.

Лингвистические переменные выходного сигнала output1, output2 и output3 формируют выходной сигнал нечеткого модуля. Область действия варьируется в диапазонах $[-5,6; 5,6]$, $[-8; 8]$ и $[-10,4; 10,4]$ для каждого выходного информационного воздействия соответственно. В области определения базового терм-множества $X = \{BN, N, Z, P, BP\}$ лингвистической переменной распределены равномерно пять функций принадлежности нечетких переменных треугольного вида (BN – наибольшее отрицательное значение; N – отрицательное значение; Z – нулевое значение; P – положительное значение; BP – наибольшее положительное значение). Продукционная база знаний НЛР представлена перечнем из трех правил и имеет следующий вид:

1. If (input1 is «Z») then (output1 is «N»), (output2 is «Z»), (output_3 is «N»);
2. If (input1 is «P») then (output1 is «P»), (output2 is «BP»), (output3 is «BP»);
3. If (input1 is «BP») then (output1 is «Z»), (output2 is «Z»), (output3 is «BP»).

Вложенный каскад МНЛР для системы управления электроприводом постоянного тока остается прежним и представляет собой набор из трех простейших НЛР с алгоритмом вывода Мамдани с разными диапазонами регулирования.

На основании методики, реализованной при построении многокаскадной нечеткой СУЭП с комбинацией алгоритмов выводов Сугено-Мамдани, был осуществлен анализ системы при изменении механизма нечеткого вывода в регуляторе внешнего каскада (рисунок 2.27). Структурно МНЛР представлен в виде каскада, состоящего из двух интеллектуальных модулей с набором

простейших НЛР, реализация которых осуществляется с применением механизмов вывода Мамдани (рисунок 2.28).

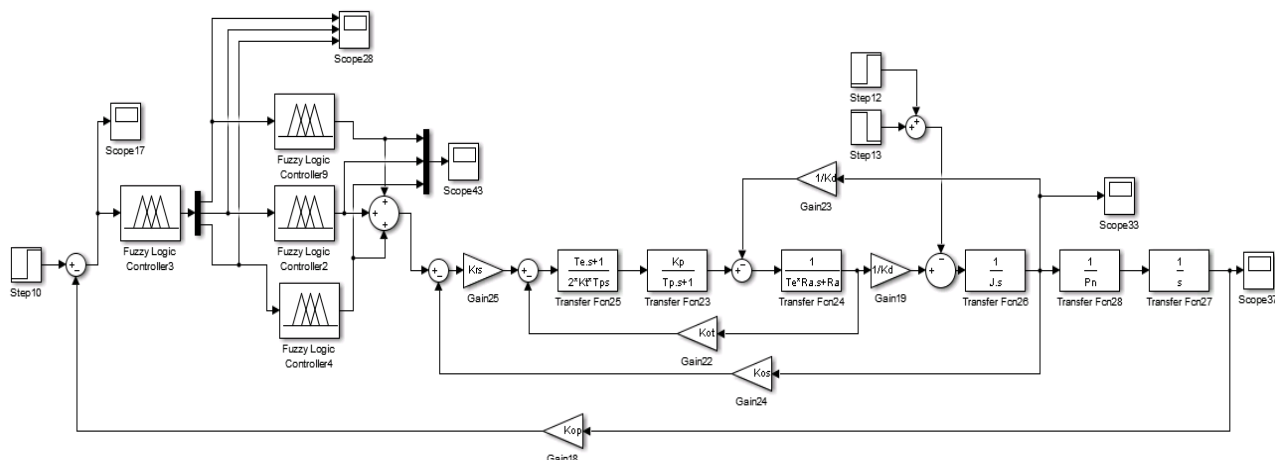


Рисунок 2.27 – Имитационная модель МНСУЭП постоянного тока с сочетанием механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани

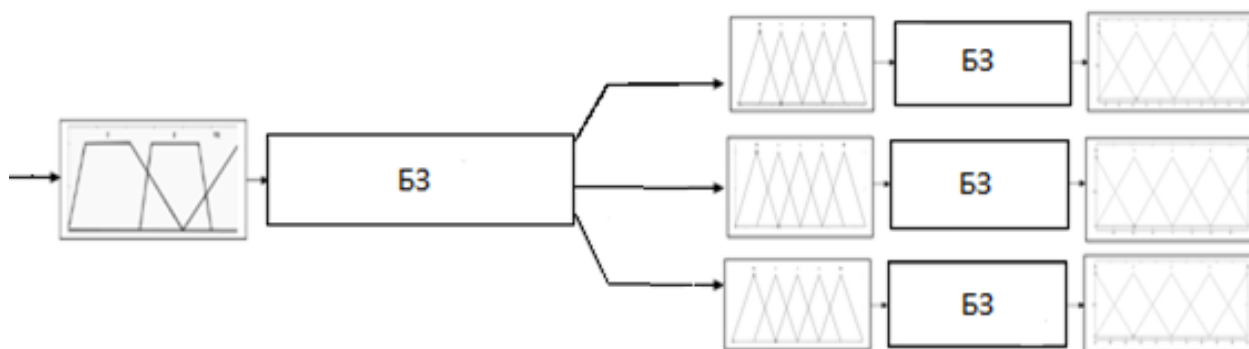
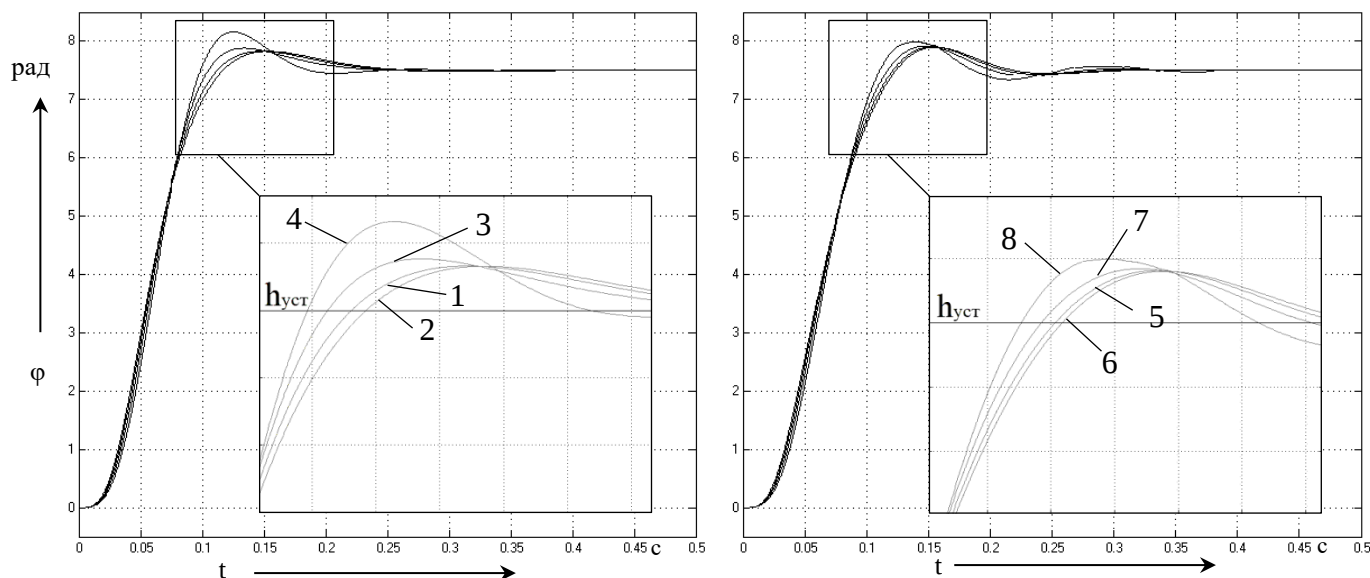


Рисунок 2.28 – Функциональная схема МНЛР с сочетанием механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани

Путем изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя в заданном диапазоне (таблица 2.4) осуществлялась оценка работоспособности МНСУЭП постоянного тока с сочетанием механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани. Результаты реакции классической модели и двухкаскадной СУЭП на отработку задающих сигналов приведены на рисунке 2.29.



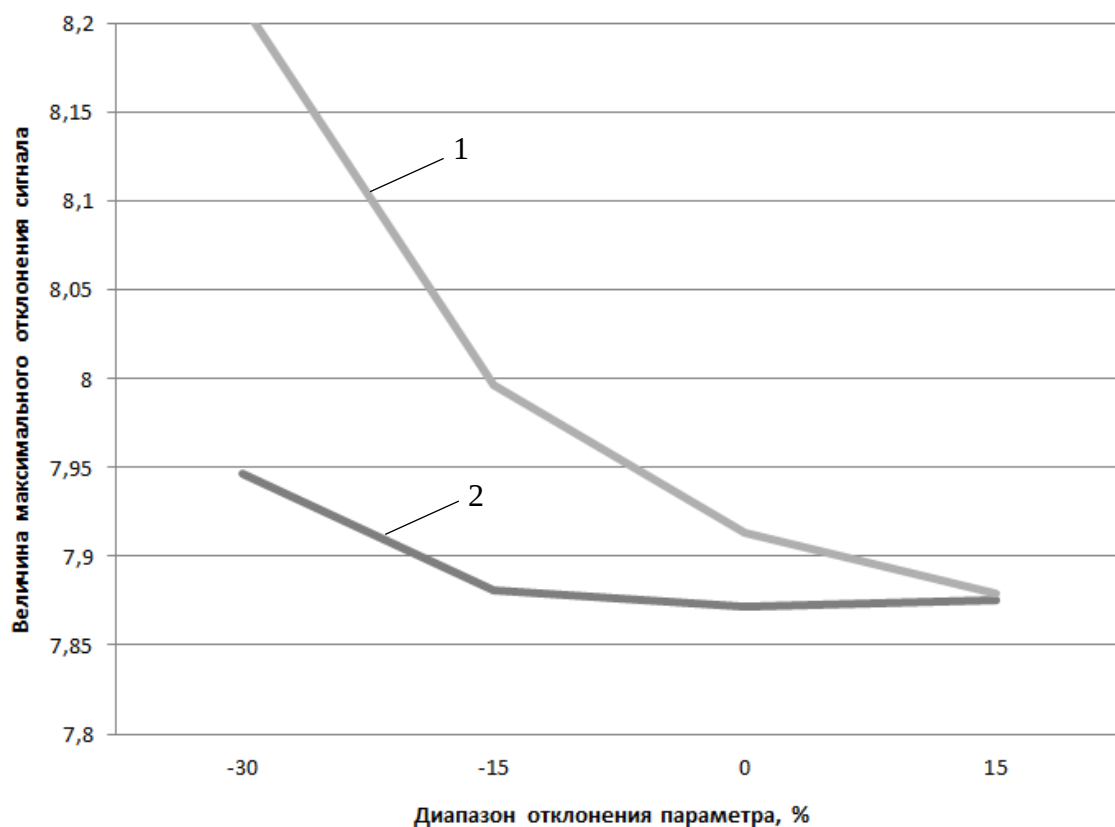
1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%; 4 – классическая СУЭП -30%; 5 – МНСУЭП; 6 – МНСУЭП +15%; 7 – МНСУЭП -15%; 8 – МНСУЭП -30%

Рисунок 2.29 – График переходного процесса СУЭП и МНСУЭП с сочетанием механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани

Таблица 2.4 – Нестационарность коэффициента усиления тиристорного преобразователя в ИСУЭП с сочетанием механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани

Диапазон изменения параметра, %	-30	-15	0	+15
Значение K_p	23,625	28,6875	33,75	38,8125
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	8,189	7,996	7,913	7,879
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с МНЛР	7,946	7,881	7,876	7,875

Анализ семейства кривых, представленных на рисунке 2.29, позволяет проверить возможности системы к адаптации при условии нестационарности внутренних параметров. Интегральные характеристики, отражающие изменения коэффициентов усиления тиристорного преобразователя (таблица 2.4), показаны на диаграмме (рисунок 2.30).



1 – СУЭП с классическим регулятором,
 2 – МНСУЭП с сочетанием алгоритмов Мамдани-Мамдани

Рисунок 2.30 - Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя в широком диапазоне значений

Таким образом, можно сделать вывод, что регуляторы, построенные с использованием классических методов, не обладают необходимой гибкостью, особенно при внедрении в систему недетерминированных возмущающих воздействий. Главным достоинством МНСУЭП является ее гибкость и робастность к целому ряду как внешних, так и внутренних воздействий. Вместе с тем, робастные свойства нечеткого регулятора ограничены некоторым пределом изменения параметров нестационарного объекта, что влечет за собой необходимость более точной настройки двухкаскадной нечеткой СУЭП при такой вариации внутренних коэффициентов объекта регулирования.

Настройка МНСУЭП постоянного тока с комбинацией алгоритмов нечеткого вывода Сугено-Сугено выполняется аналогичным образом. Основными проблемами при реализации модели являются настройка блока дефазификации и

изменение консеквентов правил на постоянные величины для внешнего и вложенного каскадов.

2.7 Исследование влияния элементов каскада на формирование итогового закона управления электроприводом постоянного тока

Итоговый закон управления, реализуемый на выходе МНЛР, представляет собой набор составляющих, которые формируются каждым элементом вложенного каскада. Первый каскад МНЛР производит экспертную оценку регулятора, в то время как второй каскад непосредственно генерирует управляющее воздействие на объект регулирования в зависимости от условий, создаваемых на входе СУЭП. Далее был осуществлен анализ поведения СУЭП при подаче сложного сигнала с различными уровнями порогового значения (рисунок 2.31).

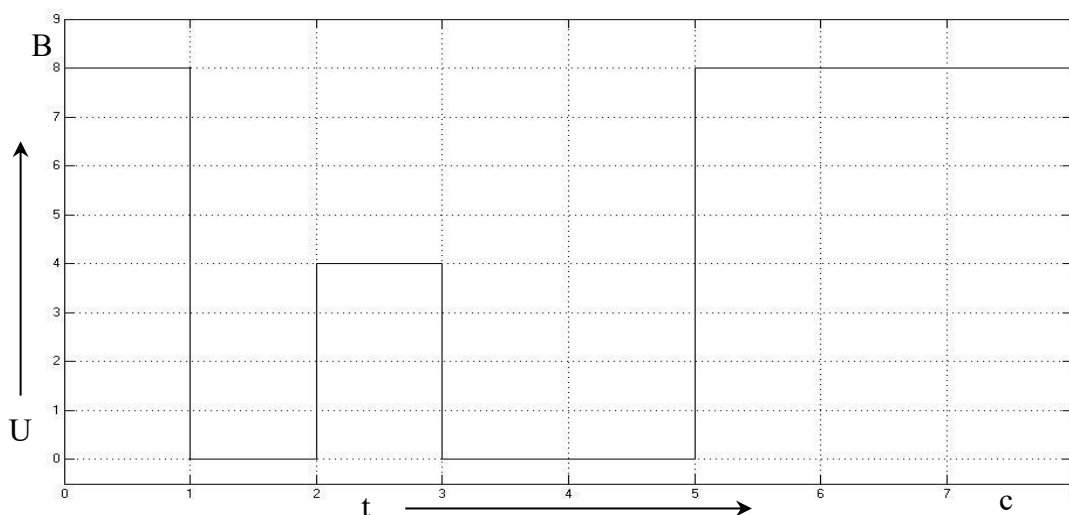
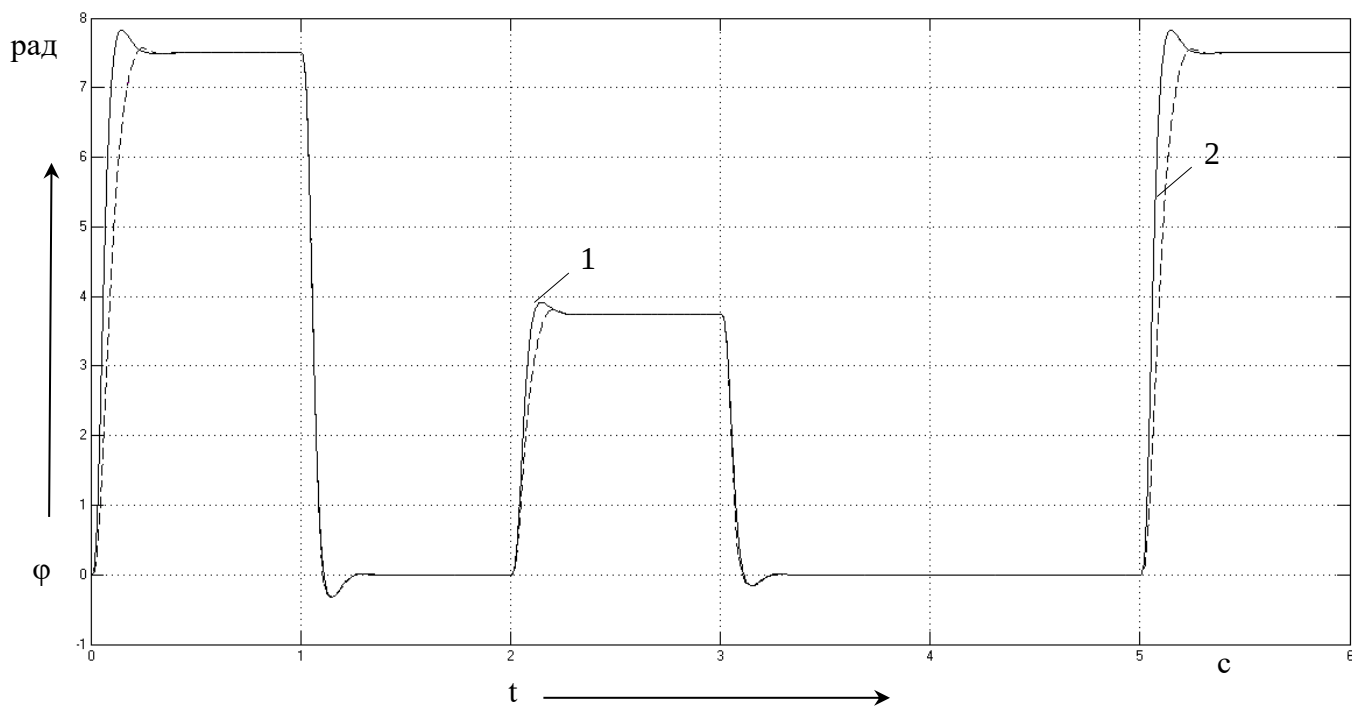
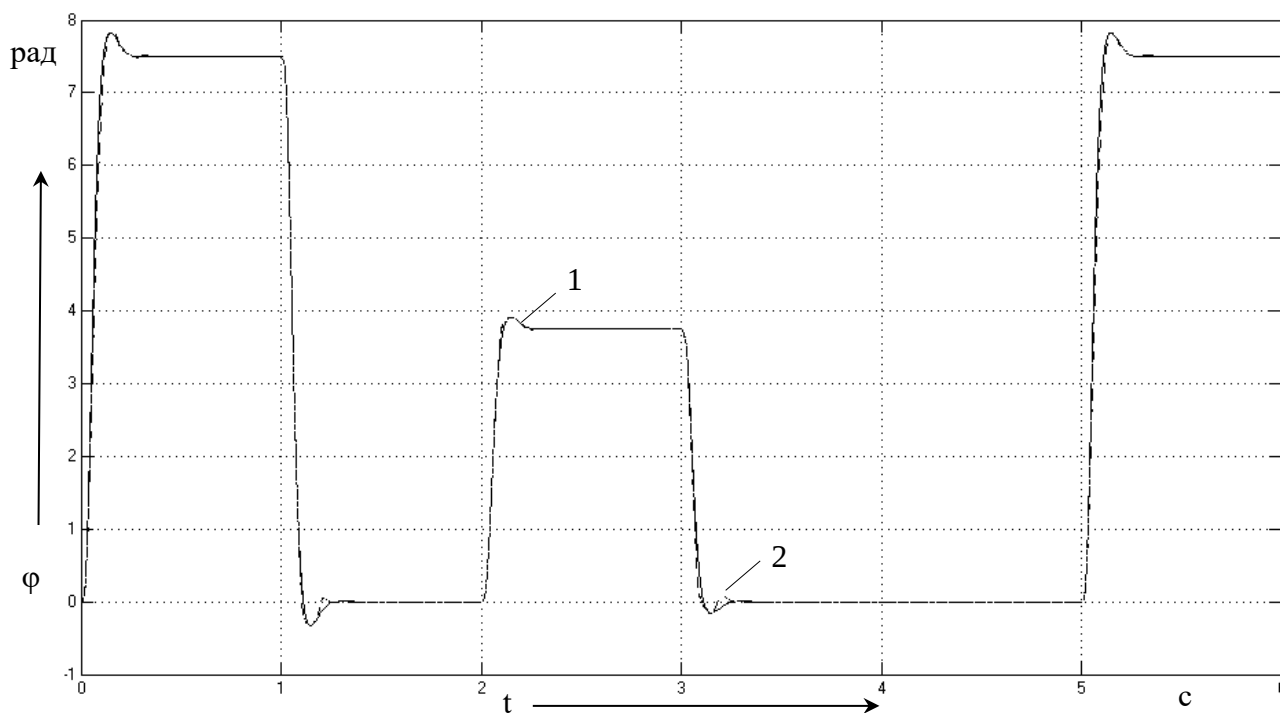


Рисунок 2.31 – Форма задающего сигнала системы



1 - классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП

Рисунок 2.32 – Динамические характеристики классической и интеллектуальной двухкаскадной СУЭП с комбинацией механизмов выводов Сугено-Мамдани при подаче разноуровневого ступенчатого задающего сигнала



1 - классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП

Рисунок 2.33 – Динамические характеристики классической и интеллектуальной двухкаскадной СУЭП с комбинацией механизмов выводов Мамдани при подаче разноуровневого ступенчатого задающего сигнала

В результате синтеза классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП постоянного тока были получены выходные характеристики, описывающие поведение системы при подаче разноуровневого ступенчатого задающего воздействия: на рисунке 2.32 МНЛР, функционирующего на основе сочетания механизмов нечеткого логического вывода Сугено-Мамадни, а на рисунке 2.33 МНЛР, функционирующего на основе сочетания механизмов нечеткого логического вывода Мамадни-Мамдани.

Сравнительный анализ переходных характеристик МНСУЭП постоянного тока с различными комбинациями механизмов нечетких выводов в МНЛР позволяет оценить основные показатели качества регулирования. ИСУЭП с МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамадни обладает минимальным отклонением от заданного уровня по сравнению с ИСУЭП, функционирующей на базе двухкаскадного регулятора с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Мамадни-Мамадни. Кроме того ИСУЭП с алгоритмом вывода Сугено во внешнем каскаде обладает лучшими показателями по быстродействию относительно МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамадни-Мамдани.

На рисунках 2.34 и 2.35 для наглядности отображено функционирование МНЛР по каждому каналу, формируемому элементами внутреннего каскада.

В ходе анализа динамических характеристик, полученных на выходе МНЛР с комбинацией алгоритмой нечетких логических выводов Сугено-Мамдани (рисунок 2.34), было отмечено, что ключевую роль в формировании управляющего воздействия на объект регулирования осуществляет нечеткий регулятор («mam1»), расположенный в среднем канале МНЛР, в то время как верхний («mam2») и нижний («mam3») НЛР выполняют функцию поддержания заданного уровня выходной характеристики и плавного переключения между различными уровнями ступенчатого сигнала.



Рисунок 2.34 – Переходные характеристики, формирующие итоговый закон управления для МНСУЭП постоянного тока с комбинацией алгоритмов выводов Сугено-Мамдани



Рисунок 2.35 – Переходные характеристики, формирующие итоговый закон управления для МНСУЭП постоянного тока с комбинацией алгоритмов выводов Мамадни-Мамдани

При настройке МНСУЭП с комбинацией алгоритмов выводов Мамдани-Мамдани наблюдается несколько иная реакция на существенные изменения входного сигнала. В моменты времени 1с, 2с, 3с, 5с (рисунок 2.31) происходит резкое изменение частоты сигналов в каналах управления. Анализируя динамические характеристики, приведенные на рисунке 2.35 (б), можно отметить, что главную функцию при формировании общего закона регулирования осуществляет элементарный нечеткий модуль «mam1», т.к. амплитуда этого сигнала является максимальной, а остальные регуляторы (рисунок 2.35 (а), (в)) включаются в отдельные моменты времени для коррекции переходного процесса [51].

Сравнительный анализ динамических характеристик МНСУЭП постоянного тока, построенных с различным сочетанием нечетких выводов, показал, что на формирование итогового закона регулирования оказывает влияние либо изменение амплитуды, либо повышение частоты на выходе одного из модулей. В МНЛР с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани управляющее воздействие формируется за счет изменения амплитуды сигнала. В свою очередь при комбинации алгоритмов выводов Мамдани-Мамдани наибольшее влияние на итоговый закон управления оказало изменение частоты в одном из каналов ИСУЭП.

Выводы по второй главе

1. Проведен анализ классических подходов по решению задач управления с использованием теории мягких вычислений (теории нечетких множеств) на примере электропривода постоянного тока. Выявлены достоинства и недостатки использования стандартных моделей нечетких систем электроприводов.

2. Предложен подход построения многокаскадного нечеткого логического регулятора, обеспечивающий улучшение основных показателей качества управления технологическим процессом.

3. Разработаны математическое описание и алгоритм функционирования многокаскадного нечеткого логического регулятора.

4. На основании полученных в результате моделирования динамических характеристик проведен анализ эффективности работы многокаскадной нечеткой СУЭП путем оценки реакции системы на нестационарность параметров тиристорного преобразователя при изменении его коэффициентов в широком диапазоне и при подаче сложного сигнала с различными уровнями порогового значения.

5. Проведенный анализ позволил сформулировать методику настройки многокаскадных нечетких логических регуляторов:

- формирование требований к законам управления с учетом особенностей функционирования СУЭП;
- определение количества информационных входов и формы сигналов на них;
- выбор сочетания механизмов выводов и, как следствие, структурных решений;
- определение количества вложенных модулей и алгоритмов нечетких выводов в них;
- определение направлений (алгоритмов) возможного расширения МНЛР с учетом состояния и режимов работы СУЭП.

Глава 3. Моделирование двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при различных режимах работы

3.1 Синтез стандартной системы управления постоянного тока с двухзонным регулированием скорости

Интеллектуальные системы управления и принятия решений в настоящее время получили широкое распространение. Проектирование ИСУЭП с применением мягких вычислений представляет собой проблему, не поддающуюся алгоритмизации. Нечеткое моделирование оказывается особенно удобным, когда при описании технических систем присутствует некоторая неопределенность, которая существенно затрудняет применение точных количественных методов. В большинстве СУЭП достаточно трудно обеспечить полную наблюдаемость объекта управления. Также для таких СУЭП весьма сложно получить полное математическое описание объекта, что приводит к необходимости принимать существенное количество допущений, которое в значительной степени приводит к снижению точности работы.

В таких проблемных ситуациях ИСУЭП на базе нечеткой логики дают более адекватные результаты по сравнению с классическими подходами без существенной потери качества управления. Синтез НЛР может осуществляться на основе общих представлений эксперта или специалиста о поведении системы. На сегодняшний день системы электроприводов, построенные на принципах нечеткой логики, находят свое применение во многих сферах человеческой деятельности и области их использования постоянно расширяются [74-76].

При решении задач комплексной автоматизации производства классическими объектами управления выступают электропривода постоянного и переменного тока. Но, несмотря на обширный спектр достоинств, а также соответствие предъявляемым требованиям таких объектов регулирования, существует и ряд недостатков. Многие факторы сдерживают модернизацию таких электроприводов.

Рисунок 3.1 – Имитационная модель системы управления с двухзонным регулированием скорости

Графики задающих сигналов в режиме до номинальной скорости приведены на рисунках 3.2 и 3.3. Напряжение в 3.5 Вольт соответствует номинальной скорости.

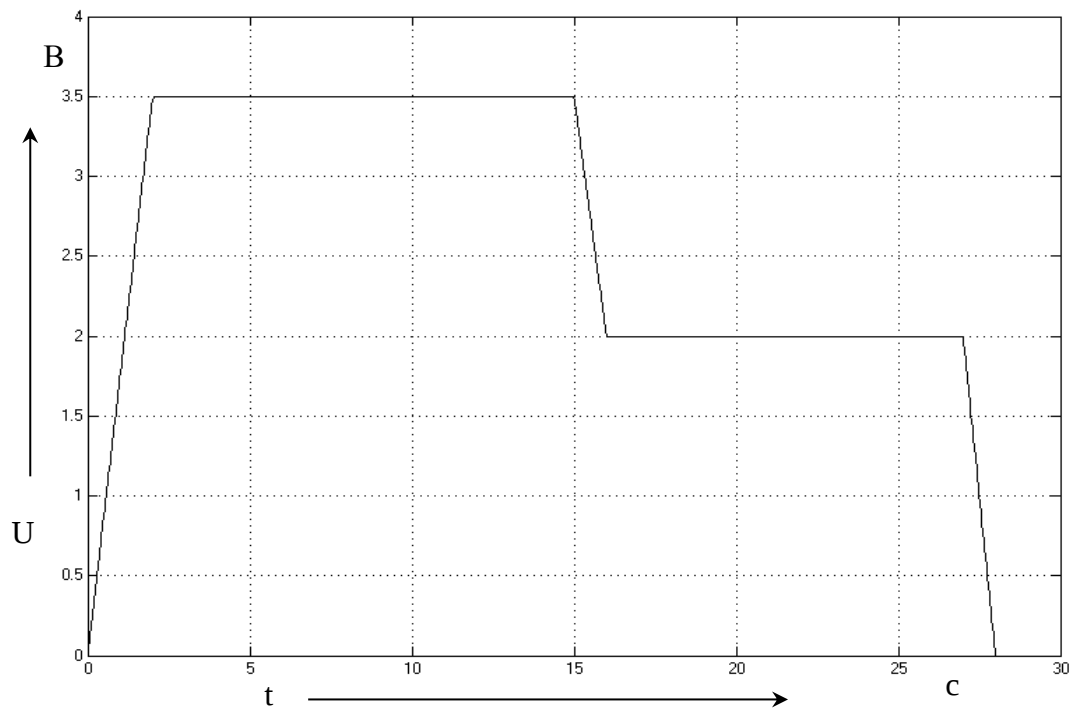


Рисунок 3.2 – Форма задающего сигнала в режиме «до номинальной скорости»

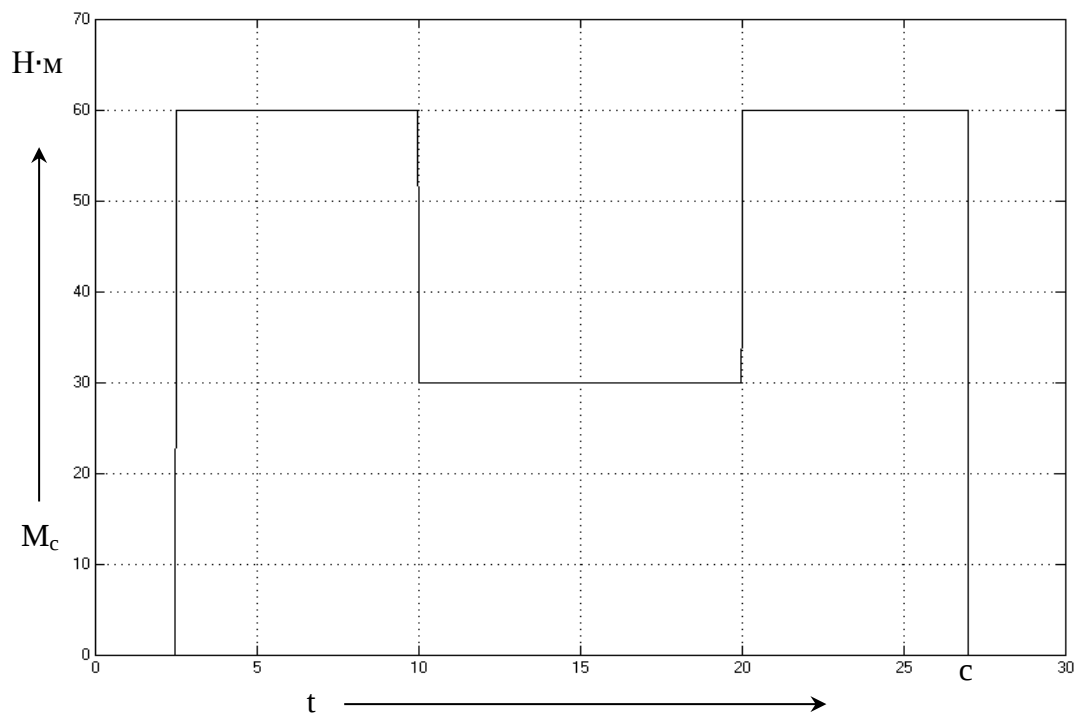


Рисунок 3.3 – График задаваемого момента в режиме «до номинальной скорости»

Графики задающих сигналов в режиме выше номинальной скорости приведены на рисунках 3.4 и 3.5.

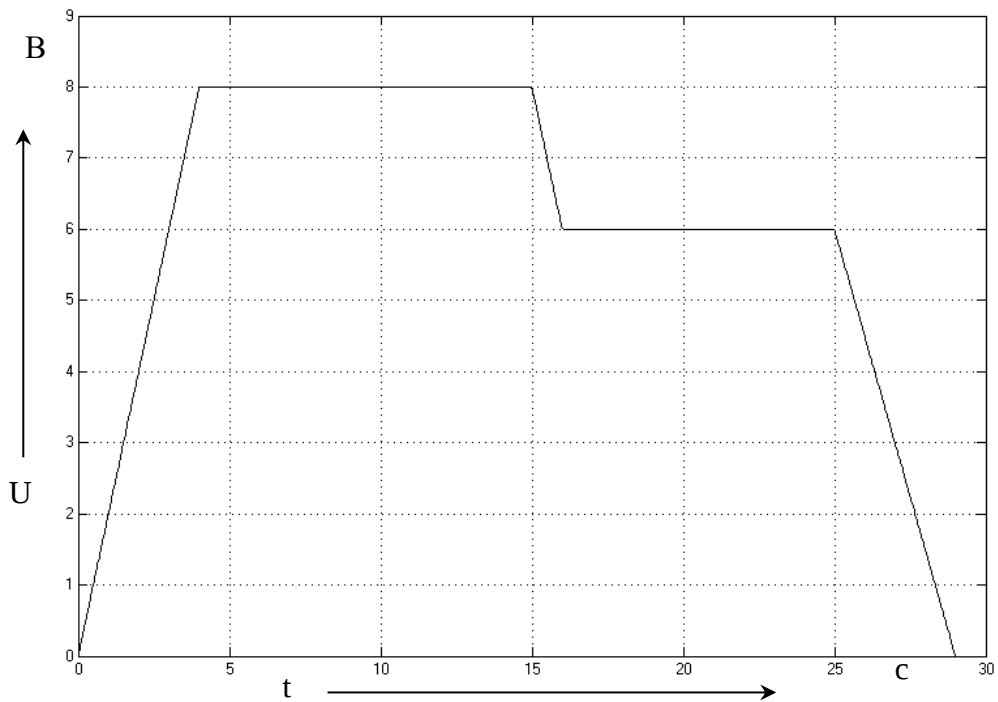


Рисунок 3.4 – Форма задания скорости в режиме «сверх номинальной скорости»

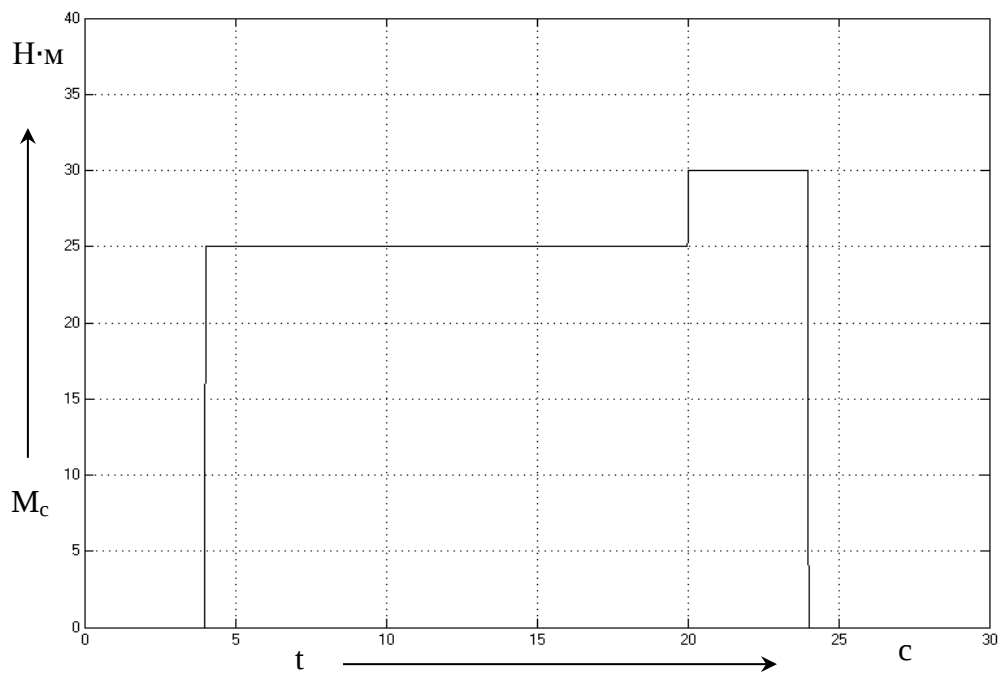


Рисунок 3.5 – График задаваемого момента в режиме «сверх номинальной скорости»

3.2 Моделирование многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом с двухзонным регулированием скорости с комбинацией алгоритмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани

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

Известно, что при наличии нелинейностей либо в самом объекте регулирования, либо в каналах управления применение традиционного подхода вызывает затруднения при обеспечении желаемой траектории движения. Прямая замена классического регулятора на НЛР не обеспечивает существенно улучшения динамики системы. Основными целями задачи управления являются как ослабление влияния нестационарных параметров процесса на выходную величину, так и снижение неточности регулирования, обусловленной существенным количеством допущений и ограничений. Внедрение в систему МНЛР позволит за счет некоторого усложнения структурной реализации согласовать параметры НЛР, синтезированных для работы в режимах «до номинальной скорости» и «выше номинальной скорости». Кроме того в задачу синтеза входит не только определение параметров и количество функций принадлежности, но и формирование рационального алгоритма переключения между режимами функционирования объекта: внешний каскад МНЛР реализуется как классификатор, оценивающий входную информацию и осуществляющий выбор соответствующего элемента вложенного каскада, который формирует итоговое управляющее воздействие МНЛР [77-84, 100].

На основе классического математического описания СУЭП с двухзонным регулированием скорости, объект управления которого характеризуется наличием существенных нелинейностей, был синтезирован МНЛР в контуре управления скоростью. Структурная схема такой системы приведена на рисунке 3.6.

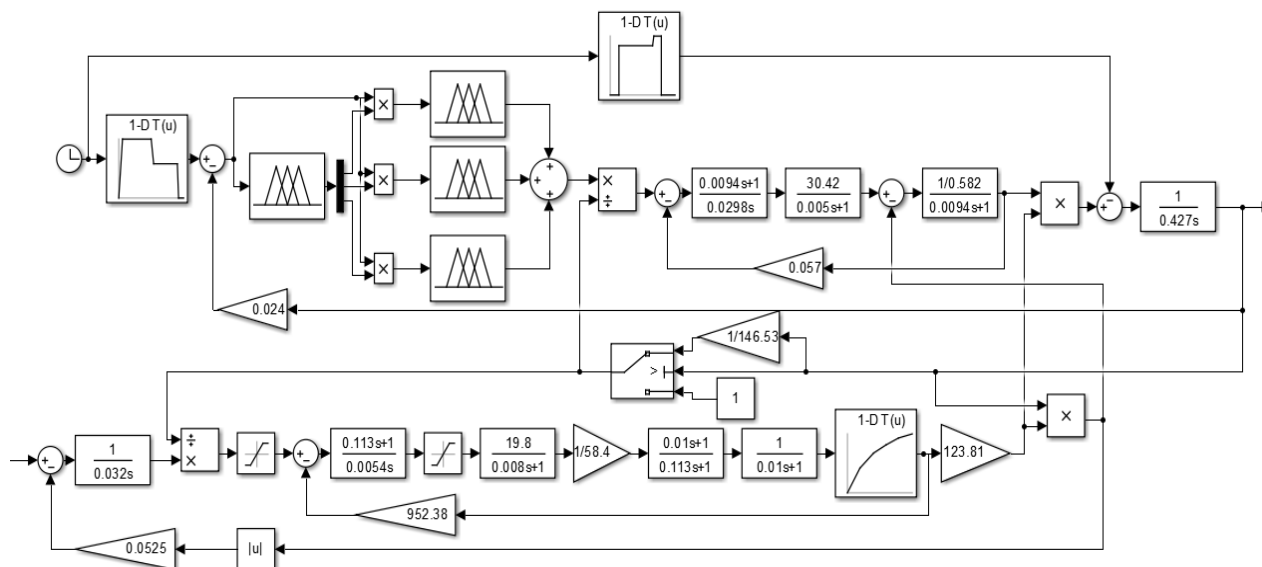


Рисунок 3.6 – Структурная схема МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

Возможным путем устранения последствий наличия нелинейностей в СУЭП с двухзонным регулированием скорости является внедрение в такую систему двухкаскадного нечеткого модуля, использующего в своей основе алгоритмы вывода Сугено и Мамдани соответственно. Такой выбор объясняется, прежде всего, необходимостью структурной реализации нечеткой экспертной системы, сложностью согласования НЛР в первом и втором каскадах, а также отличием диапазонов информационных входных сигналов. Внешний каскад формируется НЛР с механизмом логического вывода Сугено первого порядка и оценивает входную информацию, осуществляя при этом выбор соответствующего элемента внутреннего каскада. В свою очередь второй каскад состоит из набора простейших нечетких модулей с алгоритмом логического вывода Мамдани и формирует итоговое управляющее воздействие МНЛР.

Настройка двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости осуществляется по

предложенной ранее методике. В качестве интеллектуального модуля первого каскада будет выступать НЛР «sugenol», функциональная схема которого представлена на рисунке 2.16, с единственной входной лингвистической переменной input1 в блоке фаззификации и тремя информационными выходными каналами output1, output2 и output3 в блоке дефаззификации. Функционирование интеллектуального модуля «sugenol» осуществляется с применением нечеткого логического вывода Сугено. Диапазон изменения входных функций принадлежности нечеткой переменной для системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости отличается от ранее рассмотренных объектов и составляет $[-0,47; 0,46]$. В области определения распределены три трапецевидные функции принадлежности, приведенные на рисунке 2.17.

Информационные сигналы output1, output2 и output3 описывают понятия выходных воздействий интеллектуального модуля «sugenol» соответственно. С учетом выбранного механизма вывода в блоке дефаззификации формируются две постоянные величины 0 и 1.

Продукционные правила базы знаний НЛР «sugenol» имеют следующий вид:

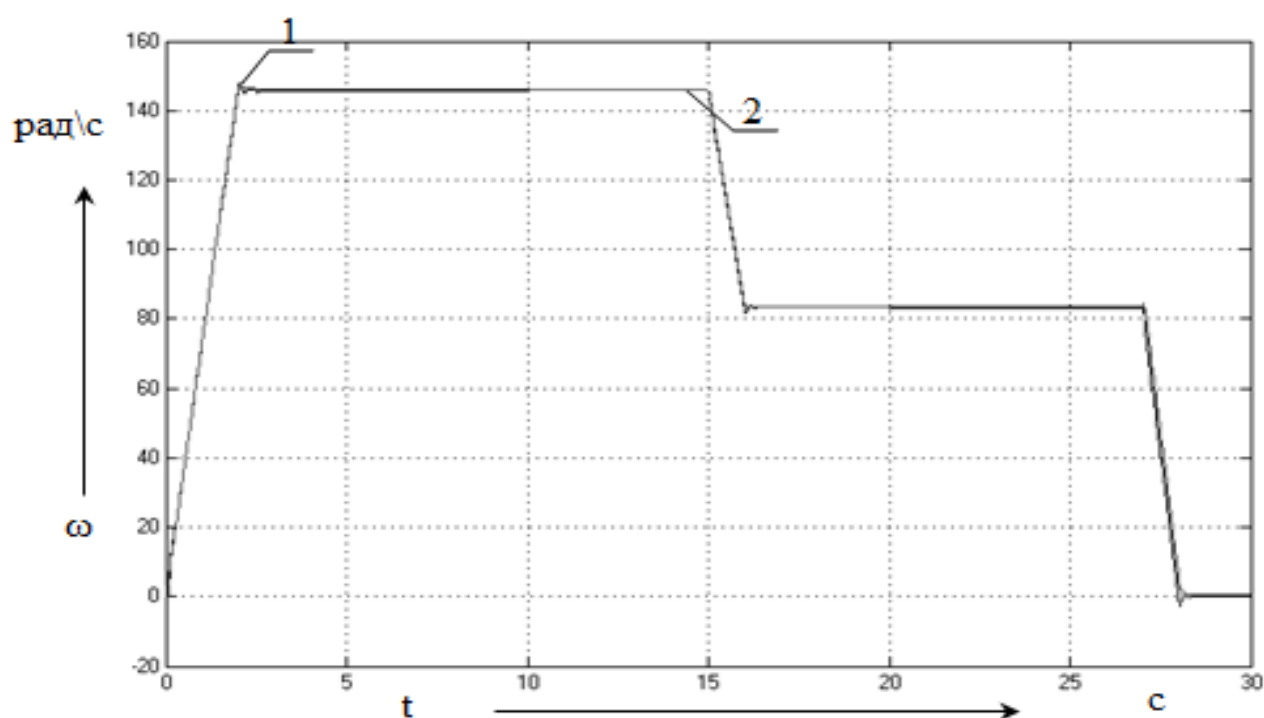
1. If (input1 is «Z») then (output1 = 0), (output2= 1), (output3= 0);
2. If (input1 is «P») then (output1 = 1), (output2= 0), (output3= 0);
3. If (input1 is «BP») then (output1 = 0), (output2= 0), (output3= 1).

Вложенный каскад состоит из трех простейших НЛР с алгоритмом вывода Мамдани («mam1», «mam2», «mam3»), два из которых формируют управляющий сигнал для состояния системы в режимах регулирования скорости «до номинальной» и «сверх номинальной», а третий НЛР осуществляет функцию дополнительного контроля при переходе между режимами. Основные настройки блоков фаззификации и дефаззификации, а также база правил остаются без изменений, но при этом меняется область действия выходных функций принадлежности лингвистических переменных, что отражено в таблице 3.1. Программная реализация МНЛР представлена в приложении В.

Таблица 3.1 – Параметры настройки простейших НЛР внутреннего каскада интеллектуального модуля

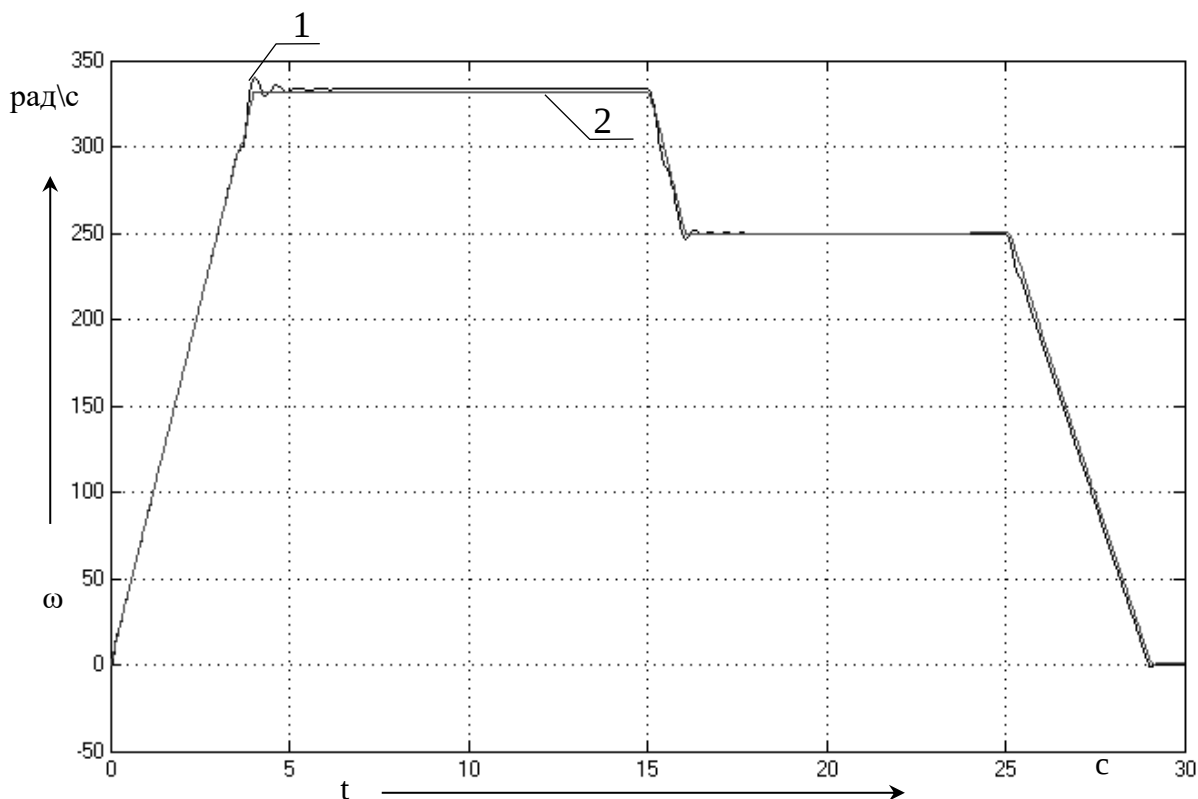
	Входной диапазон регулирования	Выходной диапазон регулирования	База знаний НЛР
mam1	[-0,17; 0,22]	[-7,4; 16,56]	1. If (input1 is «Z») then (output1 is «Z»); 2. If (input1 is «BP») then (output1 is «BP»); 3. If (input1 is «P») then (output1 is «BP»); 4. If (input1 is «N») then (output1 is «N»).
mam2 (-30%)	[-0,119; 0,154]	[-5,18; 11,592]	
mam3 (+30%)	[-0,221; 0,286]	[-9,62; 21,528]	

На основании предложенной методики был осуществлен синтез многокаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости [85], результаты которого отображают динамические характеристики, приведенные на рисунках 3.7 и 3.8.



1 – классическая СУЭП; 2 – двухкаскадная нечеткая СУЭП

Рисунок 3.7 – Динамические характеристики СУЭП с двухзонным регулированием скорости, настроенной на режим «до номинальной скорости»



1 — классическая СУЭП; 2 — двухкаскадная нечеткая СУЭП

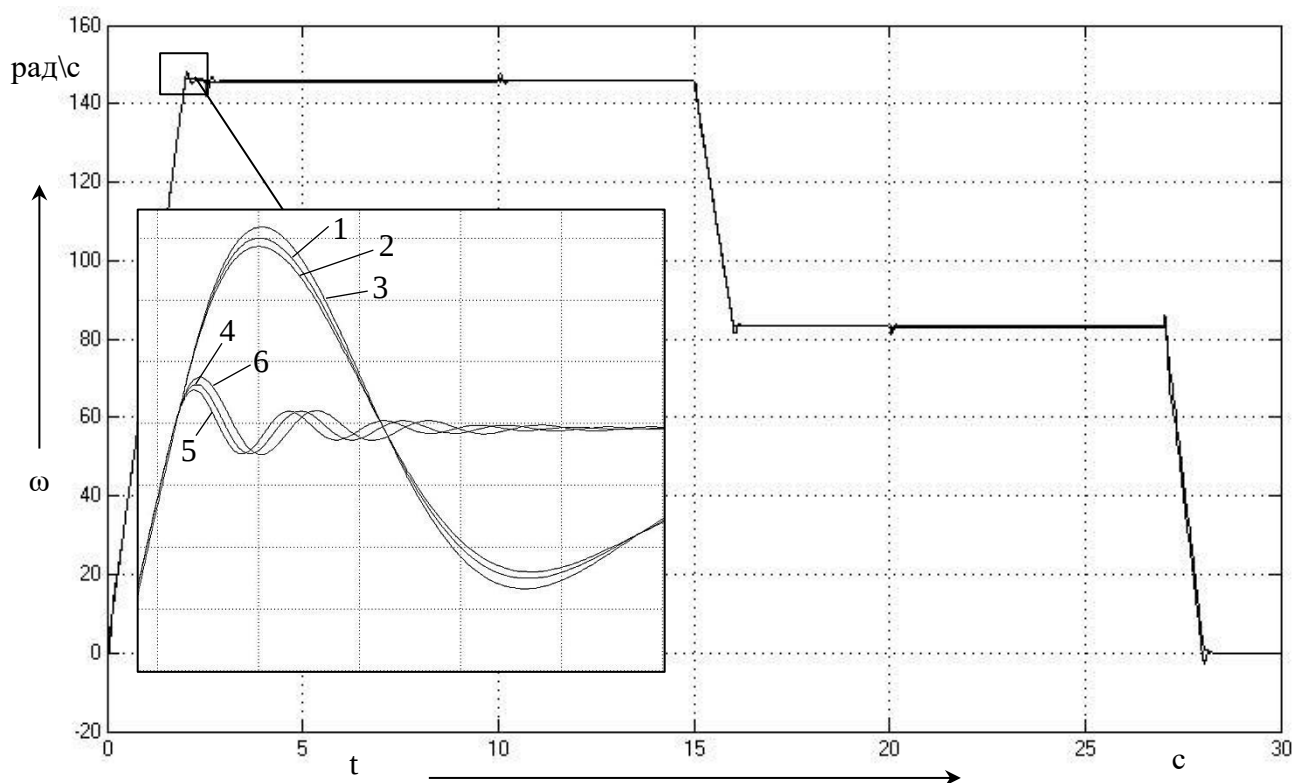
Рисунок 3.8 – Динамические характеристики СУЭП с двухзонным регулированием скорости, настроенной на режим «сверх номинальной скорости»

Анализ переходных характеристик, приведенных на рисунках 3.7 и 3.8, позволяет говорить о том, что благодаря внедрению в систему двухкаскадного НЛР удалось обеспечить устойчивый к возмущениям и качественный переходный процесс системы с отсутствующим перерегулированием.

Исследование работоспособности системы управления проводилось путем анализа реакции системы на отработку управляющего сигнала сложной формы при резко переменной нагрузке на валу двигателя. Путем изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в диапазоне от -15% до 15% от номинального значения, что отражено в таблице 3.2, был проведен анализ эффективности работы ИСУЭП [86-89].

Таблица 3.2 – Нестационарность коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в ИСУЭП с комбинацией алгоритмов нечеткого логического вывода Сугено-Мамдани (режим работы «до номинальной скорости»)

Диапазон изменения параметра, %	-15	0	+15
Значение K_p	25,857	30,42	34,983
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	148,089	147,998	147,930
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с МНЛР	146,875	146,813	146,773



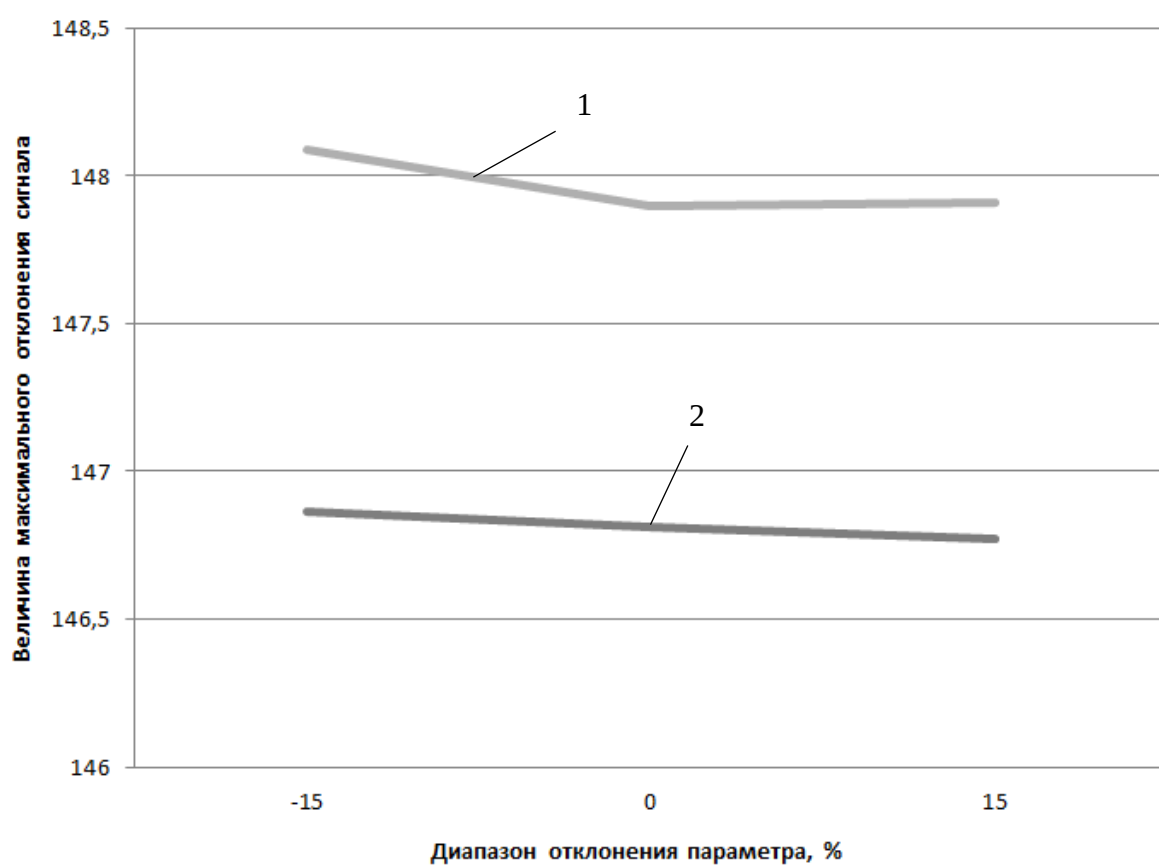
1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%; 4 – МНСУЭП; 5 – МНСУЭП +15%; 6 – МНСУЭП -15%

Рисунок 3.9 – Переходные характеристики классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости, функционирующей в режиме работы «до номинальной скорости»

Результаты реакции моделей классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости на отработку задающего воздействия при работе в режиме «до номинальной скорости» приведены на рисунке 3.9. Исходя из представленных результатов моделирования, можно сделать вывод, что полученная ИСУЭП двухзонного

регулирования обладает преимуществами по быстродействию и перерегулированию относительно классического варианта [108].

Диаграмма отклонения максимального значения выходного сигнала двухзонной СУЭП скорости в режиме «до номинальной» приведена на рисунке 3.10. Она наглядно отображает, что изменение коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в диапазоне $[-15\%; 15\%]$ от номинального значения оказывает наименьшее влияние на МНСУЭП по сравнению с классической СУЭП.



1 – СУЭП с классическим регулятором,

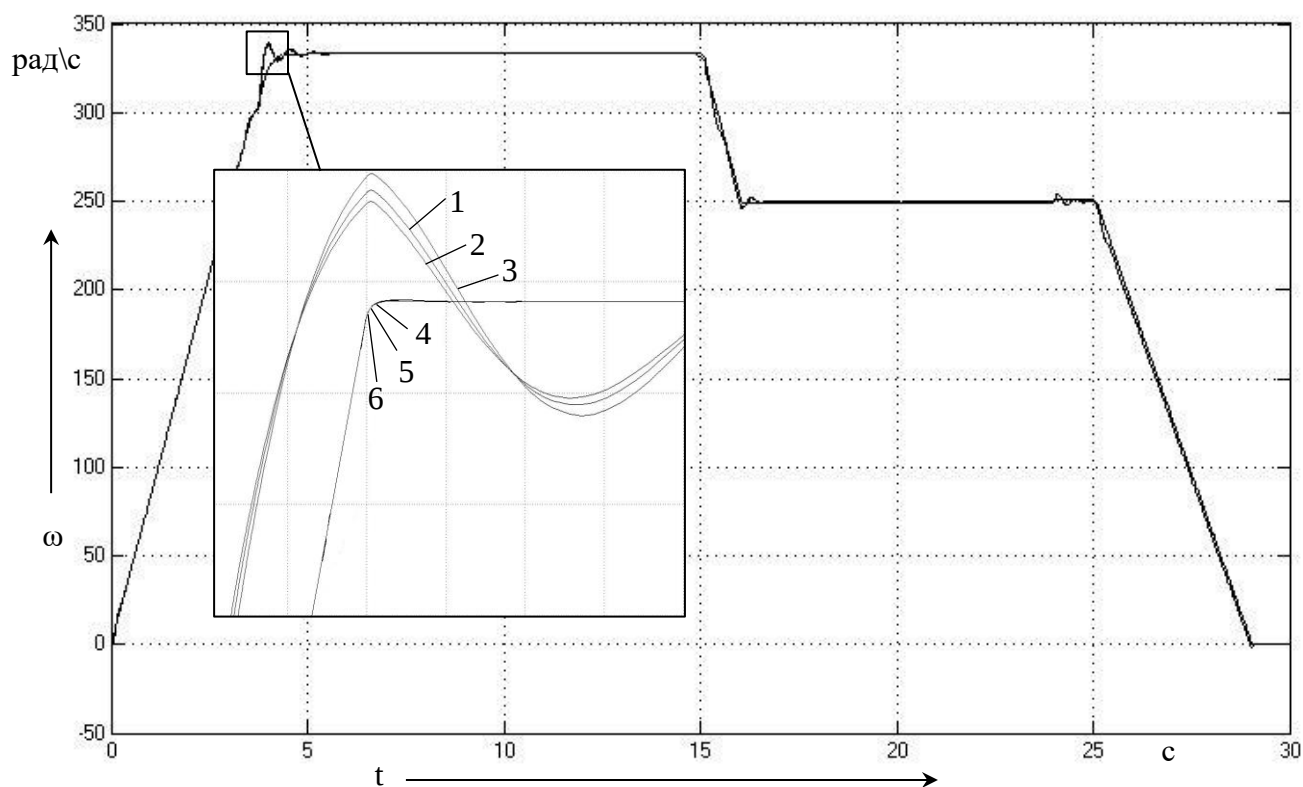
2 – МНСУЭП с сочетанием алгоритмов Сугено-Мамдани

Рисунок 3.10 – Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в широком диапазоне значений для системы в режиме «до номинальной скорости»

В таблице 3.3 приведена вариация коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи, на основании которой сформирована диаграмма отклонения максимальной величины выходного сигнала двухзонной СУЭП, работающей в режиме «сверх номинальной скорости» (рисунок 3.11).

Таблица 3.3 – Нестационарность коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в МНСУЭП постоянного ткоа с двухзонным регулированием скорости с комбинацией алгоритмов нечеткого логического вывода Сугено-Мамдани (режим работы «сверх номинальной скорости»)

Диапазон изменения параметра, %	-15	0	+15
Значение K_p	25,857	30,42	34,983
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	339,829	339,091	338,590
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с МНЛР	333,334	333,334	333,334

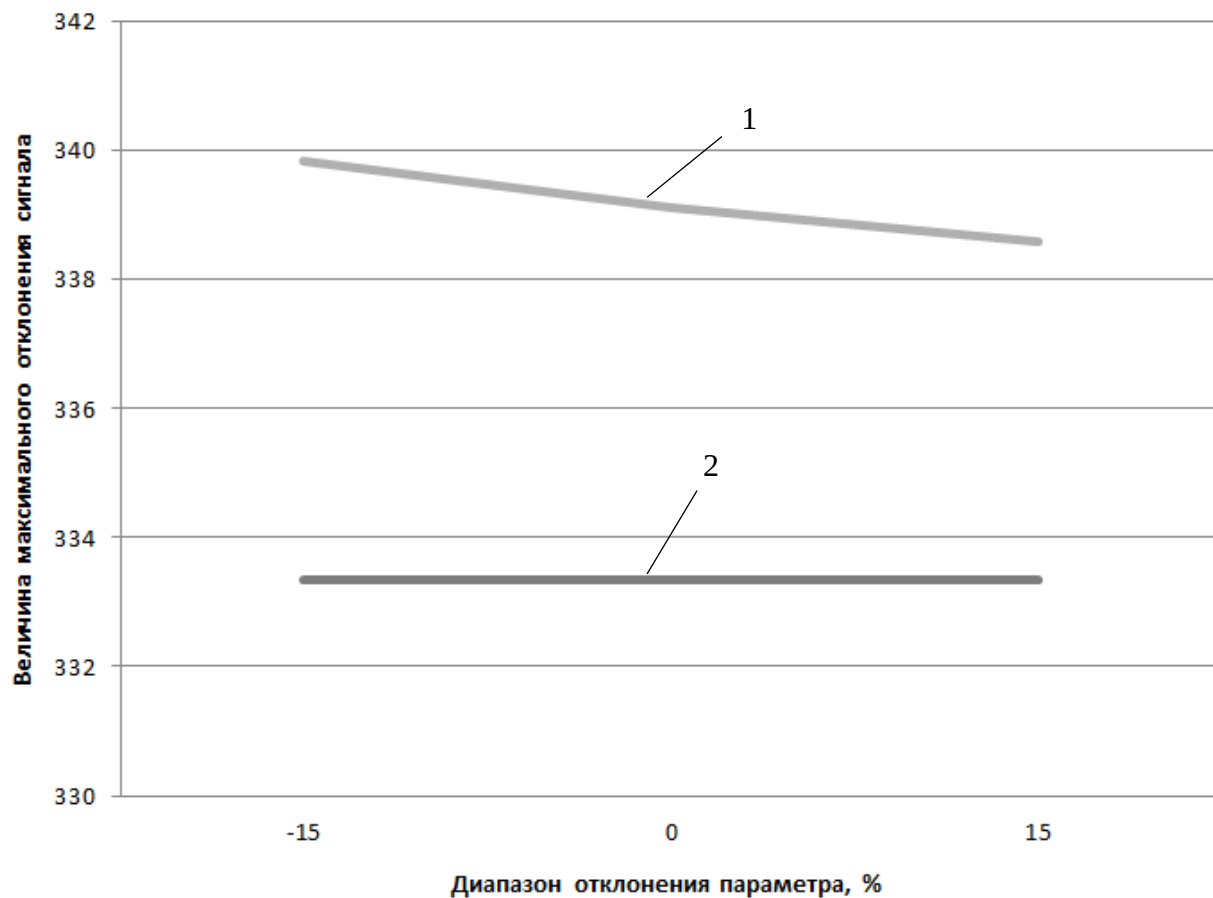


1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%; 4 – МНСУЭП; 5 – МНСУЭП +15%; 6 – МНСУЭП -15%

Рисунок 3.11 – Переходные характеристики классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости, функционирующей в режиме работы «выше номинальной скорости»

Согласно результатам моделирования нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при отработке задающего воздействия (рисунок 3.11) можно сделать вывод, что внедрение в систему интеллектуального регулятора, основанного на нечеткой логике, взамен классического аналога позволило добиться улучшения

стабильности протекания процесса – отсутствуют колебания, наблюдаемые на графике отработки угловой скорости с применением классического регулятора.



1 – СУЭП с классическим регулятором,

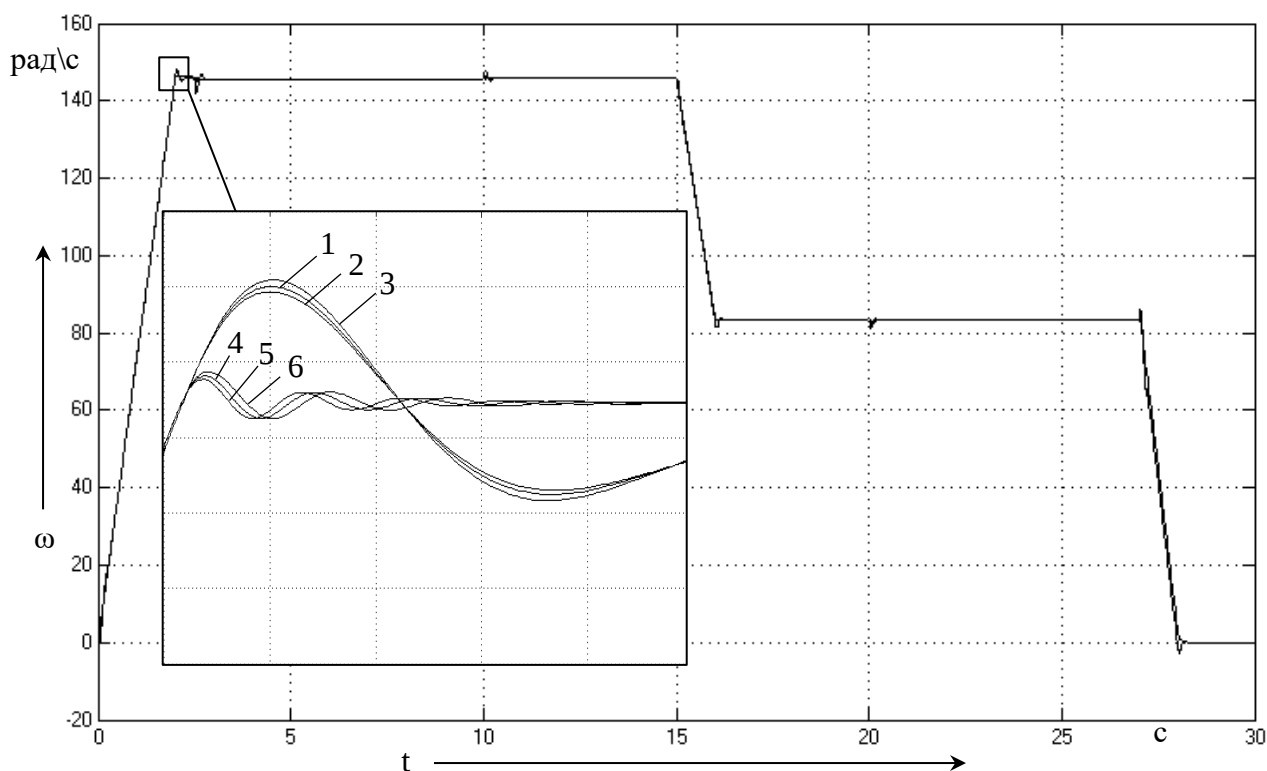
2 – МНСУЭП с сочетанием алгоритмов Сугено-Мамдани

Рисунок 3.12 – Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в широком диапазоне значений в режиме «сверх номинальной скорости»

Анализ диаграммы, приведенной на рисунке 3.12, позволяет сделать выводы, что изменение режимов работы будет приводить при классической настройке к появлению отклонения от заданной величины на 1,94%. При этом внедрение в СУЭП МНЛР позволит существенно снизить влияние изменения параметров объектов регулирования на качество переходных характеристик за счет повышения ее адаптивных свойств.

3.3 Моделирование двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом с двухзонным регулированием скорости с комбинацией механизмов нечетких выводов Мамдани-Мамдани

При замене механизма нечеткого вывода в первом каскаде МНЛР, а также структурной трансформации интеллектуального блока, был осуществлен синтез многокаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости с комбинацией механизмов нечеткого логического вывода Мамдани-Мамдани (рисунки 3.13 и 3.14). Отличительной особенностью при настройке такой двухкаскадной нечеткой СУЭП является изменение консеквентов правил в базе знаний и замена нечетких переменных в блоке дефаззификации НЛР внешнего каскада на постоянные коэффициенты [90-94, 111].



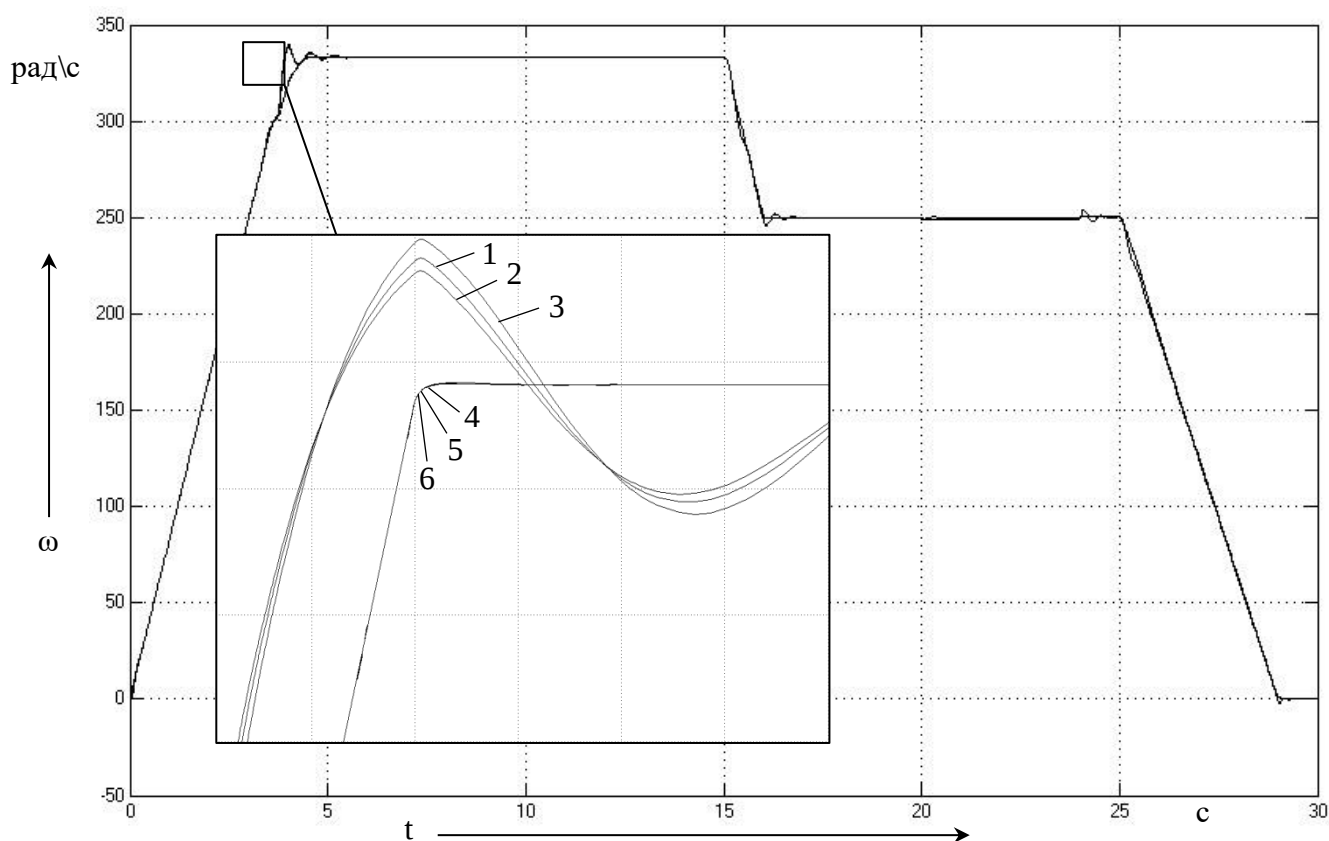
1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП +15%; 3 – классическая СУЭП -15%; 4 – МНСУЭП; 5 – МНСУЭП +15%; 6 – МНСУЭП -15%

Рисунок 3.13 – Динамические характеристики классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости, функционирующей в режиме работы «до номинальной скорости»

В результате синтеза многокаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости с комбинацией алгоритмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани были получены графики реакции системы при отработке входного

воздействия. Анализ семейства кривых, приведенных на рисунке 3.13, позволяет сделать вывод, что ИСУЭП, построенная по предложенной методике, достигает заданного уровня значительно быстрее классической, а также обладает меньшим значением перерегулирования.

Проверка эффективности предложенной методики осуществлялась таким же образом, как и для случая, где в основу функционирования внешнего регулятора МНСУЭП был заложен алгоритм вывода Сугено. В результате исследования были получены одинаковые графики для многокаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамадани и Мамдани-Мамдани, следовательно, таблица 4.2 и диаграмма, изображенная на рисунке 3.10, будут правомерны для обоих случаев.



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

Рисунок 3.14 – Динамические характеристики классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости, функционирующей в режиме работы «выше номинальной скорости»

Аналогичным образом был осуществлен синтез двухкаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости с комбинацией алгоритмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани при работе в режиме «сверх номинальной скорости», переходные характеристики которой приведены на рисунке 3.14 [95-97].

Кроме того, переходные характеристики многокаскадной нечеткой СУЭП с двухзонным регулированием скорости с комбинацией механизмов нечеткого вывода Сугено-Мамдани и Мамдани-Мамдани, функционирующих в режиме работы «выше номинальной скорости», совпадают, тогда и показатели качества переходного процесса (таблица 4.3) и диаграмма, построенная на основании этих данных, приведенная на рисунке 3.12, будут идентичными.

Анализ результатов моделирования МНСУЭП с двухзонным регулированием скорости указывает на правомерность применения методов мягкого вычисления при синтезе такой имитационной модели. Предложенная методика позволяет повысить свойства универсализма развитого НЛР путем увеличения числа простейших элементов вложенного каскада, при этом упрощает процедуры вывода, сокращает алгоритмическую сложность подобных регуляторов и увеличивает адаптивные свойства, а также повышает быстродействие системы в целом.

3.4 Анализ реакции системы электропривода на отработку задающего сигнала сложной формы

Путем подачи задающего сигнала сложной формы (рисунок 3.15) был осуществлен сравнительный анализ поведения системы электропривода с двухзонным регулированием скорости с различным сочетанием нечетких выводов при работе в режимах «до номинальной скорости» и «сверх номинальной скорости». Формирование управляющего воздействия на выходе МНЛР осуществляется путем суммирования составляющих вложенного каскада [98, 99, 117]. В результате синтеза многокаскадной нечеткой СУЭП с комбинацией

механизмов нечеткого вывода Сугено-Мамдани и Мамдани-Мамдани были получены динамические характеристики, приведенные на рисунках 3.16 и 3.17.

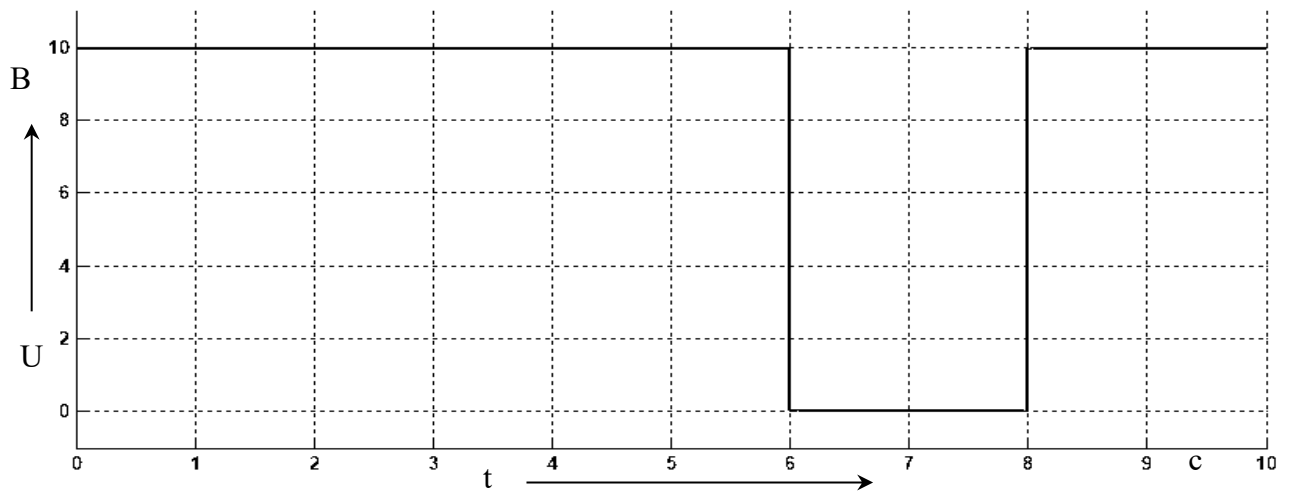
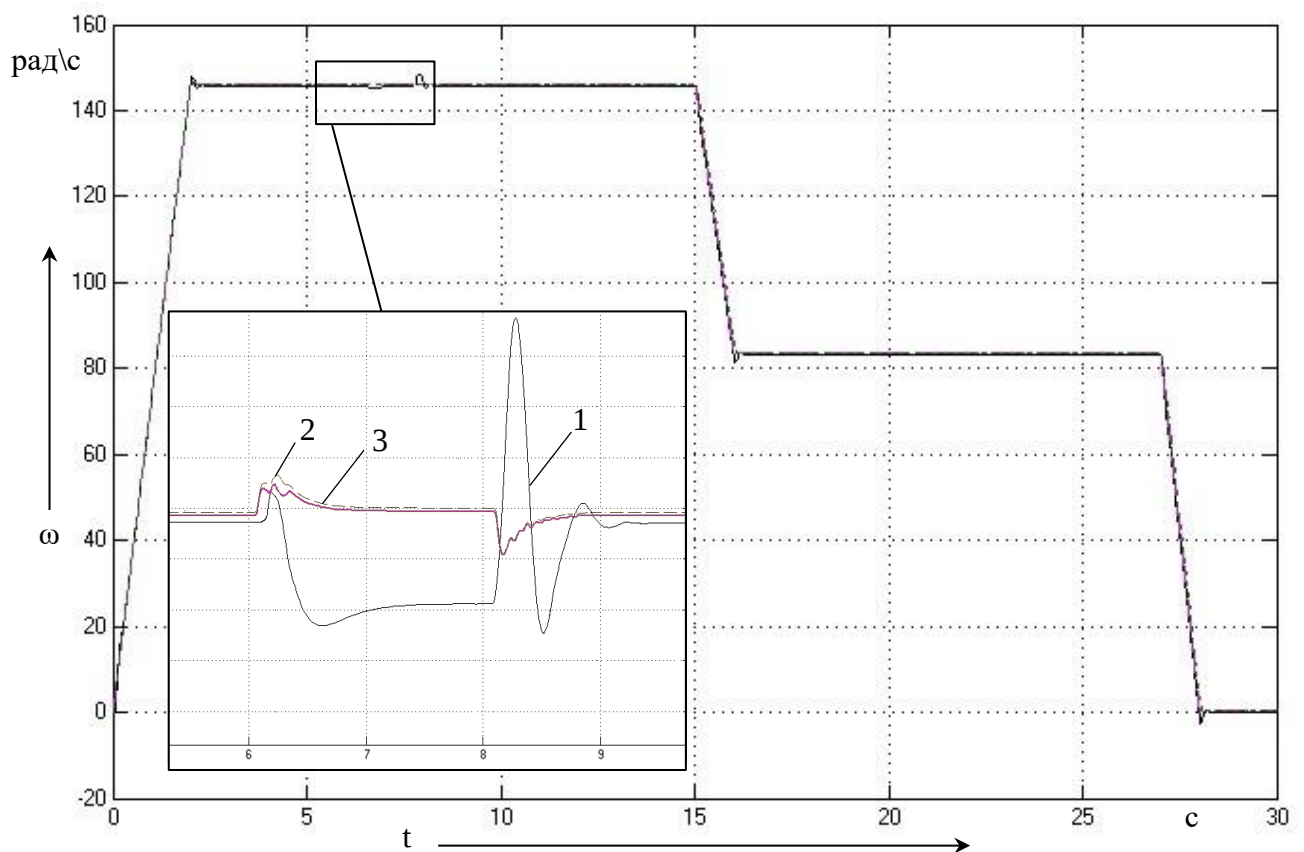


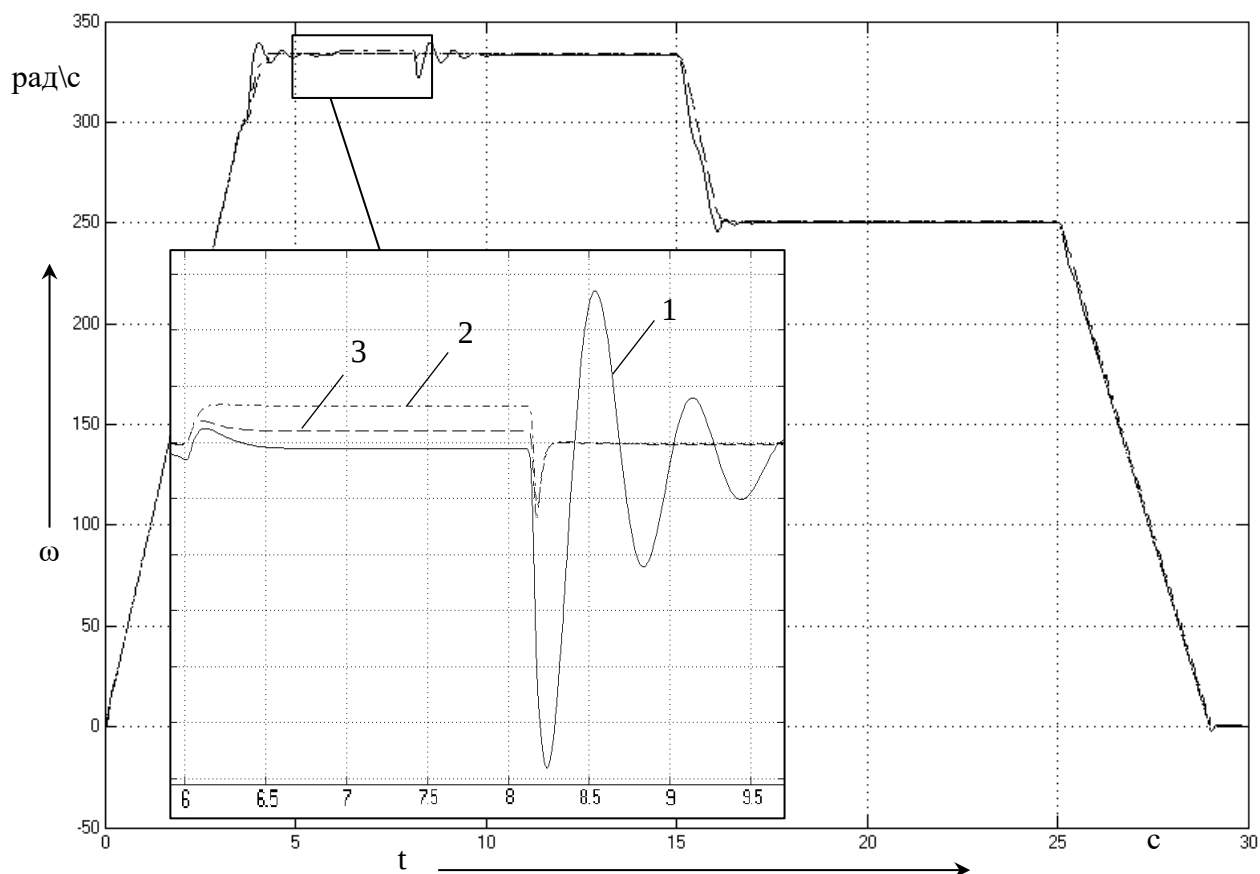
Рисунок 3.15 – Форма задающего сигнала СУЭП



1 – классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП с комбинацией механизмов нечеткого вывода Сугено-Мамдани, 3 – МНСУЭП с комбинацией механизмов нечеткого вывода Мамдани-Мамдани

Рисунок 3.16 – Динамические характеристики двухкаскадной нечеткой и классической СУЭП с двухзонным регулированием скорости при работе в режиме «до номинальной скорости» и подачи сложного ступенчатого задающего воздействия

Переходные характеристики двухзонной системы управления электрическим приводом, работающей в режиме «до номинальной скорости» (рисунок 3.16), позволяют выполнить оценку ключевых показателей качества регулирования при функционировании ИСУЭП с различным сочетанием алгоритмов выводов.



1 – система с классическим регулятором, 2 – МНСУЭП с комбинацией механизмов выводов Сугено-Мамдани, 3 – МНСУЭП с комбинацией механизмов выводов Мамдани-Мамдани

Рисунок 3.17 – Динамические характеристики двухкаскадной и классической системы с двухзонным регулированием скорости при работе в режиме «сверх номинальной скорости» и подачей сложного ступенчатого задающего воздействия

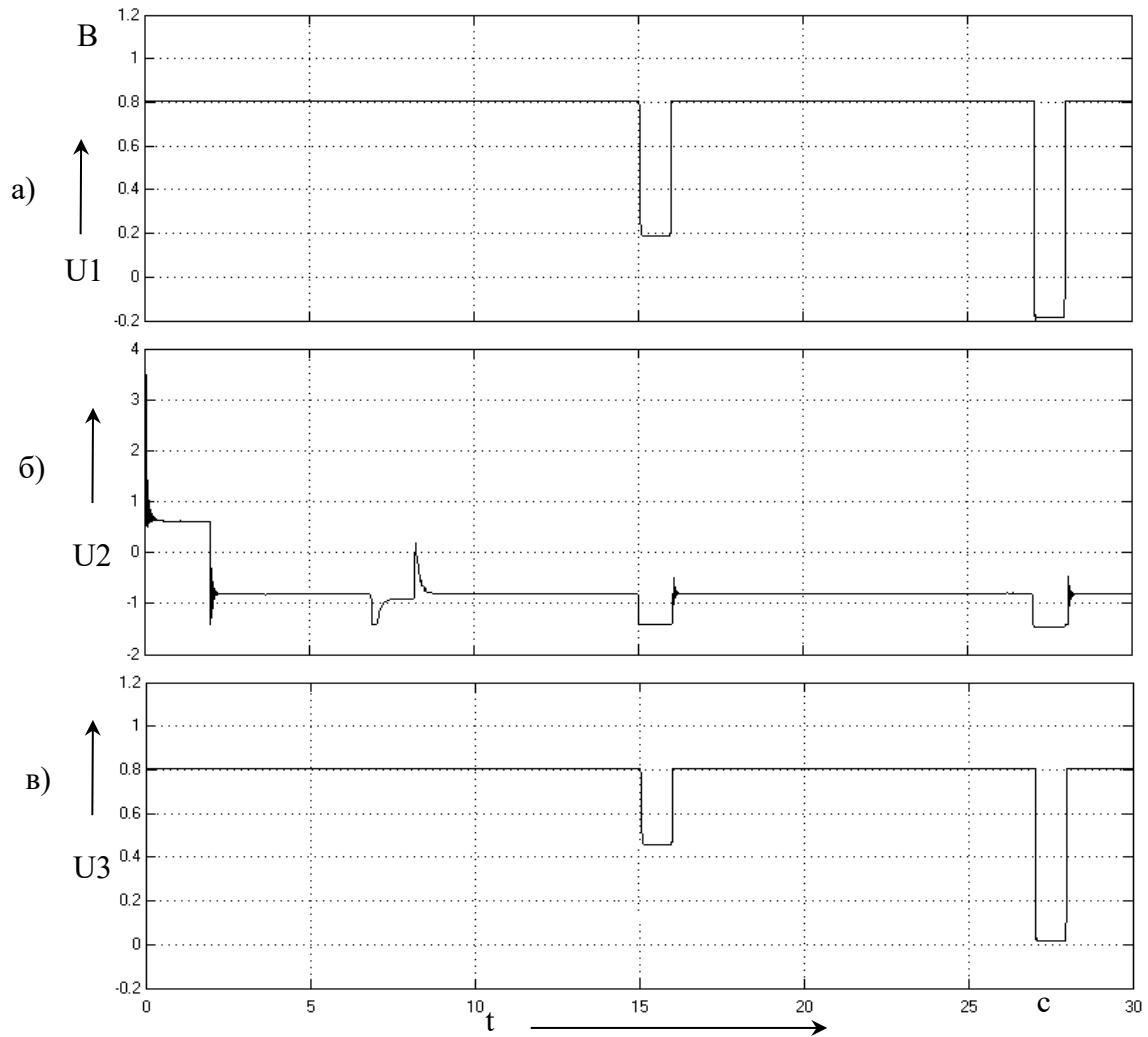
Двухкаскадная нечеткая СУЭП с комбинацией механизмов выводов Мамдани-Мамдани формирует выходной сигнал с меньшей величиной отклонения от заданного уровня при подаче ступенчатого воздействия на нее относительно интеллектуальной системы регулирования с альтернативной комбинацией механизмов выводов. Кроме того, обе ИСУЭП с внедренным в нее МНЛР, проявляют адаптивные свойства и обладают лучшими показателями по

быстродействию относительно классической СУЭП с двухзонным регулированием скорости.

В результате синтеза многокаскадных нечетких алгоритмов по предложенной методике было проведено исследование СУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости при работе в режиме «сверх номинальной», динамические характеристики которой приведены на рисунке 3.17.

Анализ переходных процессов интеллектуальной и классической системы электропривода, приведенных на рисунке 3.17, позволяет сделать вывод, что в результате подачи на вход системы сигнала ступенчатой формы (рисунок 3.15) двухкаскадная нечеткая СУЭП с комбинацией механизмов выводов Мамдани-Мамдани будет обладать меньшим отклонением от выходного уровня классически настроенной системы, в то время как МНСУЭП с комбинацией алгоритмов выводов Сугено-Мамдани формирует скачок больший по амплитуде. Кроме того следует отметить, что двухзонная система регулирования, настроенная классическим методом, по окончании действия задающего сигнала сложной формы дольше выходит на установившееся значение, тем самым увеличивая время регулирования системы в целом.

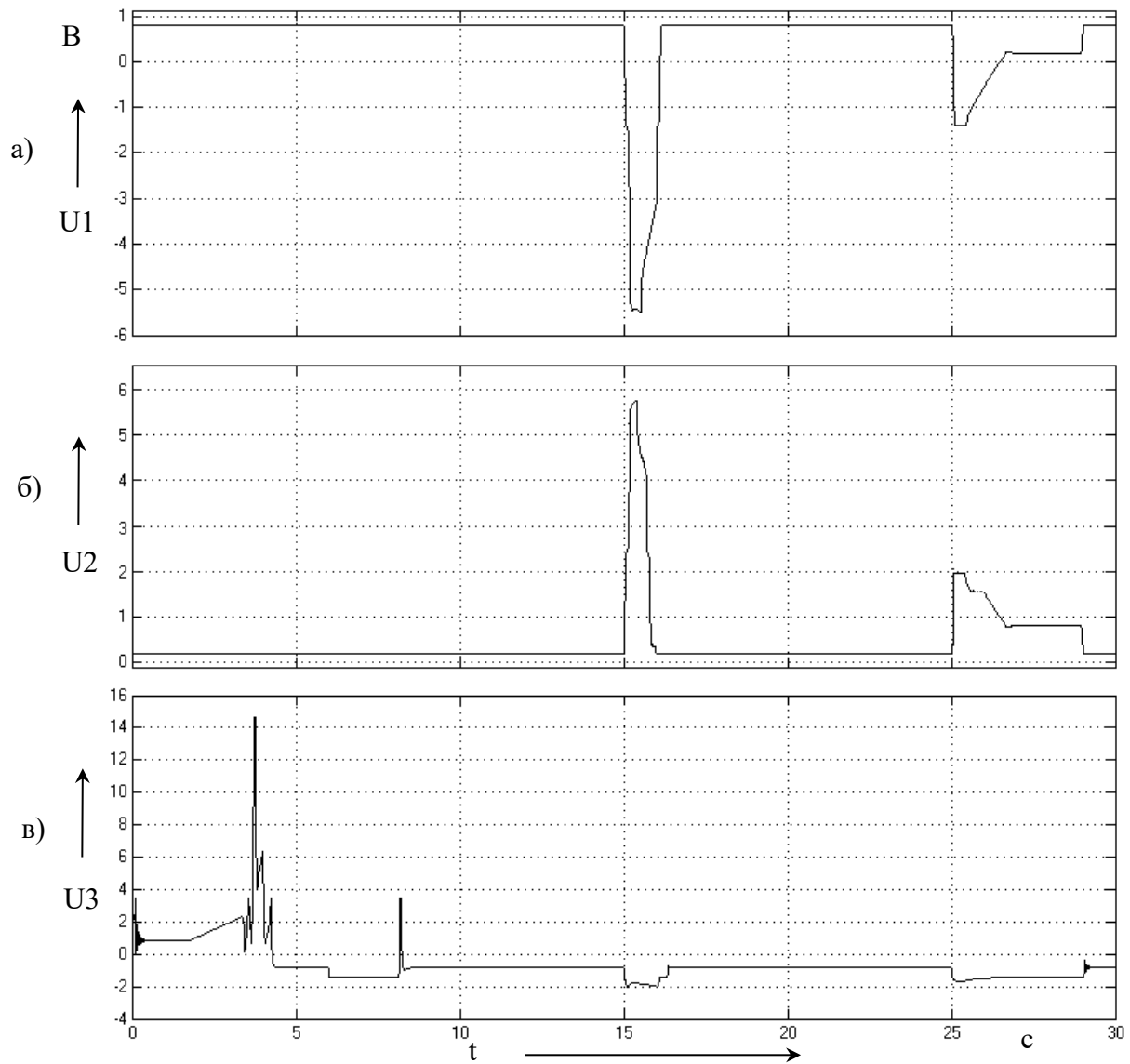
Динамические характеристики, формирующие итоговый сигнал управления на выходе МНЛР с комбинацией механизмов нечеткого вывода Сугено-Мамдани при работе системы с двухзонным регулированием скорости в режимах «до номинальной скорости» и «выше номинальной скорости», отображены на рисунках 3.18 и 3.19 соответственно.



а – НЛР «mam2», б - НЛР «mam1», в - НЛР «mam3»

Рисунок 3.18 – Динамические характеристики, формирующие итоговый закон управления для двухкаскадной нечеткой СУЭП с комбинацией механизмов вывода Сугено-Мамдани при работе в режиме «до номинальной скорости»

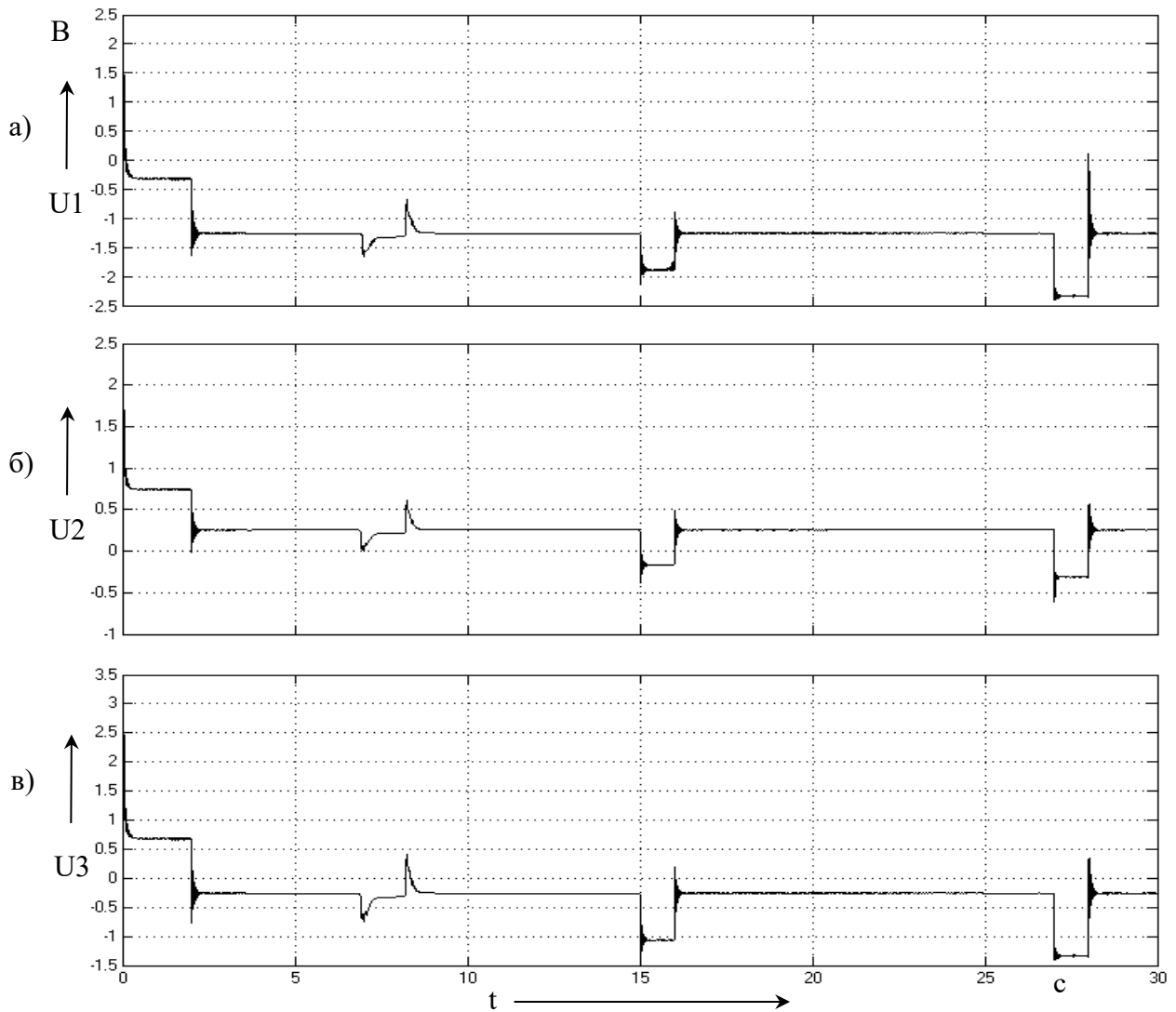
Анализ переходных характеристик, приведенных на рисунке 3.18, позволяет сделать следующие выводы: основную задачу формирования закона управления в МНСУ осуществляет НЛР «mam2», при этом НЛР «mam1» и «mam3» выполняют функцию стабилизации состояния переходного процесса системы электропривода при больших и малых значениях входного сигнала.



а – НЛР «mam2», б - НЛР «mam1», в - НЛР «mam3»

Рисунок 3.19 – Динамические характеристики, формирующие итоговый закон управления для двухкаскадной нечеткой СУЭП с комбинацией механизмов вывода Сугено-Мамдани при работе в режиме «выше номинальной скорости»

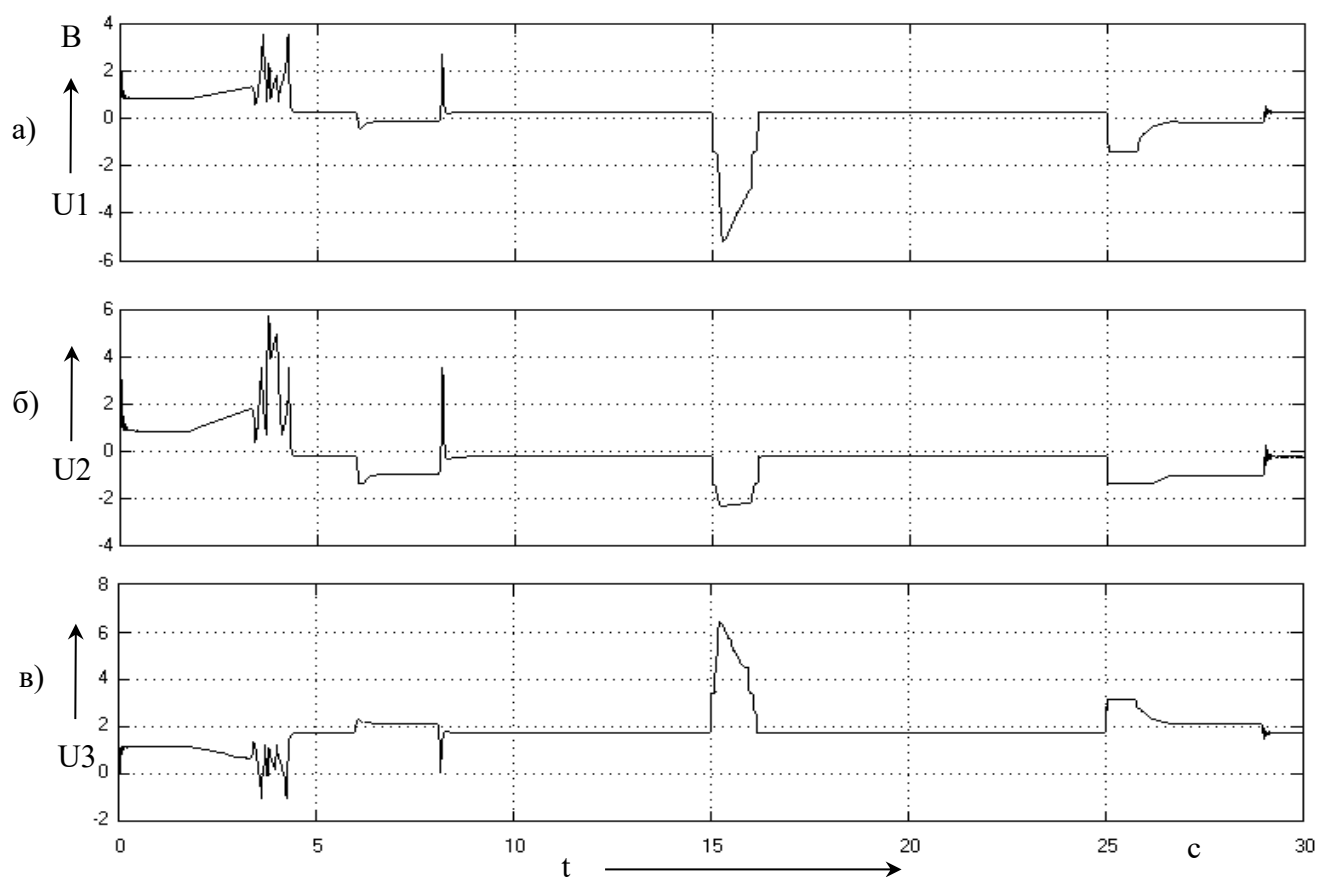
При переходе в режим работы «выше номинальной скорости» (рисунок 3.19) ключевым элементом, определяющим закон регулирования, является НЛР «mam3», а НЛР «mam2» и «mam1» реализуют свои управляющие функции в момент перехода системы из одного режима в другой.



а – НЛР «mam2», б - НЛР «mam1», в - НЛР «mam3»

Рисунок 3.20 – Динамические характеристики, формирующие итоговый закон управления для двухкаскадной нечеткой СУЭП с комбинацией механизмов вывода Мамдани-Мамдани при работе в режиме «до номинальной скорости»

Подобным образом был осуществлен синтез МНСУЭП с альтернативным сочетанием алгоритмов нечеткого вывода. Результаты моделирования приведены на рисунках 3.20 и 3.21. Необходимо отметить, что в обоих случаях все три НЛР формируют управляющий сигнал в моменты времени различных режимов работы электропривода.



а – НЛР «mam2», б - НЛР «mam1», в - НЛР «mam3»

Рисунок 3.21 – Динамические характеристики, формирующие итоговый закон управления для двухкаскадной нечеткой СУЭП с комбинацией механизмов вывода Мамдани-Мамдани при работе в режиме «выше номинальной скорости»

В результате анализа приведенного исследования можно сделать выводы, что применение механизма нечеткого вывода Мамдани в первом каскаде МНЛР позволяет получить адаптированные переходные характеристики в результате синтеза МНСУЭП постоянного тока с двухзонным регулированием скорости по предложенной методике. Необходимо отметить, что применение альтернативной комбинации алгоритмов нечеткого вывода Сугено-Мамдани позволяет получить соизмеримые результаты моделирования. Таким образом, анализ результатов моделирования ИСУЭП показал, что применение предложенной методики синтеза многокаскадных нечетких алгоритмов позволяет повысить основные показатели качества переходного процесса, что особенно явно наблюдается на участке подачи и съема задающего сигнала сложной формы.

Выводы по третьей главе

1. Получена модель МНСУЭП с двухзонным регулированием скорости, основанная на применении МНЛР с различным сочетанием алгоритмов вывода.
2. Проведено исследование работоспособности СУЭП путем анализа ее реакции на изменения коэффициента усиления тиристорного преобразователя якорной цепи в заданном диапазоне.
3. Проанализировано поведение МНСУЭП с двухзонным регулированием скорости с различным сочетанием нечетких выводов в режимах работы «до номинальной скорости» и «сверх номинальной скорости».

Глава 4. Моделирование многокаскадной нечеткой системы управления электроприводом переменного тока

В настоящее время к СУЭП предъявляются требования, отличные от классического и математического подхода. К ним же применяются свойства, которые определяются динамичностью системы электропривода, отсутствием формализуемой цели существования объекта, отсутствием желаемых характеристик и оптимальности, неполнотой информации об объекте управления. Поэтому возникает проблема с идентификацией и математическим описанием таких систем [52-53]. Нечеткое управление находит свое применение там, где традиционные методы малоэффективны или вовсе неприемлемы из-за отсутствия полного и точного знания об объекте регулирования.

Реализация законов управления в СУЭП с использованием интеллектуального подхода, основанного на теории нечетких множеств, зачастую ограничивается применением одного модуля, организованного на единственном алгоритме вывода. Типичным объектом управления для такого рода систем являются модели электроприводов переменного тока. НЛР в таких системах, как правило, моделирует ПИ или ПИД закон управления с учетом ряда дополнительных информационных каналов. В целом реализация ИСУЭП, содержащих элементы нечеткой логики, позволяет сформировать различные сложные законы регулирования, при этом существенно увеличивая алгоритмическую сложность основных блоков самого НЛР. К ограничивающим факторам можно отнести количество лингвистических переменных в блоках фаззификации и дефаззификации, объем продукционной базы правил, а также сложность при выборе механизма вывода и формы функций принадлежности. Кроме того, в случае выбора электропривода переменного тока в качестве объекта управления добавляется ряд дополнительных проблем, связанных с существенным количеством контуров регулирования, в том числе взаимосвязанных, а также существенный прядок объекта регулирования при его математическом описании.

Одним из возможных подходов к решению обозначенного выше перечня проблем является построение ИСУЭП с использованием МНЛР. При реализации общепринятых процедур управления, основанных на теории мягких вычислений, возникают сложности с реализацией адаптивных свойств таких систем. Сочетание различных алгоритмов нечеткого логического вывода позволяет решать задачи интеллектуального управления для многокритериальных и многофакторных задач. При этом различное сочетание таких нечетких выводов усиливает некоторые свойства СУЭП, например, робастность, многозадачность, совокупное управление в областях больших и малых сигналов и т.д. Реализация МНСУЭП базируется на использовании математической модели системы управления частотно-регулируемым электрическим приводом переменного тока (рисунок 4.1), широко освещенного в технической литературе [20]. Область применения электроприводов переменного тока достаточно велика: в промышленной автоматизации (конвейеры, насосы, компрессоры и краны), в лифтах и подъемном оборудовании, а также на водоочистных сооружениях и в системах отопления, вентиляции и кондиционирования.

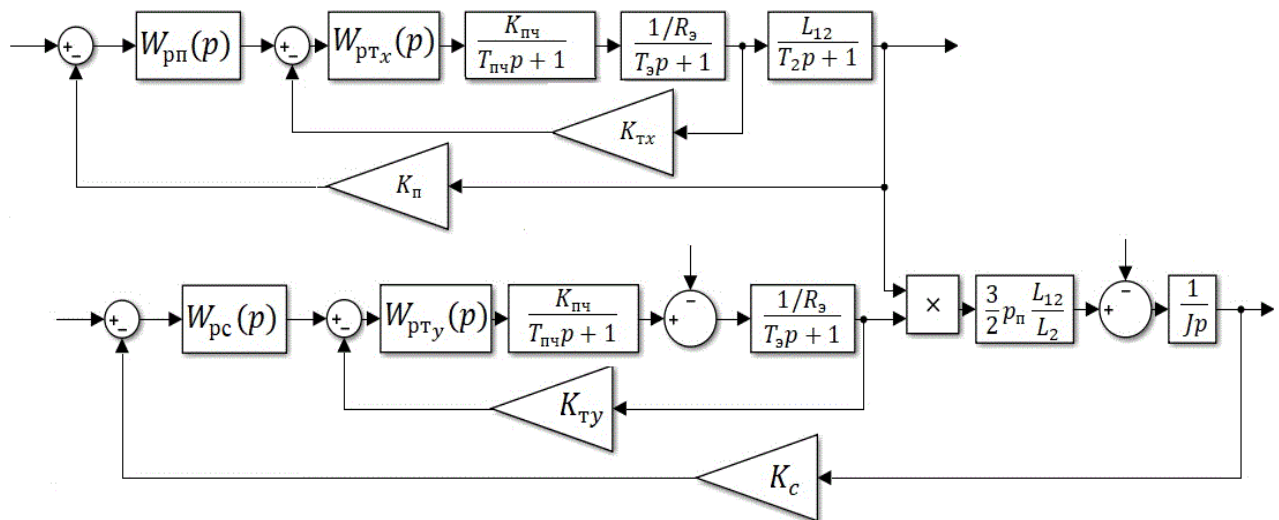


Рисунок 4.1 - Структурная схема системы электрического привода переменного тока

На рисунке 4.2 приведены результаты реакции системы электропривода переменного тока ступенчатое воздействие.

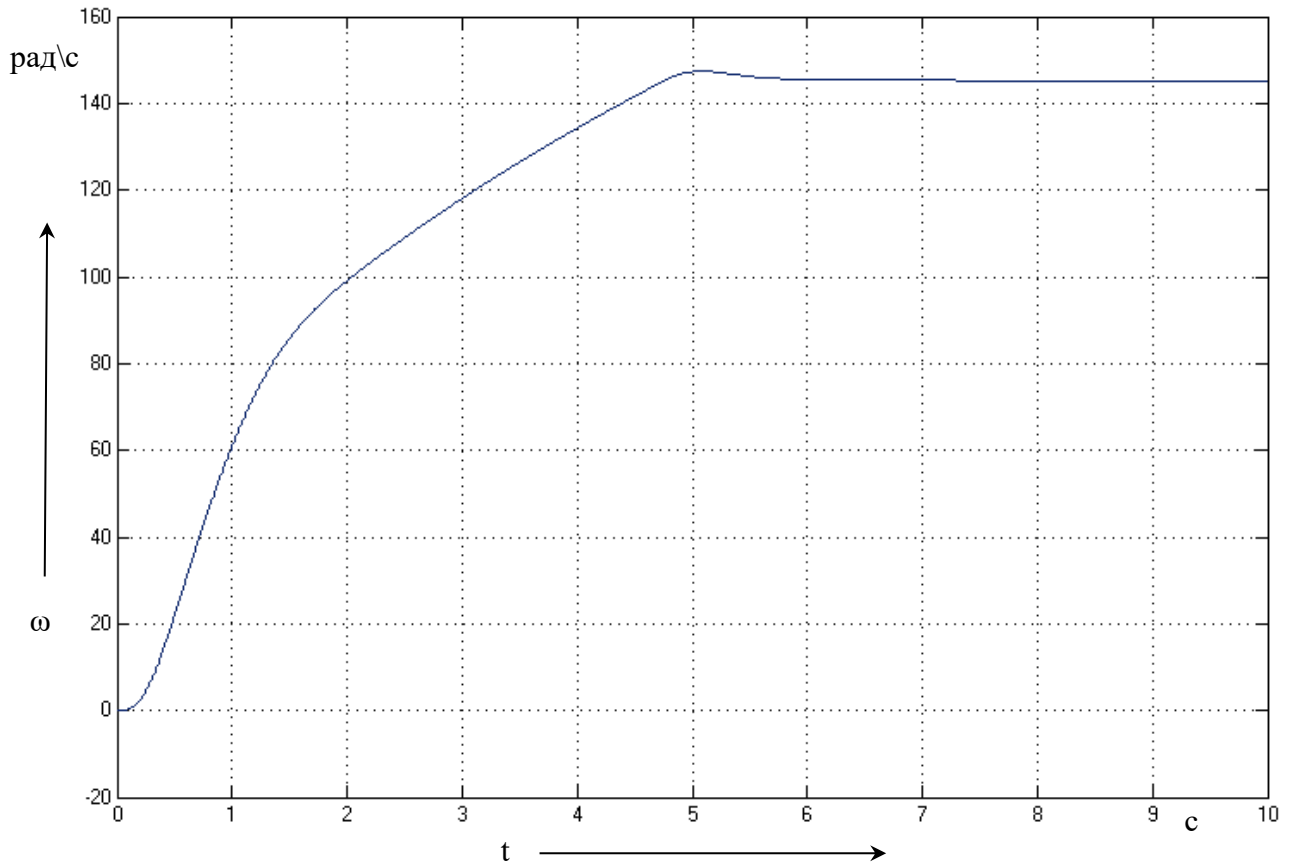


Рисунок 4.2 – График переходного процесса системы управления электроприводом переменного тока

Классическая структура векторного управления содержит большое количество нелинейностей и подблоков произведения, а также нелинейностей, связанных с ограничением текущих параметров, кроме того, сама структура также является сугубо нелинейной. Поэтому реализация НЛР с использованием традиционного подхода будет сопровождаться рядом проблем при настройке базы правил, выборе количества и вида функций принадлежности, а также числа информационных входов. Путем замены классического регулятора в контуре скорости на МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани был осуществлен синтез схемы управления электроприводом переменного тока (рисунок 4.3) [54-61, 102, 105, 110].

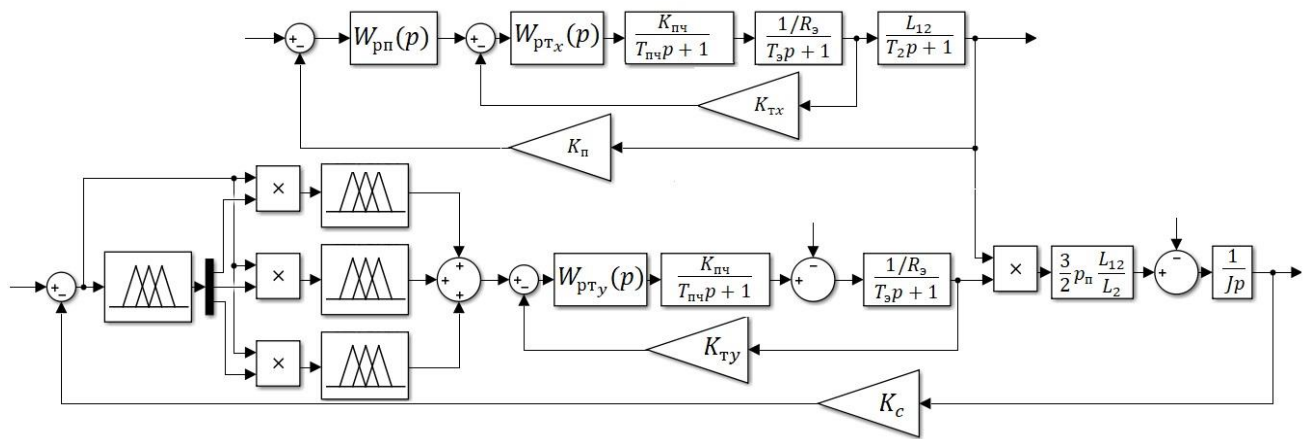


Рисунок 4.3 – Имитационная модель ИСУЭП с МНЛР с алгоритмом вывода Сугено-Мамдани

На базе математической модели СУЭП, представленной на рисунке 4.3, производится моделирование классической системы электропривода переменного тока (рисунок 4.4) и ИСУЭП с использованием нечеткого подхода (рисунок 4.5) [114]. В основу ИСУЭП заложен МНЛР, построенный на базе предложенной методики. Основным отличием при настройке НЛР системы электропривода переменного тока от регулятора системы электропривода постоянного является изменение диапазона распределения функций принадлежности в блоке фаззификации, что будет влиять на точность системы, при этом не усложняется реализация алгоритмов управления.

Используя методику многокаскадного нечеткого управления, представленную в пунктах 2.5 - 2.6, произведем настройку ИСУЭП для представленного объекта регулирования.

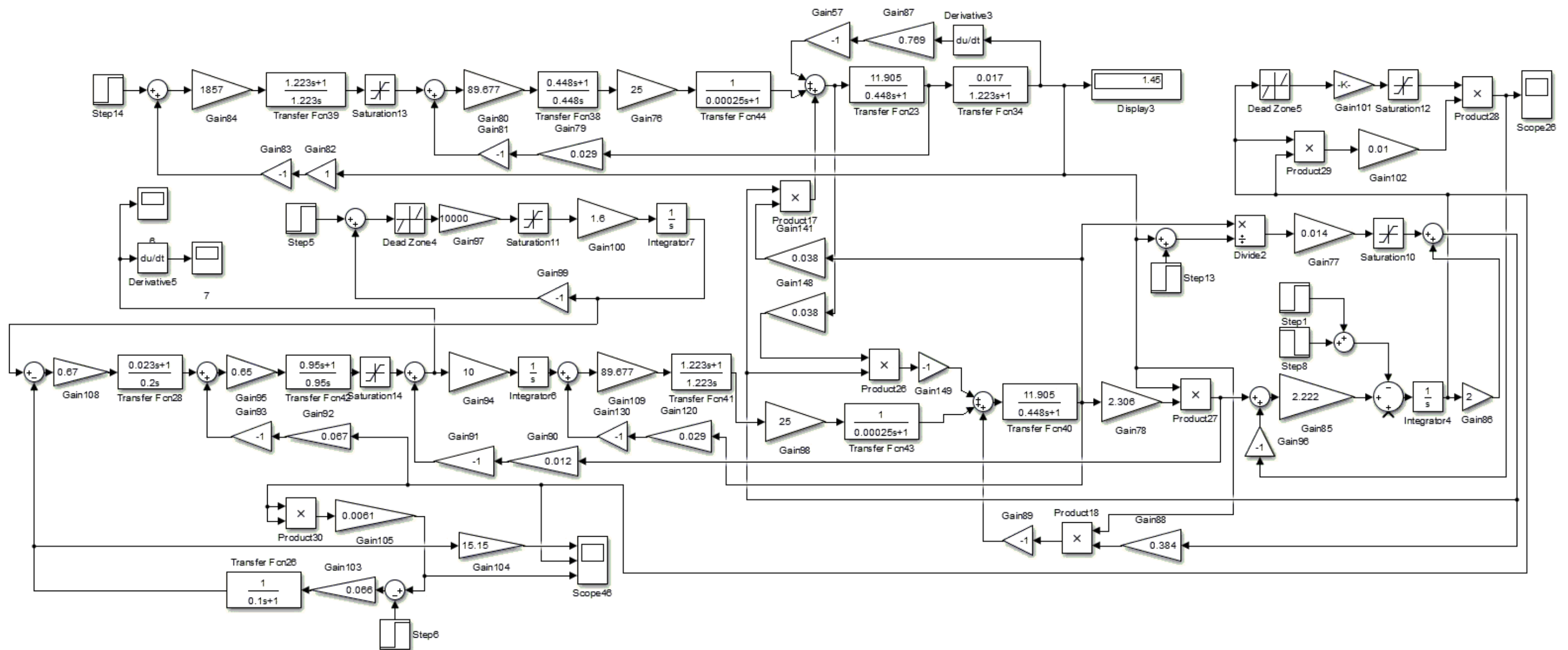


Рисунок 4.4 – Модель электропривода переменного тока с классическим регулятором положения

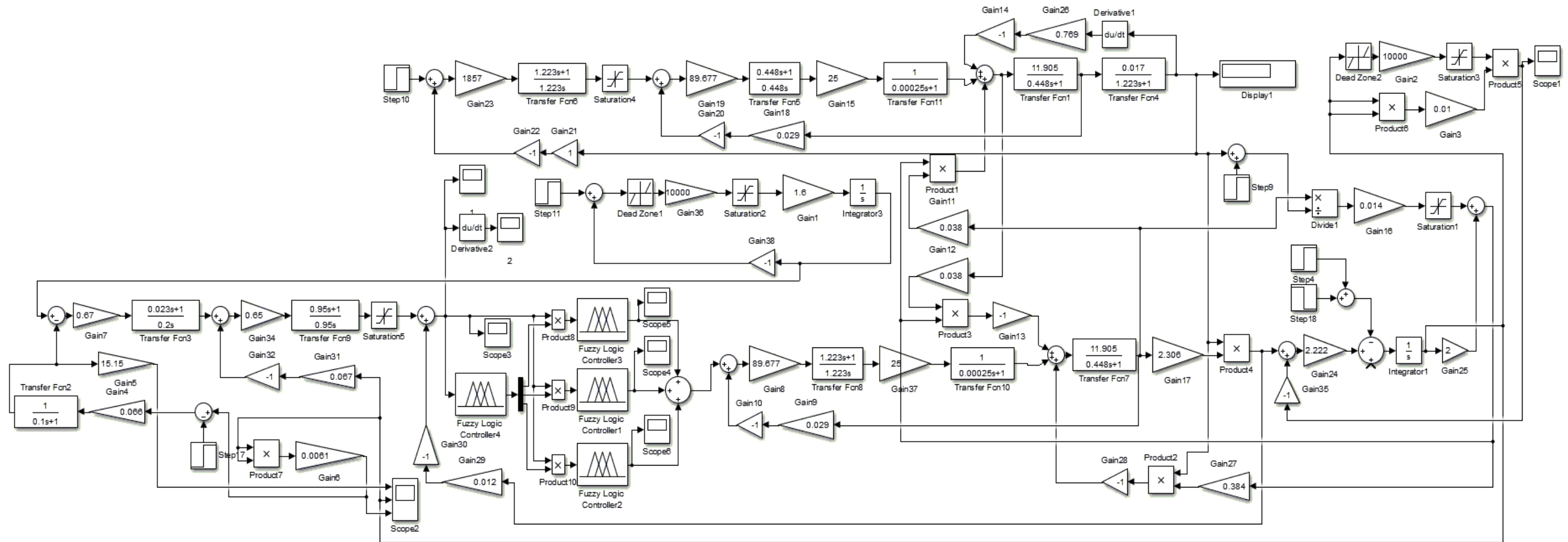


Рисунок 4.5 – Модель электропривода переменного тока с нечетким регулятором положения

4.1 Моделирование двухкаскадного нечеткого логического регулятора с комбинацией механизмов выводов Сугено-Мамдани в системе электропривода переменного тока

Первый каскад в МНЛР можно рассматривать как элемент, который на основе имеющихся данных производит управление регуляторами, находящимися во втором каскаде, и представляет собой внешний интеллектуальный переключатель. Такая структура используется в СУЭП для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых критериев точности и качества переходного процесса [62-65, 106, 112].

Для корректной работы ИСУЭП производится настройка звена интеллектуального переключения, которое имеет на своем входе одну лингвистическую переменную `input1` и анализирует сигнал ошибки. В основе логического вывода интеллектуального переключающего устройства реализуется алгоритм Сугено. Основной задачей, возлагаемой на такую структуру, являются интеллектуальные оценка и выбор соответствующих НЛР второго каскада, настроенных на различные диапазоны управления.

Выбор области определения базовых терм-множеств лингвистических переменных осуществляется экспертно, исходя из знаний о переходном процессе системы с классическим регулятором. В блоке фаззификации для базового терм-множества лингвистической переменной использованы три аппроксимированных функций принадлежности формы, аналогично, как и для МНСУЭП постоянного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани (рисунок 4.8).

Нечеткая продукционная база знаний НЛР представляет собой перечень из трёх правил и имеет следующий вид:

1. If (`input1` is «Z») then (`output1` = 0), (`output_2`= 1), (`output_3`= 0);
2. If (`input1` is «P») then (`output1` = 1), (`output_2`= 0), (`output_3`= 0);
3. If (`input1` is «BP») then (`output1` = 0), (`output_2`= 0), (`output_3`= 1).

Формализация выходного сигнала звена интеллектуального переключения осуществляется тремя лингвистическими переменными `output1`, `output2` и

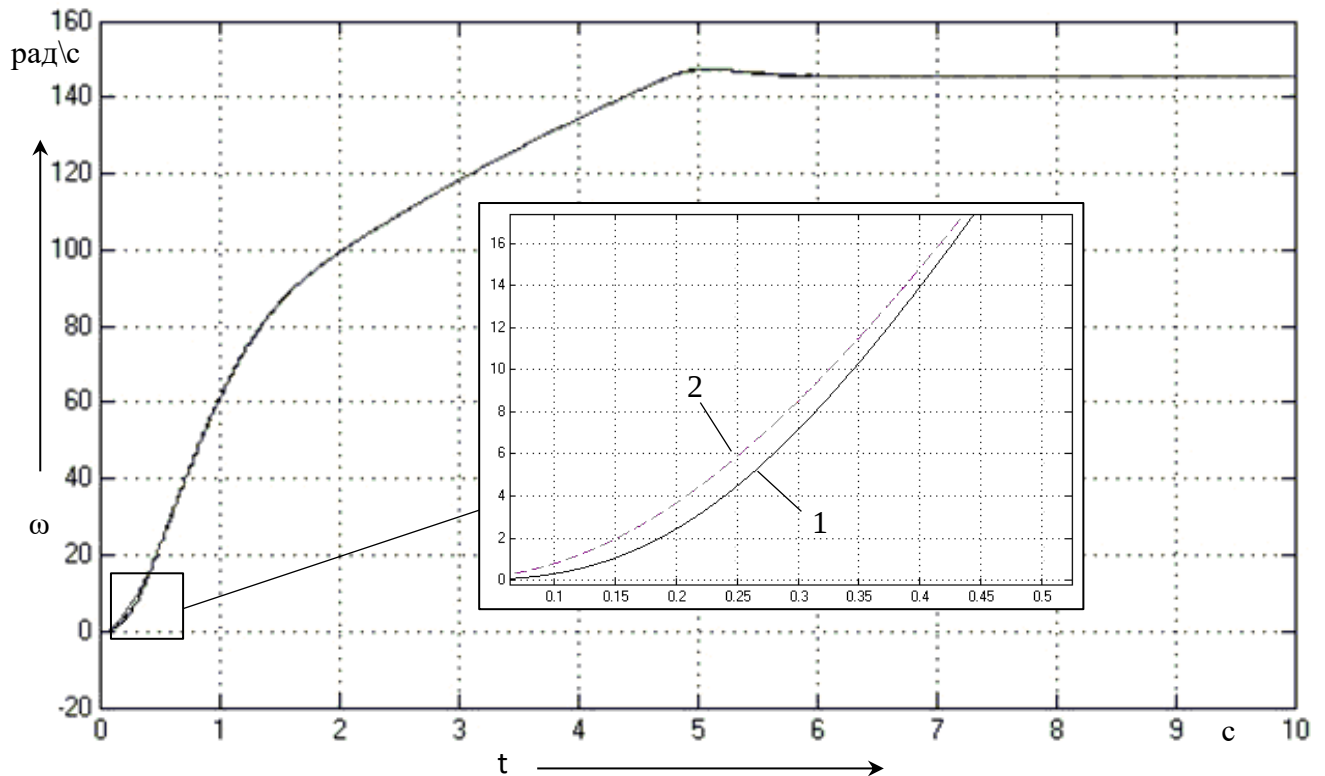
output3. Формирование в блоке дефаззификации двух постоянных величин 0 и 1 на выходе обусловлено выбором алгоритма вывода Сугено.

Решение задачи регулирования достигается путем введения в ИСУЭП двухкаскадного НЛР с комбинацией различных механизмов выводов. Наполнение внутреннего каскада представлено набором типовых НЛР с единственными информационными входом и выходом, реализующими алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани. Настройка основных параметров таких модулей представлена в таблице 4.1. Главное отличие модулей внутреннего каскада друг от друга заключается в разности диапазонов регулирования входной и выходной лингвистических переменных.

Таблица 4.1 – Параметры настройки простейших НЛР внутреннего каскада интеллектуального модуля

	Входной диапазон регулирования	Выходной диапазон регулирования	База знаний НЛР
mam1	[-0,86; 0,86]	[-1,31; 1,31]	1. If (input1 is «Z») then (output1 is «Z»);
mam2 (-30%)	[-0,602; 0,602]	[-0,917; 0,917]	2. If (input1 is «BP») then (output1 is «BP»);
mam3 (+30%)	[-1,118; 1,118]	[-1,703; 1,703]	3. If (input1 is «P») then (output1 is «BP»); 4. If (input1 is «N») then (output1 is «N»).

В результате синтеза имитационной модели МНСУ на базе электропривода переменного тока были получены переходные характеристики системы, приведенные на рисунке 4.6.



1 – выходной сигнал СУЭП;

2 – выходной сигнал ИСУЭП с МНЛР

Рисунок 4.6 – График переходного процесса системы электропривода переменного тока

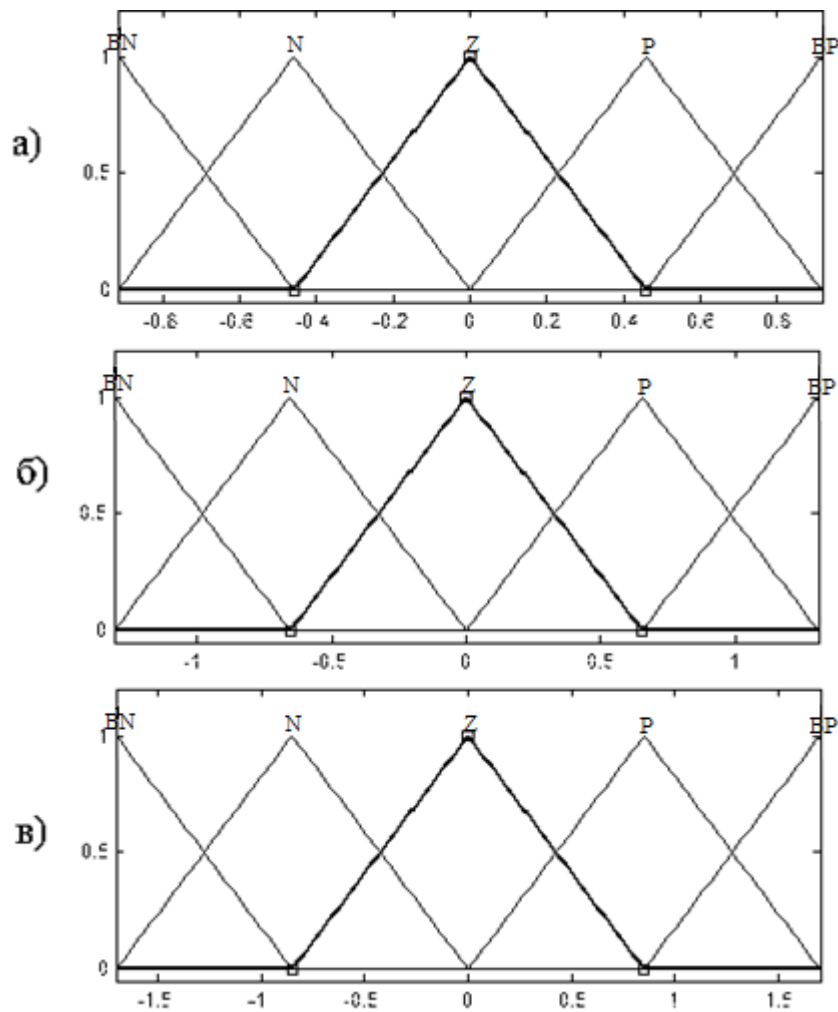
График переходных процессов (рисунок 4.6) иллюстрирует качество реализации законов управления по основным показателям, таким как быстродействие и перерегулирование, кроме того в статическом режиме обе системы имеют одинаковый заданный уровень. МНСУЭП реализует характеристики, аппроксимирующие классическую СУЭП с достаточной степенью точности, а также описывает эффективность применения методики многокаскадного нечеткого регулирования для электроприводов переменного тока. Применение МНЛР для представленного объекта регулирования позволило получить качественный переходный процесс без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для типового алгоритма нечеткого управления.

4.2 Моделирование двухкаскадного нечеткого логического регулятора с альтернативной комбинацией механизмов выводов

При моделировании ИСУЭП с применением МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани внешний каскад такой структуры выполняет функцию интеллектуального приключающего устройства, и по аналогии с теорией нейронных сетей реализует функции входного слоя нейронов. Внутренний каскад интеллектуального модуля управления электроприводом переменного тока формирует закон регулирования МНЛР. В современных СУЭП применение подобных структур обусловлено формированием управляющего сигнала, результатом которого возможно получить качественные характеристики переходных процессов [66-69].

Путем замены механизма нечеткого вывода в звене, реализующем функцию интеллектуального переключения, было получено решение задачи управления технологическим процессом, учитывающее особенности сопряжения нечетких модулей, построенных по алгоритму Мамдани. Функциональная схема интеллектуального переключающего устройства с сочетанием механизмов вывода Мамдани-Мамдани структурно будет отличаться от интеллектуального модуля с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани. Отличия связаны с отсутствием элементов перемножения сигналов между каскадами НЛР, применение которых обусловлено особенностями функционирования алгоритма вывода Сугено.

Настройка внешнего каскада МНЛР, состоящего из одного нечеткого регулятора с механизмом вывода Мамдани, осуществляется по аналогии с пунктом 3.1. Основными отличительными особенностями являются перенастройка блока дефаззификации каждой лингвистической переменной (рисунок 4.7), а также изменение консеквентов правил на функции принадлежности аппроксимированного вида.



а – output1, б – output2, в – output3

Рисунок 4.7 – Распределение выходных нечетких термов лингвистической переменной «ошибка по положению»

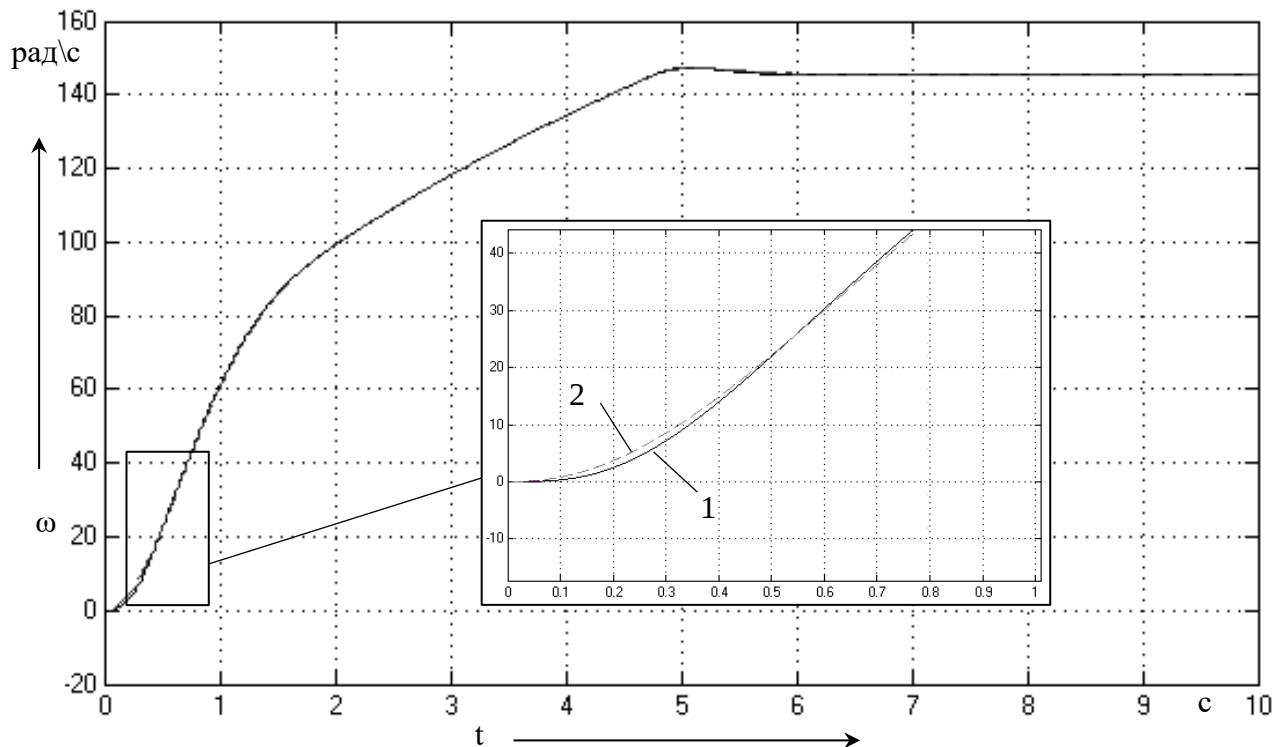
Соответственно база правил примет следующий вид:

1. If (input1 is «Z») then (output1 is «N»), (output2 is «Z»), (output3 is «N»);
2. If (input1 is «P») then (output1 is «P»), (output2 is «BP»), (output3 is «BP»);
3. If (input1 is «BP») then (output1 is «Z»), (output2 is «Z»), (output3 is «BP»).

Внутренний каскад представляет собой аналогичный набор простейших НЛР с одним входом и одним выходом, построенных с применением предложенного подхода. Внутренний каскад МНСУЭП с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани для системы электропривода переменного тока остается неизменным и приведен в таблице 4.1.

В ходе вычислительного эксперимента на имитационной модели с внедренным в нее МНЛР с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани

были получены выходные характеристики, отображающие качество переходного процесса (рисунок 4.8).



1 – выходной сигнал классической СУЭП;

2 – выходной сигнал МНСУЭП с МНЛР

Рисунок 4.8 – График переходного процесса системы электропривода переменного тока

Переходные характеристики, приведенные на рисунке 3.8, наглядно показывают, что внедрение МНЛР в СУЭП переменного тока позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы. Математическая модель системы управления на базе частотно-регулируемого электропривода переменного тока характеризуется как высоким порядком, так и сложной функциональной зависимостью координат. В основе реализации нечетких СУЭП переменного тока лежит методика, основанная на применении МНЛР, которая позволяет расширить интеллектуальные и функциональные возможности таких систем в условиях неполноты информации об объекте и существенных недостатках математического описания.

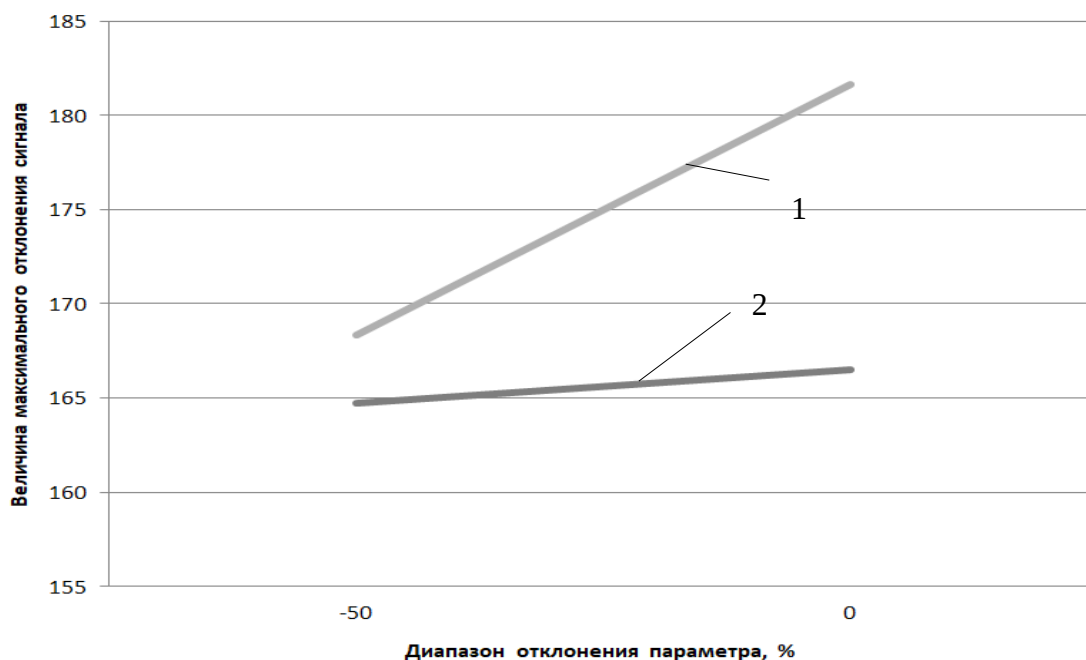
Синтез параметров регуляторов тока, потокосцепления осуществляется, опираясь на нормальный режим работы электропривода, и рассчитанные

значения отвечают, как правило, номинальному режиму работы. В переходных режимах различная инерционность контуров тока, потокосцепления, скорости будет приводить к отклонению параметров электропривода от номинальных значений [70, 71]. Путем изменения расчетного значения величины потокосцепления, что отражено в таблице 4.3, проводилась оценка отклонения выходных параметров модели электропривода от номинального режима.

Таблица 4.3 – Нестационарность величины потокосцепления в МНСУЭП с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

Диапазон изменения параметра, %	-50	0
Значение величины потокосцепления	0,725	1,45
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	181,63	168,37
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с МНЛР	167,03	164,7

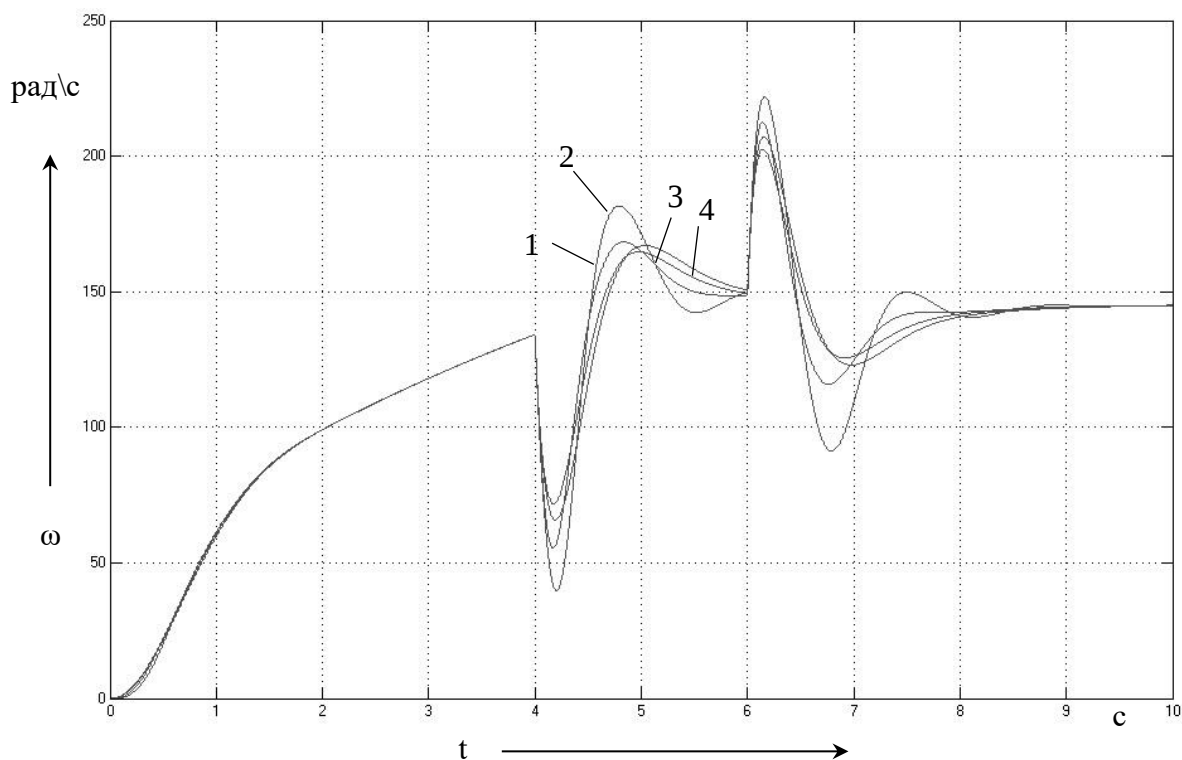
Диаграмма, приведенная на рисунке 4.9, показывает, что МНСУЭП с сочетанием алгоритмов нечеткого логического вывода Сугено-Мамдани проявила способности компенсации изменения величины потокосцепления.



1 – СУЭП с классическим регулятором,

2 – МНСУЭП с сочетанием алгоритмов Сугено-Мамдани

Рисунок 4.9 – Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении величины потокосцепления

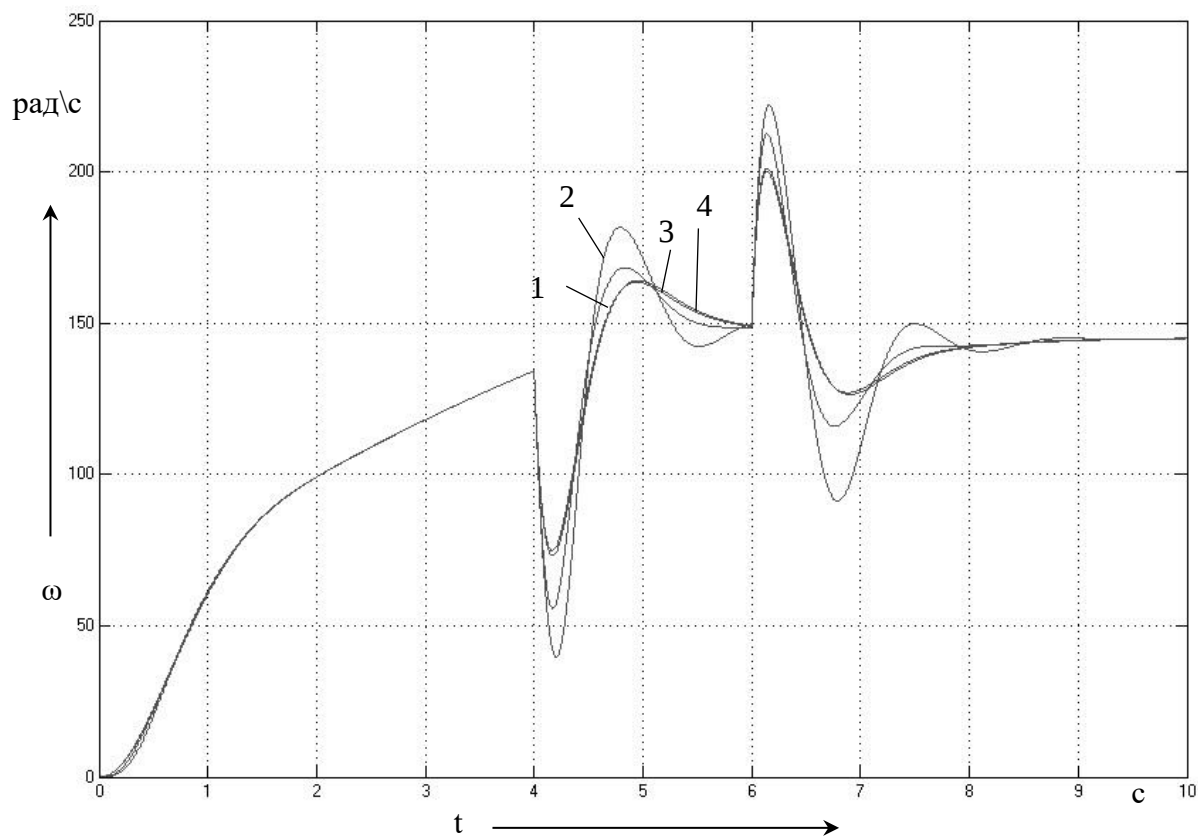


1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП с измененным значением потокосцепления; 3 – МНСУЭП; 4 – МНСУЭП с измененным значением потокосцепления

Рисунок 4.10 – График переходного процесса классической и нечеткой СУЭП переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Сугено-Мамдани

На рисунке 4.10 приведены результаты исследования МНСУЭП с сочетанием механизмов вывода Сугено-Мамдани для различных режимов работы электропривода переменного тока: разгона, скачкообразного отклонения возмущающего воздействия в положительную и отрицательную сторону и вариации одного из внутренних параметров.

В результате замены механизма вывода во внешнем переключающем модуле был осуществлен синтез многокаскадных нечетких алгоритмов по предложенной методике. Результаты реакции моделей классической системы и МНСУЭП переменного тока с сочетанием алгоритмов нечеткого логического вывода Мамдани-Мамдани на отработку задающего воздействия приведены на рисунке 4.11.



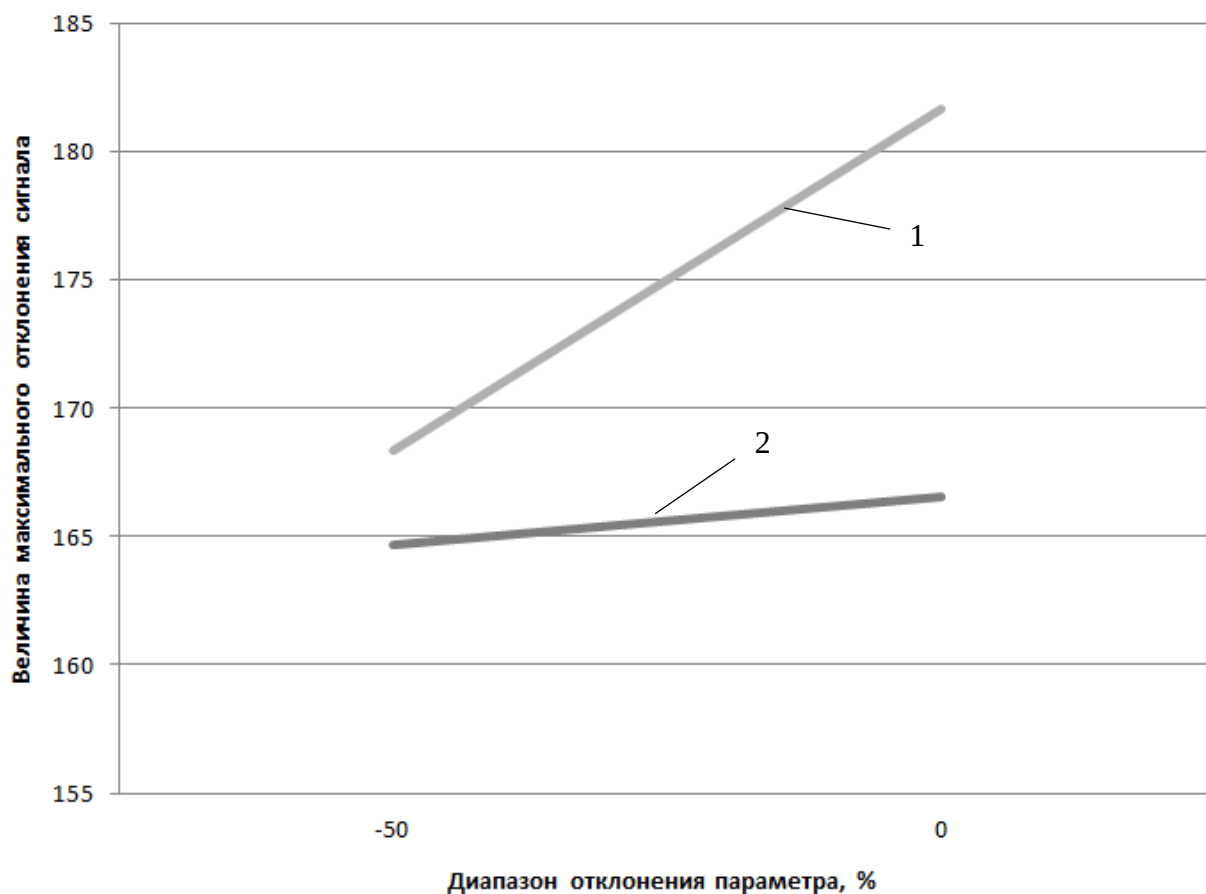
1 – классическая СУЭП; 2 – классическая СУЭП с измененным значением потокосцепления; 3 – МНСУЭП; 4 – МНСУЭП с измененным значением потокосцепления

Рисунок 4.11 – График переходного процесса классической и нечеткой СУЭП переменного тока с сочетанием алгоритмов вывода Мамдани-Мамдани

На основании данных, приведенных в таблице 4.4, где отражено процентное изменение величины потокосцепления, была построена диаграмма отклонения максимального значения сигнала возмущающего воздействия системы (рисунок 4.12).

Таблица 4.4 – Нестационарность величины потокосцепления в МНСУЭП с комбинацией алгоритмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани

Диапазон изменения параметра, %	-50	0
Значение величины потокосцепления	0,725	1,45
Значение $h_{\max}$ классической СУЭП	181,63	168,37
Значение $h_{\max}$ ИСУЭП с МНЛР	164,7	164,7



1 – классическая СУЭП, 2 – двухкаскадная нечеткая СУЭП с комбинацией алгоритмов Мамдани-Мамдани

Рисунок 4.12 – Диаграмма отклонения максимального значения сигнала при изменении величины потокосцепления

Таким образом, синтез многокаскадных нечетких алгоритмов по предложенной методике и исследование СУЭП переменного тока продемонстрировали, что данный подход менее чувствителен к неполноте математического описания объекта регулирования, позволяет улучшить основные показатели качества, расширяет функциональные возможности управления электроприводами и придает некоторые свойства интеллектуальности таким системам [113, 118]. Анализ переходных характеристик, полученных в результате моделирования ИСУЭП с использованием МНЛР с комбинацией механизмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани позволяет сделать вывод, что синтезированная система по сравнению с классической характеризуется рядом преимуществ: нечувствительна к изменению внутренних параметров, имеет сравнительно

более высокое быстродействие и меньшее количество колебаний при обработке возмущений.

4.3 Формирование процедур управления элементами вложенного каскада в системе электропривода переменного тока

Дальнейший ход исследования заключается в анализе поведения МНСУЭП переменного тока с различным сочетанием нечетких выводов при подаче на вход ступенчатого сигнала сложной формы (рисунок 4.13).

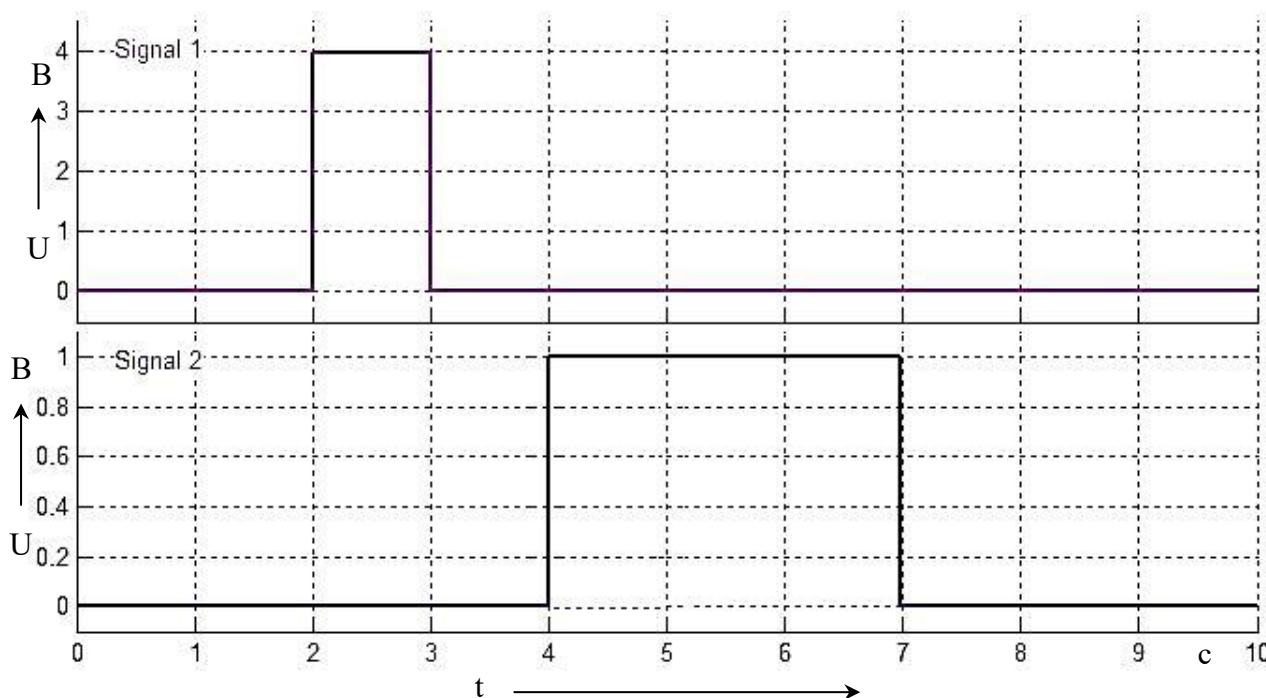
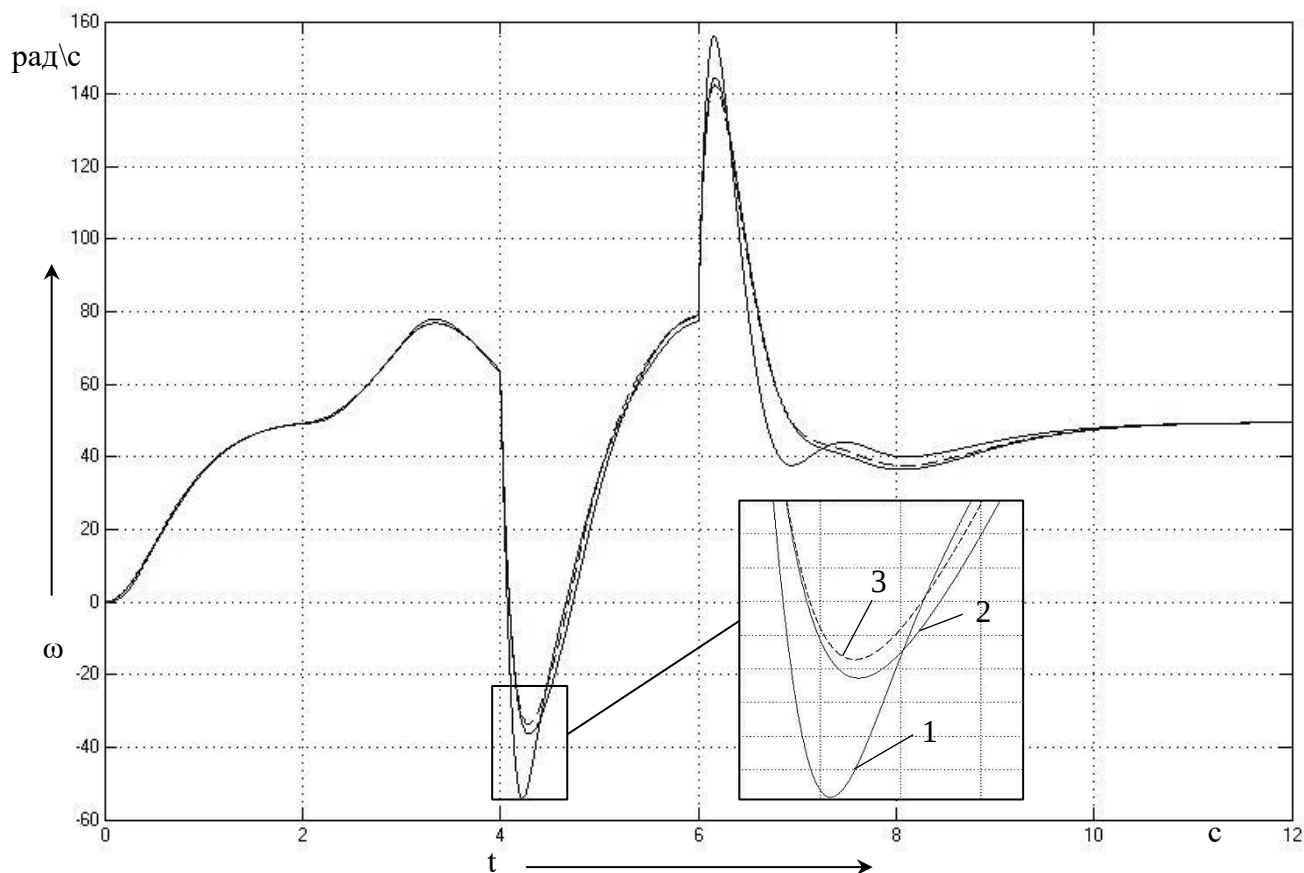


Рисунок 4.13 - Форма задающего сигнала системы

Переходные характеристики, проиллюстрированные на рисунке 4.14, позволяют оценить качество переходных процессов ИСУЭП с различными сочетаниями алгоритмов вывода и классической СУЭП переменного тока. Сравнительный анализ кривых (рисунок 4.14) позволяет сделать вывод, что в результате синтеза МНСУЭП с комбинацией алгоритмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани система проявляет свойства робастности и обладает меньшим отклонением от заданного уровня относительно многокаскадной нечеткой СУЭП с альтернативным сочетанием алгоритмов вывода. Наряду с этим необходимо отметить, что МНСУЭП превосходит классическую СУЭП

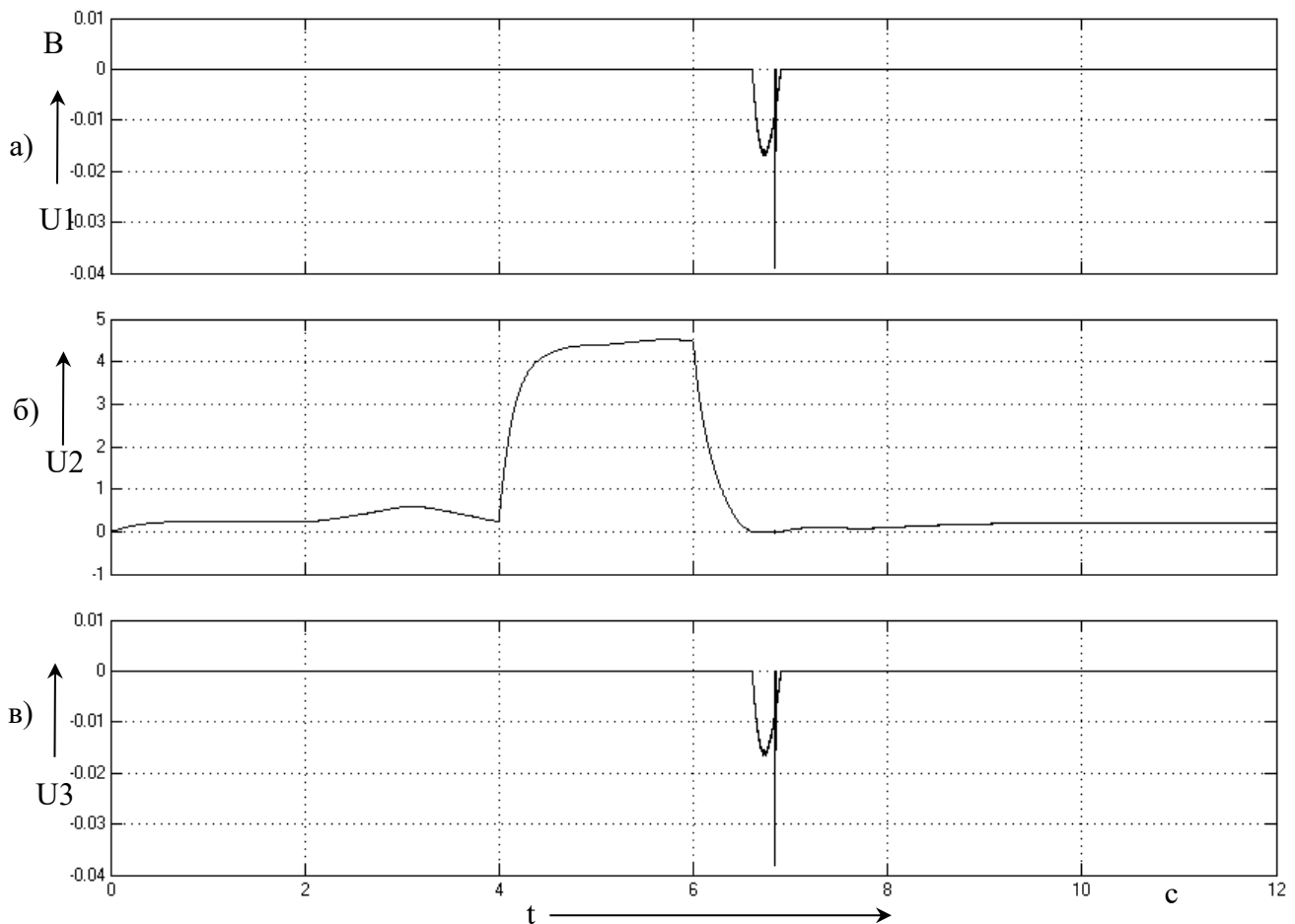
переменного тока по основным показателям качества процесса регулирования в целом.



1 – классическая СУЭП, 2 – МНСУЭП с комбинацией алгоритмов нечетких логических выводов Сугено-Мамдани, 3 – МНСУЭП с комбинацией алгоритмов нечетких логических выводов Мамдани-Мамдани

Рисунок 4.14 – Динамические характеристики классической и двухкаскадной нечеткой СУЭП переменного тока при подаче сложного ступенчатого задающего воздействия

Динамические характеристики, формирующие итоговый закон управления на выходе МНЛР с сочетанием механизмов вывода Сугено-Мамдани и Мамдани-Мамдани, приведены на рисунках 4.15 и 4.16 соответственно.



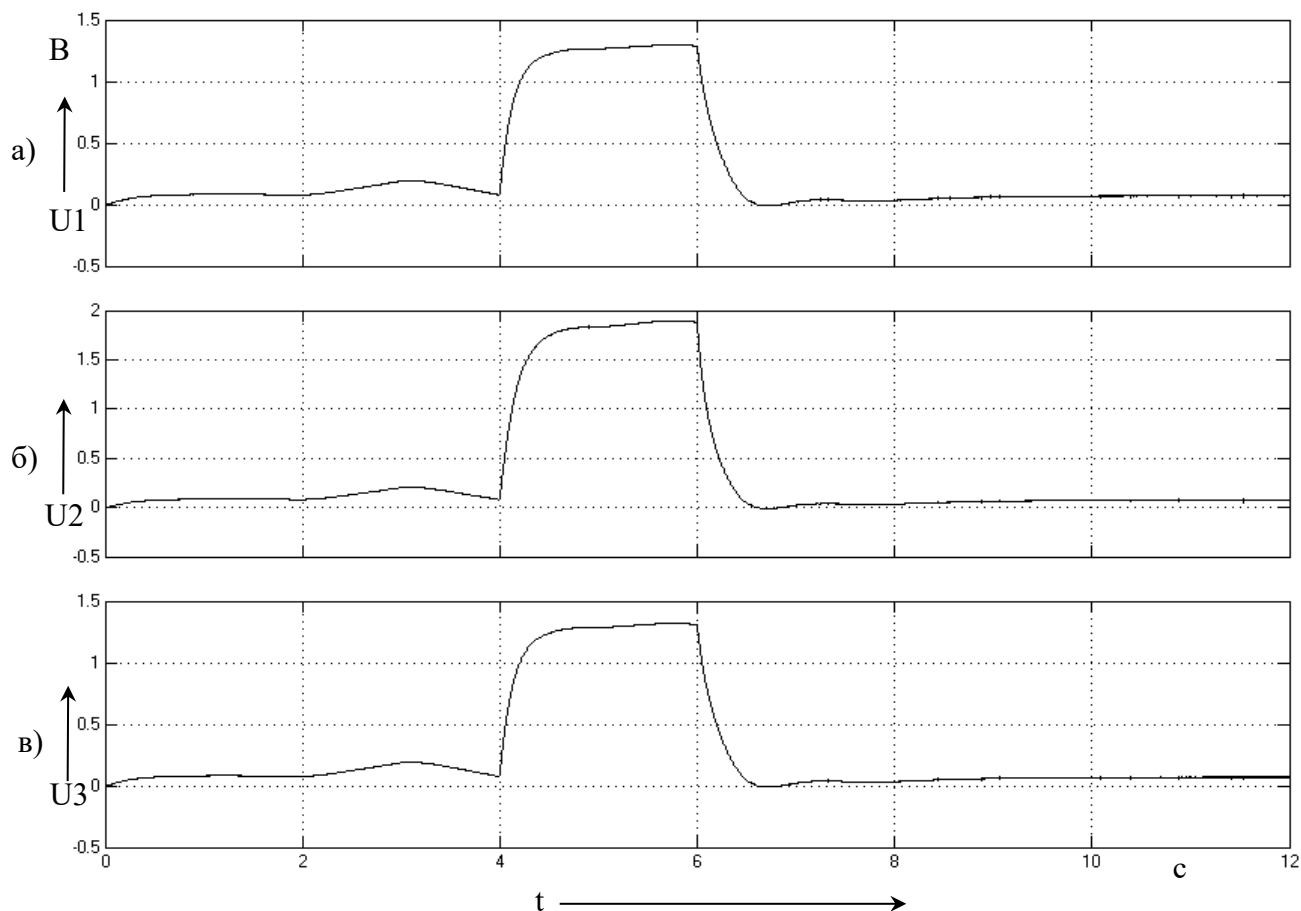
а – элементарный нечеткий модуль «mam2», б - элементарный нечеткий модуль «mam1», в - элементарный нечеткий модуль «mam3»

Рисунок 4.15 – Переходные характеристики, формирующие итоговый закон управления для МНСУЭП переменного тока с комбинацией алгоритмов нечеткого логического вывода Сугено-Мамдани

Рисунок 4.15 наглядно отображает, как осуществляется работа каждого НЛР во внутреннем каскаде при синтезе многокаскадных нечетких алгоритмов по предложенной методике. Ключевую функцию при формировании управляющего закона в МНЛР осуществляет элементарный нечеткий модуль «mam2», при этом регуляторы «mam1» и «mam3» формируют реакцию системы при ее отклонении от номинального режима функционирования.

На рисунке 4.16 изображены переходные характеристики, формирующие итоговый сигнал регулирования в МНСУЭП переменного тока с комбинацией механизмов выводов Мамдани-Мадмани. В данном случае формирование итогового закона регулирования выполняется тремя НЛР «mam1», «mam2» и

«mam3» одновременно, однако отличия сигналов заключены в величине амплитуды.



а – элементарный нечеткий модуль «mam2», б - элементарный нечеткий модуль «mam1», в - элементарный нечеткий модуль «mam3»

Рисунок 4.16 – Переходные характеристики, формирующие итоговый закон управления для МНСУЭП переменного тока с комбинацией механизмов выводов Мамдани-Мамдани

Несмотря на функциональную сложность такого объекта регулирования, как электропривод переменного тока, применение МНЛР позволяет получить адаптированные переходные характеристики. При этом более высокое качество адаптации системы управления проявляет регулятор с механизмом вывода Мамдани в первом каскаде. Это объясняется отсутствием ограничивающего фактора полиномиальных зависимостей в выходных лингвистических переменных алгоритма нечеткого вывода Сугено [72, 73]. Такая технология внедрения МНЛР в СУЭП переменного тока позволяет реализовывать законы управления любой сложности и получать качественные переходные процессы.

Выводы по четвертой главе

1. Разработана МНСУЭП переменного тока на основе ранее сформулированного подхода.
2. Путем изменения расчетного значения величины потокосцепления проводилась оценка влияния нестационарности на выходные параметры модели электропривода.
3. Выполнен сравнительный анализ поведения МНСУЭП переменного тока с различным сочетанием нечетких выводов при подаче на вход ступенчатого сигнала сложной формы.

Глава 5. Реализация алгоритмов управления электроприводом переменного тока с применением многокаскадного нечеткого логического регулятора

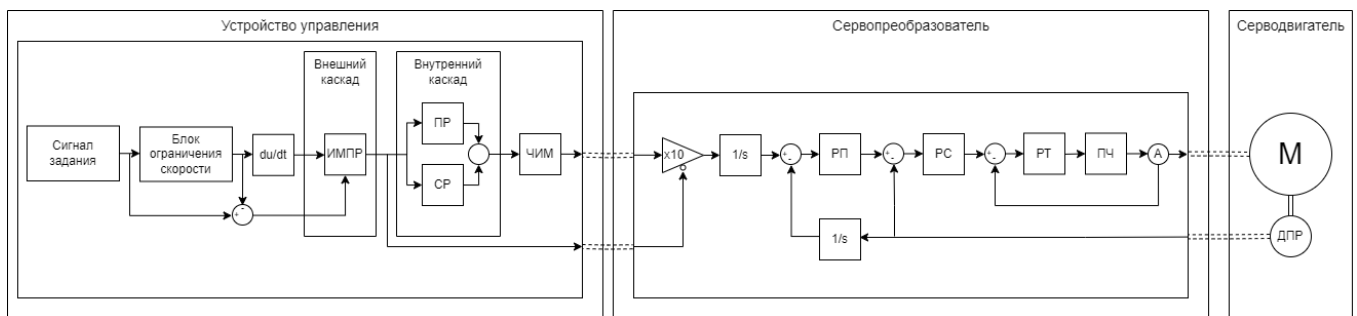
Иерархичность и модульность внутренней структуры многокаскадного нечеткого логического регулятора позволяет организовать его структуру на достаточно простой аппаратной платформе. За счет снижения нагрузки со стороны базы знаний интеллектуального регулятора частично решаются не только вопросы выбора технологического оборудования, но и быстроты протекания процессов участвующих в формировании нескольких законов управления, а также переходов между ними при наступлении некоторых условий определенных как технологическим процессом, так и наличием внешних и внутренних недетерминированных воздействий.

Эксперимент направлен на оценку эффективности разработанной многокаскадной нечеткой системы управления сервоприводом на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами (PMSM) в условиях высокоскоростного режима работы и требований к прецизионному позиционированию. Основной акцент сделан на оценку способности системы динамически адаптироваться к изменяющимся частотам сигналов «шаг/направление», предотвращать превышение аппаратных ограничений контроллера и минимизировать позиционную ошибку при переключении режимов множителя сигнала задания и инкрементального энкодера. Дополнительно исследуется влияние интеграции модульного регулятора и регулятора симметричного оптимума на устойчивость, энергоэффективность и быстродействие системы.

Проверку реализации законов регулирования многокаскадным нечетким регулятором для электропривода переменного тока при условии реализации и перехода от одного критерия управления к другому можно выполнить на следующем наборе стандартных средств автоматизации. В состав экспериментальной установки входят следующие элементы: сервопривод PMSM мощностью 0,75 кВт с номинальной скоростью 3000 об/мин,

сервопреобразователь с номинальным током 3А, инкрементальный энкодер разрешением 2500 импульсов на оборот с возможностью программного переключения множителя ($\times 1$, $\times 10$), отладочная плата на базе микроконтроллера STM32F7 с ограничением частоты входных-выходных сигналов 20 Гц, а также нагрузочную машину с регулируемым моментом.

Функционально лабораторную установку можно представить в виде следующей схемы, показанной на рисунке 5.1.



ИМПР – интеллектуальный модуль принятия решений, ПР – позиционный режим, СР – скоростной режим, ЧИМ- частотно-импульсная модуляция, РП – регулятор положения, РС – регулятор скорости, РТ – регулятор тока, ПЧ – преобразователь частоты, А – амперметр, ДПР – датчик положения ротора
Рисунок 5.1 – Функциональная схема экспериментальной установки

Простота оборудования используемого при реализации предложенной методики обусловлена целым набором причин, основными среди которых являются: доступность средств автоматизации в настоящих реалиях, модульное построение системы управления электроприводом с возможности размещения интеллектуальных блоков на различных контроллерах, минимальный расход вычислительных мощностей аппаратной части, а также относительная дешевизна комплекта ПЛК для реализации такой многокаскадной нечеткой системы. Внешний вид установки с многокаскадной системой регулирования электроприводом переменного тока показан на рисунке 5.2.

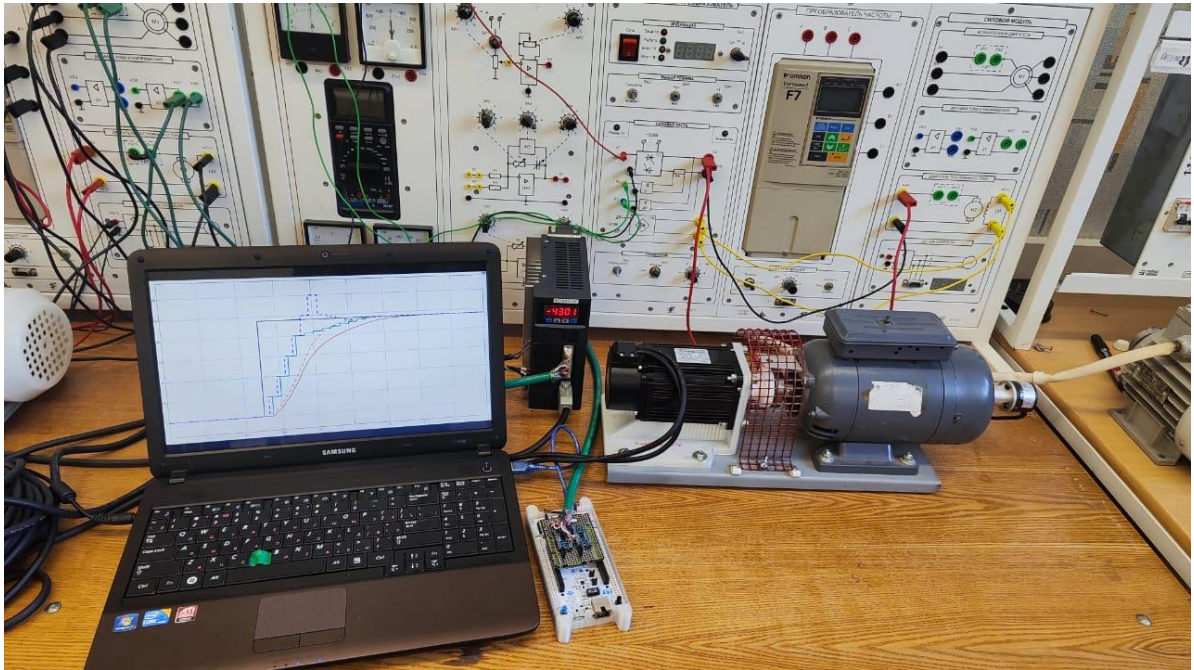


Рисунок 5.2 – Внешний вид экспериментальной установки

Уставки многокаскадного регулятора включают в себя реализацию двух законов регулирования: настройка одного из модулей вложенного каскада на режим больших перемещений, а другого, соответственно, ориентирован на точность. Нечеткий регулятор внешнего каскада осуществляет принятие решений об изменении необходимого режима в зависимости от внешних условий

Ход проведения эксперимента. На начальном этапе проведена калибровка системы: определены предельные частоты STEP-сигналов (200 кГц) и энкодера (800 кГц при $\times 4$), измерена инерция нагрузки в диапазоне 0.01–0.05 кг·м². Далее выполнена серия тестовых запусков с фиксацией параметров:

1. Базовый режим — управление без нечетких регуляторов, с фиксированным множителем $\times 4$.
2. Двухрегуляторная система — с активированными подсистемами частотных ограничений и точности.
3. Полная конфигурация — с добавлением регуляторов симметричного и модульного оптимумов.

Для каждого режима задавались профили движения: разгон до 3000 об/мин с последующим позиционированием в заданную точку (0–360°), движение с переменной нагрузкой (5–100% от номинального момента), а также циклические

операции с частой сменой направления. В ходе испытаний регистрировались мгновенные значения скорости, позиционной ошибки, частоты STEP/DIR-сигналов, коэффициентов ПИД-регулятора, активного множителя энкодера и потребляемой мощности.

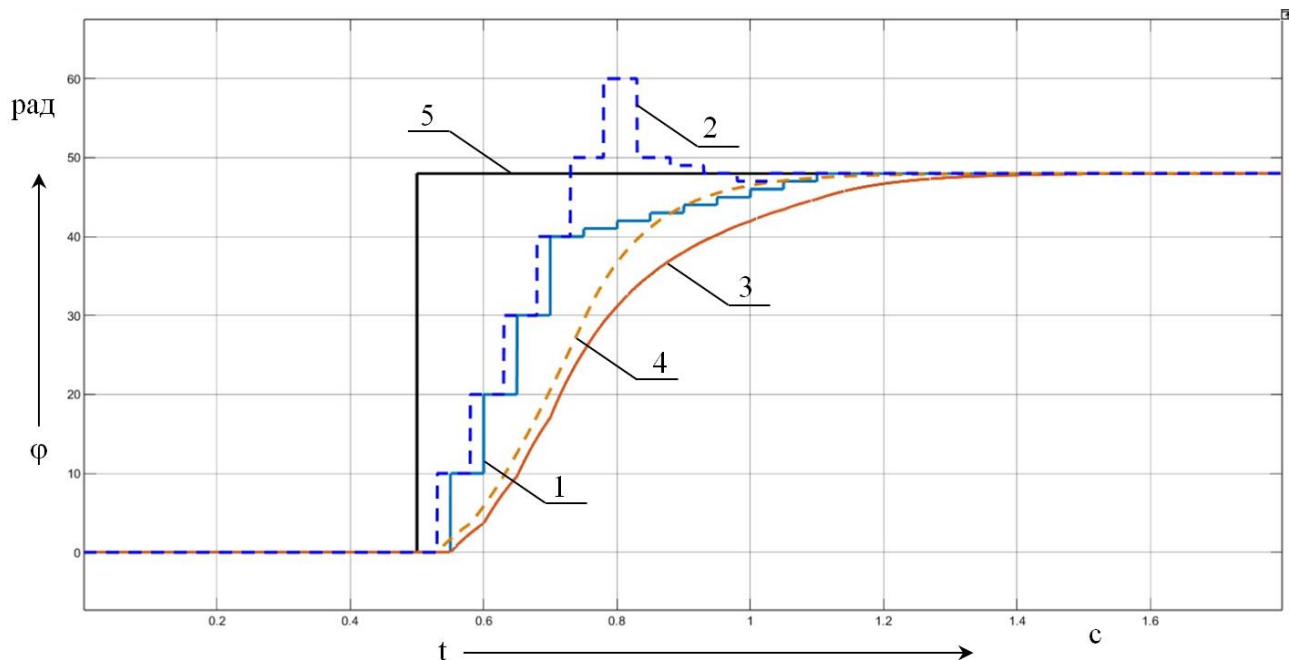
Обработка данных осуществлялась методами статистического анализа (среднеквадратичное отклонение ошибки позиционирования, максимальное перерегулирование) и спектрального анализа сигналов управления. Для визуализации динамики процессов использовались временные графики зависимости ошибки $\Delta\theta$ от скорости ω , гистограммы распределения частот переключения множителя, а также диаграммы энергопотребления.

В базовом режиме при скорости выше 2500 об/мин зафиксировано превышение частоты энкодера (820 кГц при $x4$), что вызывало сбои в работе контроллера. Позиционная ошибка достигала 25 импульсов ($0,35^\circ$) из-за запаздывания STEP-сигналов. При активации двухрегуляторной системы частота энкодера автоматически снижалась до $x1$ при 2300 об/мин, предотвращая сбои, но увеличивая ошибку до 40 импульсов ($0,56^\circ$) на этапе торможения.

В полной конфигурации модульный регулятор ограничивал скорость до 2700 об/мин в режиме «Точность», активируя множитель $x4$ только на финальной стадии позиционирования, что снизило ошибку до 8 импульсов ($0,11^\circ$). Регулятор симметричного оптимума адаптировал коэффициенты ПИД: при $x4$ коэффициент K_p увеличивался на 18%, компенсируя инерционность системы, а при $x1$ — снижался K_i на 22% для минимизации перерегулирования. Среднее энергопотребление сократилось на 12% за счет оптимизации режимов работы.

НЛР в своей основе имеет механизм вывода Сугено во внешнем и внутреннем каскадах. Два вложенных модуля ориентированы на формирование соответственно настроек системы соответствующих модульному и симметричному оптимумам. Внешний интеллектуальный модуль, как описано ранее, осуществляет выбор элементов вложенного каскада с учетом сложившейся текущей ситуации.

Экспериментальные зависимости импульсных сигналов задания и изменения положения угла поворота электропривода представлены на рисунке 5.3.



1 — сигнал управления по положению сервопривода в классической СУЭП,
 2 — сигнал управления по положению сервопривода в МНСУЭП,
 3 — переходная характеристика по положению в классической СУЭП,
 4 — переходная характеристика по положению в МНСУЭП, 5 — сигнал задания
 Рисунок 5.3 — Переходный процесс по положению в СУЭП

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

Выводы по пятой главе

1. Реализация СУЭП переменного тока на основе предложенных алгоритмов многокаскадного нечеткого управления показала, что разделение основных блоков интеллектуальных систем регулирования на ряд отдельных модулей позволяет организовать такую систему на основе стандартных средств промышленной автоматизации. Натурный эксперимент показал, что МНСУЭП обладает достаточно высокой точностью при отработке заданных характеристик, минимальным снижением быстродействия и отклонением от результатов, полученных в процессе имитационного моделирования.

2. С учетом ограничений наложенных на СУЭП показано, что многокаскадные нечеткие алгоритмы управления выполнены на основе Си-подобного языка программирования высокого уровня, что позволяет достаточно просто адаптировать программный код для любых доступных программируемых логических контроллеров.

Заключение

Диссертационная работа посвящена разработке новых алгоритмов нечеткого управления системами электроприводов постоянного и переменного тока. Решена актуальная научно-техническая задача, направленная на повышение интеллектуальных свойств нечетких регуляторов в электроприводах путем реализации вложенных иерархических структур, построенных по каскадному принципу. Результаты, полученные в рамках работы, основаны на едином подходе синтеза параметров внешнего и внутреннего каскадов МНЛР. Желаемые показатели регулирования в электроприводах постоянного и переменного тока достигнуты за счет гибкого расширения структуры интеллектуальной системы, а также за счет снижения алгоритмической сложности настроек регуляторов, входящих в ее структуру.

В результате исследования получены следующие научные и практические результаты:

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

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

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

4. Разработана методика синтеза многокаскадного нечеткого логического регулятора системой электропривода с различной наполняемостью

его внутренней структуры, обеспечивающая достижения желаемых показателей качества регулирования с учетом особенностей и режимов функционирования систем электроприводов.

Список литературы

- 1 Бесекерский, В.А. Теория автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – СПб. : Профессия, 2004. – 749 с.
- 2 Андриевский, Б.Р. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab / Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2000. – 475 с.
- 3 Бабёр, А. И. Системы автоматического управления электроприводами : учебное пособие / А. И. Бабёр. - Минск : РИПО, 2020. - 147 с.
- 4 Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. - 373 с.
- 5 Кисаримов, Р.А. Электропривод: Справочник / Р.А. Кисаримов. - М.: РадиоСофт, 2012. - 352 с.
- 6 Поспелов, Д. А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Д. А. Поспелова. – М.т: Наука, 1986. – 312 с.
- 7 Гладков Л. А. Генетические алгоритмы : учебник / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик ; под ред. В. М. Курейчика. — 2-е изд., исправл. и доп. — Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. - 368 с.
- 8 Рутковская, Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; Пер. с польск. И.Д. Рудинского - 2-е изд., стереотип. - Москва :Гор. линия-Телеком, 2013. - 384 с.
- 9 Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп: Перевод с английского. – Лаборатория базовых знаний, 2002.
- 10 Соловьев, В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами: учеб. пособие / В.А. Соловьев, С.П. Черный. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2006. – 74 с.
- 11 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.

12 Braae M., Rutherford D.A. Theoretical and Linguistic Aspect of the Fuzzy Logic Controller / Automation, Perg. Press. – 1979. – Vol.12. – P. 553 – 557.

13 Соловьев, В.А. Алгоритм и программная реализация синтеза НЛР по прямым показателям качества / В. А Соловьев, А.В. Кончин //Сб. научн. трудов междунар. науч.-т. конф. – ЭЭЭ-2003. – Комсомольск-на-Амуре. – 2003. – С. 55 – 59.

14 Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой / А.Н. Мелихов, Л.С. Берштейн, С.Я. Коровин – М.: Наука, 1990. – 272 с.

15 Искусственный интеллект. – В 3т. : Системы общения и экспертные системы: справочник / под ред. Э.В. Попова. – М.: Радио и связь, 1990. – 464 с.

16 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.

17 Литвак, Б.Г. Экспертная информация. Методы получения и анализа / Б.Г. Литвак – М.: Радио и связь, 1982. – 184 с.

18 Блишун, А.Ф. Обоснование операций теории нечетких множеств / А. Ф. Блишун, С.Ю. Знатнов – В кн.: Нетрадиционные модели и системы с нечёткими знаниями.

19 Барский, А. Б. Логические нейронные сети : учебное пособие / А. Б. Барский. - Москва : ИНТУИТ, 2016. - 354 с.

20 Темкин, И. О. Искусственные нейронные сети в АСУ ТП : учебник / И. О. Темкин, В. Б. Трофимов. - Москва : Издательский Дом НИТУ МИСИС, 2023. - 352 с.

21 Барский, А. Б. Введение в нейронные сети : краткий учебный курс / А. Б. Барский. - Москва : ИНТУИТ, 2016. - 260 с.

22 Nguyen, D. Neural Networks for Self-Learning Control Systems / D. Nguyen – IEEE Control Systems. —1990.—Vol. 10. – P. 18 – 23.

23 Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад – М: Радио и связь, 1990. – 288 с.

24 Батыршин, И.З. Иерархическая кластеризация на основе нечисловой информации о близости. Нечисловая статистика, экспертные оценки и смежные вопросы / И.З. Батыршин – М.: Таллин, 1984. – С. 277.

25 Ивашко, В.Г. Оценки правдоподобия в продукционных экспертных системах/ В. Г. Ивашко, С.О. Кузнецов // Экспертные системы: состояние и перспективы. – М.: Наука, 1989. – С. 92-103.

26 Шрейнер, Р. Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов : учеб. пособие для вузов [Гриф УМО]. Ч. 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат / Р. Т. Шрейнер ; Урал. гос. проф.-пед. ун-т. - Екатеринбург : Издательство УГППУ, 1997. - 277 с.

27 Шекшня, В.Л. Следящие системы / В.Л. Шекшня, С.А. Хризолитова – М. : МЭИ, 1966. – 140 с.

28 Яворский, В.Н. Проектирование инвариантных следящих приводов / В.Н. Яворский – М. : Высшая школа, 1963. – 476 с.

29 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.

30 Данилов, А. Компьютерный практикум по курсу «Теория управления» / А. Данилов - Simulink-моделирование в среде Matlab. МГУИЭ, 2002.

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

32 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.

33 Малышев, Н.Г. Нечеткие модели для экспертных систем / Н.Г. Малышев, Л.С. Берштейн, А.В. Боженюк. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 136с.

34 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.

35 Ульянов, С. В. Мобильные интеллектуальные системы с роботами вертикального перемещения / С. В. Ульянов, - «Системный анализ в науке и образовании» №2, 2011.

36 Дружинина, О.В. Методы исследования устойчивости и управляемости нечетких и стохастических динамических систем / О.В. Дружинина, О.Н. Масина. - М.: ВЦ РАН, 2009.

37 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

38 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.

39 Соловьев, В.А. Многокаскадные нечеткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В.А. Соловьев, С.П. Черный, А.И. Малюкова // Электротехнические комплексы и системы управления, Воронеж: Издательский дом «Кварта», 2010, №3, С.45-51.

40 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.

41 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)

42 Mazandarani, M. Z-differential equations / M. Mazandarani Mehran, Y. Zhao. - IEEE Trans Fuzzy Syst 2019.

43 Sanci, E. Rebalancing the assembly lines: exact solution approaches / E. Sanci, M. Azizoğlu. - Int. J. Prod. Res. 55 (2017) 5991–6010.

44 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.

45 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.

46 Емельянов, С.Г. Автоматизированные нечетко-логические системы управления: Монография / С.Г. Емельянов, В.С. Титов, М.В. Бобырь. - М.: Инфра-М, 2017. - 120 с.

47 Емельянов, С.Г. Адаптивные нечетко-логические системы управления: Монография / С.Г. Емельянов. - М.: АРГАМАК-МЕДИА, 2013. - 184 с.

48 Блишун, А.Ф. Обоснование операций теории нечётких множеств / А. Ф. Блишун, С. Ю. Знатнов – В кн. : Нетрадиционные модели и системы с нечёткими знаниями.

49 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.

50 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.

51 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

52 Терехин, В. Б. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink: учебное пособие / В. Б. Терехин, Ю. Н. Дементьев – Томск: ТПУ, 2013. – 307 с.

53 Якуничева, О.Н. Проектирование электропривода промышленных механизмов: Учебное пособие / О.Н. Якуничева, А.П. Прокофьева. - СПб.: Лань, 2014. - 448 с.

54 Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир., 2009. – 324с.

55 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.

56 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.

57 Искусственный интеллект.- В 3-х кн. Кн.2. Модели и методы: справочник/Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Радио и связь, 1990.- 304 с.

58 Иванкова, Е.П. Оптимизация распределения функций принадлежности при синтезе нечеткого регулятора для систем управления тепловыми процессами / Е.П. Иванкова, В.Г. Косицын, В.А. Соловьев, С.П. Черный - Журнал 1(5) "Информатика и системы управления". - Благовещенск 2003.

59 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

60 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

61 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.

62 Procyk, T. J. A Linguistic Self-Organizing Process Controller / T. J. Procyk, E. H. Mamdani – Automatica. – 1979. – Vol.15. – P. 15 – 30.

63 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.

64 Кандрашина, Е. Ю. Представление знаний о времени и пространстве в интеллектуальных системах / Е.Ю. Кандрашина. – М. : Наука, 1989. – 219с.

65 Ким, Д.П. Теория автоматического управления. Том 1. Линейные системы / Д.П. Ким. - М.: Физматлит, 2007. - 312 с.

66 Палагута, К.А. Интегрированные системы проектирования и управления / К.А. Палагута, А.С. Семенов. - М.: МГИУ, 2008. - 204 с.

67 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

68 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.

69 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.

70 Фираго, Б.И. Регулируемые электроприводы переменного тока: Монография / Б.И. Фираго, Л.Б. Павлячик.. - Мн.: Техноперспектива, 2006. - 363 с.

71 Уланов, Г.М. Динамическая точность и компенсация возмущений в системах автоматического управления / Г.М. Уланов - М.: Издательство "Машиностроение", 1970. – 260 с.

72 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 КнАГУ, Комсомольск-на-Амуре, 2018, № I – 1(33), "Науки о природе и технике". - С.28-33.

73 Черный, С.П. Интеллектуальные подходы к моделированию сложных объектов / С.П. Черный, А.В. Бузикаева. - Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск-на-Амуре, 09-20 апреля 2018г.: в 2 ч. /редкол.: Э. А. Дмитриева (отв. ред.) [и др.]. - Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2018. – Ч.1 - 500 с.

74 Никитенко, Г.В. Электропривод производственных механизмов: Учебное пособие / Г.В. Никитенко. - СПб.: Лань, 2013. - 224 с.

75 Афанасьев, В.Н. Управление нелинейными неопределенными динамическими объектами / В.Н. Афанасьев. - М.: Изд-во URSS, 2015.

76 Анучин, А.С. Системы управления электроприводов / А.С. Анучин. - Вологда: Инфра-Инженерия, 2015. - 373 с.

77 Васильев, В. И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики: учеб. Пособие / В. И. Васильев, С. В. Ильясов. – Уфа: ФГБОУ ВО «УГАТУ», 1995. – 200с.

78 Алиев, Р. А. Производственные системы с искусственным интеллектом // Р. А. Алиев, Н. М. Абдикеев, М. М. Шахназаров.– М.: Радио и связь, 1990.

79 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.

80 Асаи, К. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, С. Иваи, Д. Ватада.- М.: Мир., 2010.- 198с.

81 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.

82 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

83 Tzafestas, S. Incremental fuzzy expert PID control / S. Tzafestas, N. P. Papanikolopoulos. - IEEE Trans. Industr. Electr, 1990. – Vol. 37. – № 5.

84 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.

85 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.

86 Zadeh, L.A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh. - Information and Control, №8, 1965, pp. 338-353

87 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.

88 Fridman, E. Tutorial on Lyapunov-based Methods for Time-delay Systems / E. Fridman. - European J. of Control. 2014. V.20. P.271–283.

89 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.

90 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

91 Дорф, Р. Современные системы управления / Р.Дорф, Р. Бишоп: Перевод с английского. – Лаборатория базовых знаний, 2002.

92 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.

93 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.

94 Орлов, А.И. Задачи оптимизации и нечеткие переменные / А.И. Орлов.- М.: Знание, 1980.- 64 с.

95 Хлыпало, Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах / Е.И. Хлыпало. - ЛЕНИНГРАД. Издательство "ЭНЕРГИЯ". Издание 1973 года, 344 с.

96 Хлыпало, Е.И. Нелинейные системы автоматического регулирования. Расчет и проектирование / Е.И. Хлыпало. - Под ред. чл.-корр. АН СССР. Е. П. Попова. Л.: Энергия. 1967. - 451 с.

97 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.

98 Черный, С. П. Моделирование нечеткой многокаскадной системы с двухзонным регулированием / С. П. Черный, Н. Н. Духнов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению : Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых. В 2-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 05–11 декабря 2022 года / Редколлегия: С.И. Сухоруков

(отв. ред.) [и др.]. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 112-115. – EDN SVICSG.

99 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.

Основные публикации автора по теме диссертации

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

100 Бузикаева, А.В. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечеткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С.И. Сухоруков, С.П. Черный, В.А. Соловьев, А.В. Бузикаева // Электротехнические системы и комплексы. 2022, №2 (55). - С. 32-39. (ВАК, K2)

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

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

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

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

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

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

Публикации в международных наукометрических базах цитирований:

107 Buzikaeva, A.V. Modeling Multi-Cascade Fuzzy Controller with Integrated Implementation of Various Control Laws / S.P. Cherniy, A.V. Buzikayeva, V.I. Susdorf // Proceedings - 2019 International Ural Conference on Electrical Power Engineering, UralCon 2019. 2019. С. 45-48. (Scopus)

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

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

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

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

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

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ:

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

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

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

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

Публикации в других изданиях:

117 Бузикаева, А.В. Реализация процедур управления в системе с двухзонным регулированием на основе интеллектуального подхода / А.В. Бузикаева, А.С. Зенченко, В.В. Павлов // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению. Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых. В 2-х частях. Редколлегия: С.И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. Комсомольск-на-Амуре, 2023. Часть 1. С. 9-11.

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

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

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

Акты внедрения

ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»


 УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по НР
 _____ /А.В. Космынин/
 «19» сентября 2023 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс

Комиссия в составе председателя - декана факультета энергетики и управления, 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 Сухорукова С.И. составили настоящий акт в том, что с 2023 года в Комсомольском-на-Амуре государственном университете внедрены в учебный процесс кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» для направлений подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электропривод и автоматика»; 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 Бузикаевой А.В.

Вид внедренных результатов:

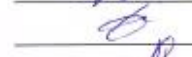
1. Алгоритмы многокаскадного нечеткого управления электроприводами с учетом особенностей их функционирования;
2. Модели комбинированных нечетких логических регуляторов для электроприводов, сочетающие в себе различные механизмы выводов.

Результаты используются в курсах «Интеллектуальные системы управления в электроприводах», «Интеллектуальные технологии в управлении техническими системами», «Искусственный интеллект в задачах управления», а также при курсовом проектировании и при выполнении ВКР.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:

Начальник УМУ

 /А.С. Гудим/
 /В.А. Соловьев /
 /С.В. Стельмашук/
 /С.И. Сухоруков /
 /Е.Е. Поздеева/

А К Т

Об использовании научных результатов диссертационной работы
Бузикаевой Алины Валерьевны на тему
«Разработка и исследование систем электроприводов
на базе многокаскадных нечетких регуляторов»

Результаты диссертационной работы Бузикаевой Алины Валерьевны на тему «Разработка и исследование систем электроприводов на базе многокаскадных нечетких регуляторов» использовались на Комсомольской дистанции электроснабжения Дальневосточной дирекции по энергообеспечению ОАО «РЖД» при проведении работ по оптимизации схем электроснабжения основных потребителей, устройств сигнализации, централизации, блокировки и связи в ходе проекта по реконструкции участка питающей сети Комсомольской дистанции электроснабжения ДВЖД. Применение теоретических и практических данных полученных в ходе диссертационного исследования для элементов и алгоритмов интеллектуальных систем управления электроприводами позволило усовершенствовать систему принятия решений по оптимизации систем электроснабжения при реконструкции участков питающей сети.

Заместитель начальника

- Комсомольской дистанции
электроснабжения ОАО «РЖД»



Барышев Сергей Валерьевич

13.09.2024

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

Свидетельства регистраций программ для ЭВМ

4/22

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022663048

**«ПРОГРАММА РЕАЛИЗАЦИИ
МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА
С МЕХАНИЗМОМ ВЫВОДА СУТЕНО ВО ВНЕШНЕМ
КАСКАДЕ»**

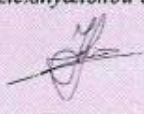
Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
(ФГБОУ ВО «КНАГУ») (RU)*

Авторы: *Черный Сергей Петрович (RU), Бузикаева Алина
Валерьевна (RU), Емельянов Кирилл Андреевич (RU),
Сухоруков Сергей Иванович (RU)*

Заявка № **2022662007**
Дата поступления **27 июня 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **11 июля 2022 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Ю.С. Зубов**

6/12
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022664286

**«ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОКАСКАДНОГО
НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА С
АЛГОРИТМОМ ВЫВОДА МАМДАНИ ВО ВНЕШНЕМ
КАСКАДЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОЦЕДУР
УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ ПИРОЛИЗНОЙ
УСТАНОВКОЙ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-
на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ»)* (RU)

Авторы: *Черный Сергей Петрович (RU), Бузикаева Алина Валерьевна
(RU), Емельянов Кирилл Андреевич (RU), Тимофеев Антон
Константинович (RU)*

Заявка № 2022662885

Дата поступления 06 июля 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 27 июля 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680044

**«ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ
МНОГОКАСКАДНОГО НЕЧЕТКОГО
ЛОГИЧЕСКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА»**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
(ФГБОУ ВО «КнАГУ») (RU)**

Авторы: **Черный Сергей Петрович (RU), Бузикаева Алина
Валерьевна (RU), Охотников Александр Владимирович (RU),
Облогин Данил Юрьевич (RU)**

Заявка № 2022669303

Дата поступления 17 октября 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 26 октября 2022 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023617229

**«ПРОГРАММА РЕАЛИЗАЦИИ НЕЧЕТКОГО
РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
МАЛОМОЩНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ»**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный
университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ»)* (RU)

Авторы: *Бузикаева Алина Валерьевна (RU), Черный Сергей
Петрович (RU), Хрульков Владимир Николаевич (RU)*

Заявка № 2023616075

Дата поступления 28 марта 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 апреля 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

Программная реализация многокаскадного нечеткого логического регулятора для системы управления с двухзонным регулированием скорости

```
#include "dvuhzonnoe_actual_S_M.h"
#include "dvuhzonnoe_actual_S_M_private.h"
B_dvuhzonnoe_actual_S_M_T dvuhzonnoe_actual_S_M_B;
X_dvuhzonnoe_actual_S_M_T dvuhzonnoe_actual_S_M_X;
DW_dvuhzonnoe_actual_S_M_T dvuhzonnoe_actual_S_M_DW;
RT_MODEL_dvuhzonnoe_actual_S_M_T dvuhzonnoe_actual_S_M_M;
RT_MODEL_dvuhzonnoe_actual_S_M_T *const dvuhzonnoe_actual_S_M_M =
    &dvuhzonnoe_actual_S_M_M;
real_T look1_binlxpw(real_T u0, const real_T bp0[], const real_T table[],
    uint32_T maxIndex)
{
    real_T frac;
    uint32_T iRght;
    uint32_T iLeft;
    uint32_T bpIdx;
    if (u0 <= bp0[0U]) {
        iLeft = 0U;
        frac = (u0 - bp0[0U]) / (bp0[1U] - bp0[0U]);
    } else if (u0 < bp0[maxIndex]) {
        /* Binary Search */
        bpIdx = maxIndex >> 1U;
        iLeft = 0U;
        iRght = maxIndex;
        while (iRght - iLeft > 1U) {
            if (u0 < bp0[bpIdx]) {
                iRght = bpIdx;
            } else {
                iLeft = bpIdx;
            }
            bpIdx = (iRght + iLeft) >> 1U;
        }
        frac = (u0 - bp0[iLeft]) / (bp0[iLeft + 1U] - bp0[iLeft]);
    } else {
        iLeft = maxIndex - 1U;
        frac = (u0 - bp0[maxIndex - 1U]) / (bp0[maxIndex] - bp0[maxIndex - 1U]);
    }
    return (table[iLeft + 1U] - table[iLeft]) * frac + table[iLeft];
}

static void rt_ertODEUpdateContinuousStates(RTWSolverInfo *si )
{
    static const real_T rt_ODE3_A[3] = {
        1.0/2.0, 3.0/4.0, 1.0
    };
    static const real_T rt_ODE3_B[3][3] = {
        { 1.0/2.0, 0.0, 0.0 },
        { 0.0, 3.0/4.0, 0.0 },
        { 2.0/9.0, 1.0/3.0, 4.0/9.0 }
    };
    time_T t = rtsiGetT(si);
    time_T tnew = rtsiGetSolverStopTime(si);
    time_T h = rtsiGetStepSize(si);
    real_T *x = rtsiGetContStates(si);
    ODE3_IntgData *id = (ODE3_IntgData *)rtsiGetSolverData(si);
    real_T *y = id->y;
```

```

real_T *f0 = id->f[0];
real_T *f1 = id->f[1];
real_T *f2 = id->f[2];
real_T hB[3];
int_T i;
int_T nXc = 117;
rtsiSetSimTimeStep(si, MINOR_TIME_STEP);
(void) memcpy(y, x,
              (uint_T)nXc*sizeof(real_T));
rtsiSetdX(si, f0);
dvuhzonnoe_actual_S_M_derivatives();
hB[0] = h * rt_ODE3_B[0][0];
for (i = 0; i < nXc; i++) {
    x[i] = y[i] + (f0[i]*hB[0]);
}
rtsiSetT(si, t + h*rt_ODE3_A[0]);
rtsiSetdX(si, f1);
dvuhzonnoe_actual_S_M_step();
dvuhzonnoe_actual_S_M_derivatives();
for (i = 0; i <= 1; i++) {
    hB[i] = h * rt_ODE3_B[1][i];
}
for (i = 0; i < nXc; i++) {
    x[i] = y[i] + (f0[i]*hB[0] + f1[i]*hB[1]);
}
rtsiSetT(si, t + h*rt_ODE3_A[1]);
rtsiSetdX(si, f2);
dvuhzonnoe_actual_S_M_step();
dvuhzonnoe_actual_S_M_derivatives();
for (i = 0; i <= 2; i++) {
    hB[i] = h * rt_ODE3_B[2][i];
}
for (i = 0; i < nXc; i++) {
    x[i] = y[i] + (f0[i]*hB[0] + f1[i]*hB[1] + f2[i]*hB[2]);
}
rtsiSetT(si, tnew);
rtsiSetSimTimeStep(si, MAJOR_TIME_STEP);
}
void dvuhzonnoe_actual_S_M_Actionu1(real_T rtu_u1, real_T *rty_u2)
{
    *rty_u2 = rtu_u1;
}
void dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(real_T rtu_x, real_T *rty_Out1, real_T
    rtp_a, real_T rtp_b)
{
    *rty_Out1 = (rtu_x - rtp_a) / (rtp_b - rtp_a);
}
void dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(real_T rtu_x, real_T *rty_Out1, real_T
    rtp_b, real_T rtp_c)
{
    *rty_Out1 = 1.0 / (rtp_c - rtp_b) * (rtp_c - rtu_x);
}
void dvuhzonnoe_actual_S_M_step(void)
{
    real_T rtb_Sum1;
    real_T rtb_TotalFiringStrength;
    real_T rtb_Product13;
    real_T rtb_Sum1_d;
    real_T rtb_Product12;
    real_T rtb_Sum1_p;
    real_T rtb_Sum53;
    real_T rtb_TotalFiringStrength_l;
    real_T rtb_Product27;

```

```

real_T rtb_Sum1_n;
real_T rtb_Product26;
real_T rtb_Sum1_m;
real_T rtb_Sum66;
real_T rtb_TotalFiringStrength_i;
real_T rtb_Product33;
real_T rtb_Sum1_dd;
real_T rtb_Product32;
real_T rtb_Sum1_o;
real_T rtb_Sum50;
real_T rtb_TotalFiringStrength_pn;
real_T rtb_Product22;
real_T rtb_Sum1_e;
real_T rtb_Product21;
real_T rtb_Sum1_k;
real_T rtb_Sum7;
real_T rtb_TotalFiringStrength_b;
real_T rtb_Product5;
real_T rtb_Sum1_l;
real_T rtb_Product4;
real_T rtb_Sum1_g;
real_T rtb_Sum37;
real_T rtb_TotalFiringStrength_h;
real_T rtb_Product16;
real_T rtb_Sum1_gd;
real_T rtb_Product15;
real_T rtb_Sum1_ku;
real_T rtb_Weighting_cj;
real_T rtb_u_pf;
real_T rtb_Step8;
real_T rtb_Weighting_b1;
real_T rtb_Divide10;
real_T rtb_u_f2;
real_T rtb_Weighting_g;
real_T rtb_Step6;
real_T rtb_u_ix;
real_T rtb_Step7;
real_T rtb_Step5;
real_T rtb_Divide13;
real_T rtb_Weighting_h;
real_T rtb_u_mf;
real_T rtb_u_dk;
int8_T rtAction;
real_T rtb_Weighting;
real_T rtb_Weighting_j;
real_T rtb_u_pk;
real_T rtb_u_fv;
real_T rtb_impMethod_pa[101];
real_T rtb_impMethod_e[101];
real_T rtb_impMethod_p[101];
real_T rtb_impMethod_db[101];
real_T rtb_Sum1_gf;
real_T rtb_Product;
real_T rtb_Sum_h;
real_T rtb_Sum_o;
real_T rtb_Sum1_h;
real_T rtb_Sum_e;
real_T rtb_Sum1_a;
int32_T i;
real_T rtb_Switch_idx_0;
real_T rtb_Switch_idx_1;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if (!(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick0+1)) {

```

```

    rtsiSetSolverStopTime(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        ((dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTickH0 + 1) *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.stepSize0 * 4294967296.0));
} else {
    rtsiSetSolverStopTime(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        ((dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick0 + 1) *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.stepSize0 +
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTickH0 *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.stepSize0 * 4294967296.0));
}
}
if (rtmIsMinorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] = rtsiGetT
        (&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo);
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_k = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_k += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_C_d *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_k;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Weighting_cj = dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0];
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable7 = look1_binlxpw(rtb_Weighting_cj,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable7_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable7_tableData, 7U);
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Weighting_b1 = dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0];
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable8 = look1_binlxpw(rtb_Weighting_b1,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable8_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable8_tableData, 7U);
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Weighting_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable21 = look1_binlxpw
    (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn28_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn28_CSTATE,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable21_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable21_tableData, 5U);
rtb_Divide13 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain18_Gain *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable21;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product6 = rtb_Weighting_h * rtb_Divide13;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_k *
rtb_Divide13;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_k > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch2_Threshold)
{
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch2 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain16_Gain *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_k;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch2 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Constant2_Value;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Divide13 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_d *

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_p;
rtb_Divide10 = 0.0;
rtb_Divide10 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn3_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn3_CSTATE;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable22 = look1_binlxpw(rtb_Divide10,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable22_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable22_tableData, 5U);
rtb_Divide10 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain3_Gain *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable22;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product1 = rtb_Divide13 * rtb_Divide10;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product2 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5 * rtb_Divide10;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_f = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_f += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.C_a *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_a;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Divide10 = dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0];
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable29 = look1_binlxpw(rtb_Divide10,
dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable29_bp01Data,
dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable29_tableData, 7U);
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_u_pf = dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0];
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable30 = look1_binlxpw(rtb_u_pf,
dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable30_bp01Data,
dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable30_tableData, 7U);
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_u_mf = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_C * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE;
rtb_Weighting_g = 0.0;
rtb_Weighting_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn20_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn20_CSTATE;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable29_h = look1_binlxpw(rtb_Weighting_g,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable29_bp01Data_c,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable29_tableData_h, 5U);
rtb_Weighting_g = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain28_Gain *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable29_h;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product29 = rtb_u_mf * rtb_Weighting_g;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product30 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_f *
    rtb_Weighting_g;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5 > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch1_Threshold) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch1 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain1_Gain *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch1 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Constant1_Value;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_f > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch10_Threshold)
{

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch10 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain26_Gain *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_f;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch10 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Constant10_Value;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Weighting_g = 0.0;
rtb_Weighting_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_f *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_b;
rtb_u_ix = 0.0;
rtb_u_ix += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn21_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn21_CSTATE;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable210 = look1_binlxpw(rtb_u_ix,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable210_bp01Data,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable210_tableData, 5U);
rtb_u_ix = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain30_Gain *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable210;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product25 = rtb_Weighting_g * rtb_u_ix;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product28 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u * rtb_u_ix;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch9_Threshold) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch9 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain25_Gain *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch9 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Constant9_Value;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_i = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_i += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_C_i *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_j;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_l = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_C_o *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_f;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_u_ix = dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0];
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable35 = look1_binlxpw(rtb_u_ix,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable35_bp01Data,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable35_tableData, 7U);
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_u_f2 = dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0];
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable36 = look1_binlxpw(rtb_u_f2,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable36_bp01Data,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable36_tableData, 7U);
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}

rtb_u_dk = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u2_C * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u2_CSTATE;
rtb_Step8 = 0.0;
rtb_Step8 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn29_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn29_CSTATE;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable211 = look1_binlxpw(rtb_Step8,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable211_bp01Data,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable211_tableData, 5U);
rtb_Step8 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain34_Gain *

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable211;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product35 = rtb_u_dk * rtb_Step8;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product36 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_l * rtb_Step8;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_l > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch12_Threshold)
{
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch12 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain32_Gain *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_l;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch12 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Constant12_Value;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Step8 = 0.0;
rtb_Step8 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_C * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE;
rtb_Step7 = 0.0;
rtb_Step7 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn30_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn30_CSTATE;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable212 = look1_binlpxw(rtb_Step7,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable212_bp01Data,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable212_tableData, 5U);
rtb_Step7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain36_Gain *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable212;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product31 = rtb_Step8 * rtb_Step7;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product34 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_i * rtb_Step7;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_i > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch11_Threshold)
{
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch11 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain31_Gain *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5_i;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch11 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Constant11_Value;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
}
rtb_Weighting_b1 = look1_binlpxw(rtb_Weighting_b1,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable1_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable1_tableData, 6U);
rtb_Divide10 = look1_binlpxw(rtb_Divide10,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable28_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable28_tableData, 6U);
rtb_u_f2 = look1_binlpxw(rtb_u_f2,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable31_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable31_tableData, 6U);
rtb_u_ix = look1_binlpxw(rtb_u_ix,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable34_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable34_tableData, 6U);
rtb_Weighting_cj = look1_binlpxw(rtb_Weighting_cj,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable4_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable4_tableData, 6U);
rtb_u_pf = look1_binlpxw(rtb_u_pf,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable5_bp01Data,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.DLookupTable5_tableData, 6U);
rtb_Sum1 = rtb_Weighting_b1 - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u5;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Sum1 < -0.47) || (rtb_Sum1 > -0.06321)) {

```

```

    rtAction = 0;
} else if (rtb_Sum1 == -0.3538) {
    rtAction = 1;
} else if (rtb_Sum1 < -0.3538) {
    rtAction = 2;
} else {
    rtAction = 3;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_fo;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_aw;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Sum1, &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_a, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_b);
    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Sum1, &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_b, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_c);
    break;
}
rtb_Step7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge;
rtb_Weighting = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_m * rtb_Step7;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Sum1 < -0.47) || (rtb_Sum1 > 0.46)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Sum1 == -0.06321) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Sum1 < -0.06321) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_b = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_b;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_b = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_aov;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_b = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_lz;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Sum1, &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_b,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_a, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_b);
    break;

```

```

case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Sum1, &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_b,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_b, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_c);
    break;
}
rtb_Step7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_b;
rtb_Weighting_j = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_c * rtb_Step7;
rtb_TotalFiringStrength = rtb_Weighting + rtb_Weighting_j;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if (rtb_TotalFiringStrength < 0.0) {
        rtAction = 0;
    } else {
        rtAction = 1;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_n = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_n;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.One_Value_dg;
    }
    break;
case 1:
    dvuhzonnoe_actual_S_M_Actionu1(rtb_TotalFiringStrength,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a);
    break;
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if (rtb_TotalFiringStrength < 0.0) {
        rtAction = 0;
    } else {
        rtAction = 1;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_h = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_h;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_d = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.One_Value_e;
    }
    break;
case 1:
    dvuhzonnoe_actual_S_M_Actionu1(rtb_TotalFiringStrength,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_d);
    break;
}
rtb_Step7 = (rtb_TotalFiringStrength > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Zero_Value);
if (rtb_Step7 >= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch_Threshold) {
    rtb_Switch_idx_0 = (rtb_Weighting *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2Constant_Value +
        rtb_Weighting_j *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1Constant_Value_l) /
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a;
    rtb_Switch_idx_1 = (rtb_Weighting *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1Constant_Value +
        rtb_Weighting_j *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2Constant_Value_n) /
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_d;
} else {

```

```

    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.MidRange_Value[0];
    rtb_Switch_idx_1 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.MidRange_Value[1];
}
rtb_Product13 = rtb_Sum1 * rtb_Switch_idx_0;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Product13 < -0.2675) || (rtb_Product13 > -0.07246)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Product13 == -0.17) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Product13 < -0.17) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_p = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_p;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_e = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_g4;
    }
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_e = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_hh;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_e, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_a_k,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_b_i);
    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_e, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_b_i,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_c_k);
    break;
}
rtb_Step7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_e;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_Step7 <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_Value[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_Value[i])) {
        rtb_impMethod_pa[i] = rtb_Step7;
    } else {
        rtb_impMethod_pa[i] = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf1_Value[i];
    }
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Product13 < -0.17) || (rtb_Product13 > 0.025)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Product13 == -0.07246) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Product13 < -0.07246) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_e = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_e;
}
}

```

```

switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a2 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_li;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a2 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_ao;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a2, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_a_o,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_b_i);
    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a2, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_b_i,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_c_h);
    break;
}
rtb_Weighting_b1 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_o *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_a2;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_Weighting_b1 <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value[i])) {
        rtb_impMethod_e[i] = rtb_Weighting_b1;
    } else {
        rtb_impMethod_e[i] = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value[i];
    }
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Product13 < -0.0211531914893617) || (rtb_Product13 >
        0.174446808510638)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Product13 == 0.0767468085106383) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Product13 < 0.0767468085106383) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_d = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_d;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_dc = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_j2;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_dc = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_l5v;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_dc, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_a,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_b);
case 3:

```

```

    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_dc, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_b,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_c);
    break;
}
rtb_u_pk = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_j *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_dc;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_u_pk <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_Value[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_Value[i])) {
        rtb_impMethod_p[i] = rtb_u_pk;
    } else {
        rtb_impMethod_p[i] = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_Value[i];
    }
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Product13 < 0.025) || (rtb_Product13 > 0.22)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Product13 == 0.1225) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Product13 < 0.1225) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_c = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_c;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_g = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_bx;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_g = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_cf;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_g, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_a,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_b);

    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_g, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_b,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_c);
    break;
}
rtb_u_fv = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_h *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_g;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_u_fv <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value[i])) {
        rtb_impMethod_db[i] = rtb_u_fv;
    } else {
        rtb_impMethod_db[i] = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value[i];
    }
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {

```

```

if ((rtb_Product13 < 0.1225) || (rtb_Product13 > 0.3175)) {
    rtAction = 0;
} else if (rtb_Product13 == 0.22) {
    rtAction = 1;
} else if (rtb_Product13 < 0.22) {
    rtAction = 2;
} else {
    rtAction = 3;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_o = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_o;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_c = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_cl;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_c = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_an;
    }
    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_c, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_a,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_b);
    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product13,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_c, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_b,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_c);
    break;
}
rtb_Step6 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_j3 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_c;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_impMethod_pa[i] >= rtb_impMethod_e[i]) ||
rtIsNaN(rtb_impMethod_e[i]))
    {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_pa[i];
    } else {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_e[i];
    }

    if (!((rtb_Switch_idx_0 >= rtb_impMethod_p[i]) ||
rtIsNaN(rtb_impMethod_p[i])))
    {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_p[i];
    }
    if (!((rtb_Switch_idx_0 >= rtb_impMethod_db[i]) || rtIsNaN
        (rtb_impMethod_db[i]))) {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_db[i];
    }
    if ((rtb_Step6 <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_Value[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_Value[i])) {
        rtb_Weighting = rtb_Step6;
    } else {
        rtb_Weighting = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_Value[i];
    }
    if ((rtb_Switch_idx_0 >= rtb_Weighting) || rtIsNaN(rtb_Weighting)) {
        rtb_Weighting = rtb_Switch_idx_0;
    }
}

```

```

    }
    rtb_impMethod_pa[i] = rtb_Weighting;
}
rtb_Product = rtb_impMethod_pa[0];
for (i = 0; i < 100; i++) {
    rtb_Product += rtb_impMethod_pa[i + 1];
}
rtb_Sum1_d = rtb_Product;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if (rtb_Sum1_d <= 0.0) {
        rtAction = 0;
    } else {
        rtAction = 1;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_od = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_od;
}
switch (rtAction) {
    case 0:
        if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
            dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_k = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.One_Value_a;
        }
        break;
}
rtb_Weighting_g = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_m5w *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_om;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_Weighting_g <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_Value_e3[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_Value_e3[i])) {
        rtb_impMethod_p[i] = rtb_Weighting_g;
    } else {
        rtb_impMethod_p[i] = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf3_Value_e3[i];
    }
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Product15 < 0.025) || (rtb_Product15 > 0.22)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Product15 == 0.1225) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Product15 < 0.1225) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_kv = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_kv;
}
switch (rtAction) {
    case 0:
        if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
            dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_coc = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_nz;
        }
        break;
    case 1:
        if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
            dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_coc = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Value_le;
        }
        break;
    case 2:
        dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product15,
            &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_coc, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_a_bi,

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_b_jq);
    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product15,
    &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_coc, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_b_jq,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf4_c_is);
    break;
}
rtb_Weighting_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_f4 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_coc;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_Weighting_h <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value_f[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value_f[i])) {
        rtb_impMethod_e[i] = rtb_Weighting_h;
    } else {
        rtb_impMethod_e[i] = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf2_Value_f[i];
    }
}
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if ((rtb_Product15 < 0.1225) || (rtb_Product15 > 0.3175)) {
        rtAction = 0;
    } else if (rtb_Product15 == 0.22) {
        rtAction = 1;
    } else if (rtb_Product15 < 0.22) {
        rtAction = 2;
    } else {
        rtAction = 3;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_hz = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_hz;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_bg = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_gn;
    }
    break;
case 1:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_bg = dvuhzonnoe_actual_S_M_P._Value_nv;
    }

    break;
case 2:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem3(rtb_Product15,
    &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_bg, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_a_gl,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_b_fq);
    break;
case 3:
    dvuhzonnoe_a_IfActionSubsystem2(rtb_Product15,
    &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_bg, dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_b_fq,
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_c_m);
    break;
}
rtb_Weighting_b1 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Weight_Value_jd *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_bg;
for (i = 0; i < 101; i++) {
    if ((rtb_impMethod_pa[i] >= rtb_impMethod_db[i]) || rtIsNaN
        (rtb_impMethod_db[i])) {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_pa[i];
    } else {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_db[i];
    }
}

```

```

    }
    if (!((rtb_Switch_idx_0 >= rtb_impMethod_p[i]) ||
rtIsNaN(rtb_impMethod_p[i])))
    {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_p[i];
    }
    if (!((rtb_Switch_idx_0 >= rtb_impMethod_e[i]) ||
rtIsNaN(rtb_impMethod_e[i])))
    {
        rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_e[i];
    }
    if ((rtb_Weighting_b1 <= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_Value_f[i]) || rtIsNaN
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_Value_f[i])) {
        rtb_Weighting = rtb_Weighting_b1;
    } else {
        rtb_Weighting = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.mf5_Value_f[i];
    }
    if ((rtb_Switch_idx_0 >= rtb_Weighting) || rtIsNaN(rtb_Weighting)) {
        rtb_Weighting = rtb_Switch_idx_0;
    }
    rtb_impMethod_pa[i] = rtb_Weighting;
}
rtb_Product = rtb_impMethod_pa[0];
for (i = 0; i < 100; i++) {
    rtb_Product += rtb_impMethod_pa[i + 1];
}
rtb_Sum1_ku = rtb_Product;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    if (rtb_Sum1_ku <= 0.0) {
        rtAction = 0;
    } else {
        rtAction = 1;
    }
    dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_o5 = rtAction;
} else {
    rtAction = dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_o5;
}
switch (rtAction) {
case 0:
    if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_ot = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.One_Value_pa;
    }
    break;
case 1:
    dvuhzonnoe_actual_S_M_Actionu1(rtb_Sum1_ku,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_ot);
    break;
}
if (((((rtb_Step6 + rtb_Step8) + rtb_Weighting_g) + rtb_Weighting_h) +
    rtb_Weighting_b1 > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Zero_Value_dz) >=
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Switch_Threshold_mu) {
    for (i = 0; i < 101; i++) {
        rtb_impMethod_pa[i] *= dvuhzonnoe_actual_S_M_P.xdata_Value_a[i];
    }
    rtb_Switch_idx_0 = rtb_impMethod_pa[0];
    for (i = 0; i < 100; i++) {
        rtb_Switch_idx_0 += rtb_impMethod_pa[i + 1];
    }
    rtb_Step6 = rtb_Switch_idx_0 / dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Merge_ot;
} else {
    rtb_Step6 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.MidRange_Value_a;
}
rtb_Weighting = rtb_Step5 + rtb_Step6;

```

```

rtb_Step5 = 0.0;
rtb_Step5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_dd *
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gf;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain12 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain12_Gain *
rtb_Step5;
rtb_Step5 = 0.0;
rtb_Step5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_iw *
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_de;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain14 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain14_Gain *
rtb_Step5;
rtb_Step5 = 0.0;
rtb_Step5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_lw *
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_h;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain21 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain21_Gain *
rtb_Step5;
rtb_Step5 = 0.0;
rtb_Step5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_bb *
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_j;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain23 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain23_Gain *
rtb_Step5;
rtb_Step5 = 0.0;
rtb_Step5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_n *
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_di;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain6 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain6_Gain * rtb_Step5;
rtb_Step5 = 0.0;
rtb_Step5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_k *
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_o;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain8 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Gain8_Gain * rtb_Step5;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation11_UpperSat) {
    rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation11_UpperSat;
} else {
    if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation11_LowerSat) {
        rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation11_LowerSat;
    }
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum26 = rtb_Sum_h - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_jw *
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable24;
rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_o *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dc + dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_l *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum26;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation14_UpperSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation14 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation14_UpperSat;
} else if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation14_LowerSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation14 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation14_LowerSat;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation14 = rtb_Sum_h;
}
if (rtb_Sum_o > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation15_UpperSat) {
    rtb_Sum_o = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation15_UpperSat;
} else {
    if (rtb_Sum_o < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation15_LowerSat) {
        rtb_Sum_o = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation15_LowerSat;
    }
}
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum19 = rtb_Sum_o - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_go *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable23;
rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_en *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_bb + dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_bg *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum19;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation16_UpperSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation16 =

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation16_UpperSat;
} else if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation16_LowerSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation16 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation16_LowerSat;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation16 = rtb_Sum_h;
}
if (rtb_Divide10 > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation18_UpperSat) {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation18_UpperSat;
} else if (rtb_Divide10 < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation18_LowerSat) {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation18_LowerSat;
} else {
    rtb_Switch_idx_0 = rtb_Divide10;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum36 = rtb_Switch_idx_0 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_ip * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable26;
rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_e4 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_lb + dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_bv *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum36;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation21_UpperSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation21 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation21_UpperSat;
} else if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation21_LowerSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation21 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation21_LowerSat;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation21 = rtb_Sum_h;
}
if (rtb_Step7 > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation22_UpperSat) {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation22_UpperSat;
} else if (rtb_Step7 < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation22_LowerSat) {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation22_LowerSat;
} else {
    rtb_Switch_idx_0 = rtb_Step7;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum30 = rtb_Switch_idx_0 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_ha * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable25;
rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_dg *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dcn + dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_c *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum30;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation23_UpperSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation23 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation23_UpperSat;
} else if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation23_LowerSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation23 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation23_LowerSat;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation23 = rtb_Sum_h;
}
if (rtb_Divide13 > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation26_UpperSat) {
    rtb_Divide13 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation26_UpperSat;
} else {
    if (rtb_Divide13 < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation26_LowerSat) {
        rtb_Divide13 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation26_LowerSat;
    }
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum49 = rtb_Divide13 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_dx * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable28;
rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_ng *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gq + dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_i *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum49;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation29_UpperSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation29 =

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation29_UpperSat;
} else if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation29_LowerSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation29 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation29_LowerSat;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation29 = rtb_Sum_h;
}
if (rtb_u_ix > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation30_UpperSat) {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation30_UpperSat;
} else if (rtb_u_ix < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation30_LowerSat) {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation30_LowerSat;
} else {
    rtb_Switch_idx_0 = rtb_u_ix;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum43 = rtb_Switch_idx_0 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_be * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable27;
rtb_Sum_h = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_hs *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_lm + dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_p *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum43;
if (rtb_Sum_h > dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation31_UpperSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation31 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation31_UpperSat;
} else if (rtb_Sum_h < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation31_LowerSat) {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation31 =
        dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Saturation31_LowerSat;
} else {
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation31 = rtb_Sum_h;
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step5_Time)
{
    rtb_Step5 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step5_Y0;
} else {
    rtb_Step5 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step5_YFinal;
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step6_Time)
{
    rtb_Step6 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step6_Y0;
} else {
    rtb_Step6 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step6_YFinal;
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step7_Time)
{
    rtb_Step7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step7_Y0;
} else {
    rtb_Step7 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step7_YFinal;
}
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step8_Time)
{
    rtb_Step8 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step8_Y0;
} else {
    rtb_Step8 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step8_YFinal;
}
rtb_u_ix = 0.0;
rtb_u_ix += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_ap *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ep;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum10 = rtb_u_ix - dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product10;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum11 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product9 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable9;
rtb_u_ix = fabs(dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product10);
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step4_Time)
{
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step4_Y0;
} else {

```

```

    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step4_YFinal;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum12 = rtb_Switch_idx_0 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_pa * rtb_u_ix;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum20 = rtb_Weighting_j -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_aa * rtb_u_pk;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum22 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_id *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fp - dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product8;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum24 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product3 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable13;
if (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] < dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step3_Time)
{
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step3_Y0;
} else {
    rtb_Switch_idx_0 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.Step3_YFinal;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum25 = rtb_Switch_idx_0 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_cw5 * fabs(dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product8);
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum27 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_bo *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_h4 - dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product11;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum28 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product18 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable20;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum29 = rtb_Step6 - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_de *
    fabs(dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product11);
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum31 = rtb_Weighting /
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Switch5 - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_ad *
    rtb_u_f2;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum33 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_cw *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ad - dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product17;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum34 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product14 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable18;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum35 = rtb_Step5 - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_o *
    fabs(dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product17);
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum39 = rtb_Sum_e - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_gk *
    rtb_u_dk;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum40 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_gr *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_nz - dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product19;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum41 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product24 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable26_k;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum42 = rtb_Step8 - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_m *
    fabs(dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product19);
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum44 = rtb_Sum1_h - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_n *
    rtb_u_pf;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum46 = dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_am *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ms - dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product23;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum47 = dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product20 -
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.DLookupTable24_f;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum48 = rtb_Step7 - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_mu *
    fabs(dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Product23);
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum52 = rtb_Sum1_a - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_g2
    * rtb_u_mf;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum9 = rtb_Sum1_gf - dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_Gain_om
    * rtb_u_fv;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn11 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn11 +=
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn11_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn11_CSTATE;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn11 +=
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn11_D * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain14;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn13 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn13 +=
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn13_C *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn13_CSTATE;

```

```

dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn13 +=
    dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn13_D * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain12;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn4 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn4_C
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn4_CSTATE;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn4_D
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain23;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn5 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn5_C
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn5_CSTATE;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn5 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn5_D
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain8;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn6 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn6 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn6_C
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn6_CSTATE;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn6 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn6_D
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain21;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn7 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn7 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn7_C
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn7_CSTATE;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn7 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn7_D
    * dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain6;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_g = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_lz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_jx;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_ga *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum9;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_a4 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_a4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_lj *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ee;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_a4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_bn *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum20;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_ja = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_ja += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_lx *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ch;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_ja += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_jk *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum39;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_p = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_n1 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ic;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_ak *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum31;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_l = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_e3 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_db;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_ja *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum52;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_h = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_h += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_C_ia *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_f0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_h += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_D_gc *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum44;
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    rt_UpdateTXYLogVars(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo,
        (dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t));
}
if (rtmIsMajorTimeStep(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)) {
    {
        if ((rtmGetTFinal(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)!=-1) &&
            !((rtmGetTFinal(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)-
                ((dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick1+
                    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTickH1* 4294967296.0)) *
                    0.6)) > ((dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick1+

```

```

        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTickH1*
        4294967296.0)) * 0.6) * (DBL_EPSILON))) {
    rtmSetErrorStatus(dvuhzonnoe_actual_S_M_M, "Simulation finished");
}
}

rt_ertODEUpdateContinuousStates(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo);
if (!(++dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick0)) {
    ++dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTickH0;
}
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.t[0] = rtsiGetSolverStopTime
(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo);
{
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick1++;
    if (!dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTick1) {
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.clockTickH1++;
    }
}
}
}
void dvuhzonnoe_actual_S_M_derivatives(void)
{
    XDot_dvuhzonnoe_actual_S_M_T *_rtXdot;
    _rtXdot = ((XDot_dvuhzonnoe_actual_S_M_T *)
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.derivs);
    _rtXdot->u5_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->u5_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE;
    _rtXdot->u5_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum4;
    _rtXdot->u5_CSTATE_k = 0.0;
    _rtXdot->u5_CSTATE_k += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_o *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_k;
    _rtXdot->u5_CSTATE_k += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum16;
    _rtXdot->u_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE;
    _rtXdot->u_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum15;
    _rtXdot->TransferFcn28_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->TransferFcn28_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn28_A *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn28_CSTATE;
    _rtXdot->TransferFcn28_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn27;
    _rtXdot->u_CSTATE_p = 0.0;
    _rtXdot->u_CSTATE_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_n *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_p;
    _rtXdot->u_CSTATE_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum3;
    _rtXdot->TransferFcn3_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->TransferFcn3_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn3_A *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn3_CSTATE;
    _rtXdot->TransferFcn3_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn2;
    _rtXdot->_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE;
    _rtXdot->_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum63;
    _rtXdot->_CSTATE_a = 0.0;
    _rtXdot->_CSTATE_a += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_o *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_a;
    _rtXdot->_CSTATE_a += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum57;
    _rtXdot->u0_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->u0_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_A *
        dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE;
    _rtXdot->u0_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum56;
    _rtXdot->TransferFcn20_CSTATE = 0.0;
    _rtXdot->TransferFcn20_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn20_A *

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn20_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn20_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn19;
_rtXdot->u_CSTATE_b = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_b += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_nb *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_b;
_rtXdot->u_CSTATE_b += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum62;
_rtXdot->TransferFcn21_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn21_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn21_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn21_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn21_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn17;
_rtXdot->u5_CSTATE_j = 0.0;
_rtXdot->u5_CSTATE_j += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_l *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_j;
_rtXdot->u5_CSTATE_j += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum76;
_rtXdot->u5_CSTATE_f = 0.0;
_rtXdot->u5_CSTATE_f += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_d *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_f;
_rtXdot->u5_CSTATE_f += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum70;
_rtXdot->u2_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->u2_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u2_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u2_CSTATE;
_rtXdot->u2_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum69;
_rtXdot->TransferFcn29_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn29_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn29_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn29_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn29_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn26;
_rtXdot->u1_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->u1_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE;
_rtXdot->u1_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum75;
_rtXdot->TransferFcn30_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn30_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn30_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn30_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn30_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn24;
_rtXdot->u_CSTATE_f = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_f += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_i *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_f;
_rtXdot->u_CSTATE_f += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum64;
_rtXdot->u_CSTATE_fy = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_fy += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_g *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fy;
_rtXdot->u_CSTATE_fy += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum54;
_rtXdot->u_CSTATE_d = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_d += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_m *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_d;
_rtXdot->u_CSTATE_d += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum5;
_rtXdot->u_CSTATE_m = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_m += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_p *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_m;
_rtXdot->u_CSTATE_m += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum58;
_rtXdot->u1_CSTATE_c = 0.0;
_rtXdot->u1_CSTATE_c += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_A_j *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_c;
_rtXdot->u1_CSTATE_c += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum77;
_rtXdot->u_CSTATE_i = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_i += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_c *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_i;
_rtXdot->u_CSTATE_i += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum67;
_rtXdot->u0_CSTATE_j = 0.0;
_rtXdot->u0_CSTATE_j += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_A_b *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_j;
_rtXdot->u0_CSTATE_j += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum71;
_rtXdot->_CSTATE_e = 0.0;

```

```

_rtXdot->_CSTATE_e += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_d *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_e;
_rtXdot->_CSTATE_e += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum13;
_rtXdot->_CSTATE_o = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_o += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_k *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_o;
_rtXdot->_CSTATE_o += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum17;
_rtXdot->_CSTATE_e2 = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_e2 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_i *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_e2;
_rtXdot->_CSTATE_e2 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation9;
_rtXdot->u_CSTATE_g = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_d *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_g;
_rtXdot->u_CSTATE_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation6;
_rtXdot->u_CSTATE_d4 = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_d4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_j *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_d4;
_rtXdot->u_CSTATE_d4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation40;
_rtXdot->u_CSTATE_dp = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_dp += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_pz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dp;
_rtXdot->u_CSTATE_dp += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation38;
_rtXdot->u0_CSTATE_o = 0.0;
_rtXdot->u0_CSTATE_o += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_A_c *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_o;
_rtXdot->u0_CSTATE_o += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation48;
_rtXdot->u1_CSTATE_ct = 0.0;
_rtXdot->u1_CSTATE_ct += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_A_m *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_ct;
_rtXdot->u1_CSTATE_ct += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation46;
_rtXdot->u_CSTATE_fs = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_fs += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_a *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fs;
_rtXdot->u_CSTATE_fs += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum65;
_rtXdot->u_CSTATE_dt = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_dt += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_f *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dt;
_rtXdot->u_CSTATE_dt += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum59;
_rtXdot->u1_CSTATE_c3 = 0.0;
_rtXdot->u1_CSTATE_c3 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_A_ma *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_c3;
_rtXdot->u1_CSTATE_c3 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum78;
_rtXdot->u0_CSTATE_p = 0.0;
_rtXdot->u0_CSTATE_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_A_l *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_p;
_rtXdot->u0_CSTATE_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum72;
_rtXdot->u_CSTATE_e = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_e += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ic *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_e;
_rtXdot->u_CSTATE_e += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum6;
_rtXdot->_CSTATE_p = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_l *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_p;
_rtXdot->_CSTATE_p += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum18;
_rtXdot->_CSTATE_h = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_h += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_b *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_h;
_rtXdot->_CSTATE_h += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_o;
_rtXdot->u_CSTATE_px = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_px += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_gj *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_px;
_rtXdot->u_CSTATE_px += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_e;

```

```

_rtXdot->u_CSTATE_pi = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_pi += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_fp *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_pi;
_rtXdot->u_CSTATE_pi += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_j;
_rtXdot->u_CSTATE_c = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_c += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_fe *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_c;
_rtXdot->u_CSTATE_c += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_a;
_rtXdot->u0_CSTATE_c = 0.0;
_rtXdot->u0_CSTATE_c += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_A_o *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_c;
_rtXdot->u0_CSTATE_c += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u0;
_rtXdot->u1_CSTATE_g = 0.0;
_rtXdot->u1_CSTATE_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_A_h *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_g;
_rtXdot->u1_CSTATE_g += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u1;
_rtXdot->TransferFcn17_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn17_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn17_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn17_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn17_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain29;
_rtXdot->TransferFcn19_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn19_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn19_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn19_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn19_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain27;
_rtXdot->TransferFcn2_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn2_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn2_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn2_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn2_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain2;
_rtXdot->TransferFcn24_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn24_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn24_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn24_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn24_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain35;
_rtXdot->TransferFcn26_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn26_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn26_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn26_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn26_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain33;
_rtXdot->TransferFcn27_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn27_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn27_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn27_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn27_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain17;
_rtXdot->_CSTATE_d = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_d += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_h *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_d;
_rtXdot->_CSTATE_d += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum14;
_rtXdot->u_CSTATE_ft = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ft += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_l *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ft;
_rtXdot->u_CSTATE_ft += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum2;
_rtXdot->u0_CSTATE_ox = 0.0;
_rtXdot->u0_CSTATE_ox += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u0_A_i *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_ox;
_rtXdot->u0_CSTATE_ox += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum68;
_rtXdot->u1_CSTATE_l = 0.0;
_rtXdot->u1_CSTATE_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u1_A_i *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_l;
_rtXdot->u1_CSTATE_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum73;
_rtXdot->u_CSTATE_ii = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ii += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_g3 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ii;
_rtXdot->u_CSTATE_ii += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum55;
_rtXdot->u_CSTATE_n = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_n += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_fu *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_n;

```

```

_rtXdot->u_CSTATE_n += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum60;
_rtXdot->u_CSTATE_k = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_k += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_pm *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_k;
_rtXdot->u_CSTATE_k += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum10;
_rtXdot->TransferFcn8_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn8_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn8_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn8_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn8_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn7;
_rtXdot->_CSTATE_n = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_n += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_bj *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_n;
_rtXdot->_CSTATE_n += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum11;
_rtXdot->u_CSTATE_ip = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ip += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_nu *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ip;
_rtXdot->u_CSTATE_ip += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum22;
_rtXdot->TransferFcn9_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn9_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn9_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn9_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn9_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn5;
_rtXdot->_CSTATE_a0 = 0.0;
_rtXdot->_CSTATE_a0 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P._A_p *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X._CSTATE_a0;
_rtXdot->_CSTATE_a0 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum24;
_rtXdot->u_CSTATE_eg = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_eg += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_dg *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_eg;
_rtXdot->u_CSTATE_eg += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum27;
_rtXdot->TransferFcn14_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn14_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn14_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn14_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn14_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn13;
_rtXdot->u5_CSTATE_n = 0.0;
_rtXdot->u5_CSTATE_n += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_m *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_n;
_rtXdot->u5_CSTATE_n += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum28;
_rtXdot->u_CSTATE_gn = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_gn += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_k *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gn;
_rtXdot->u_CSTATE_gn += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum33;
_rtXdot->TransferFcn15_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn15_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn15_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn15_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn15_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn11;
_rtXdot->u5_CSTATE_je = 0.0;
_rtXdot->u5_CSTATE_je += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_c *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_je;
_rtXdot->u5_CSTATE_je += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum34;
_rtXdot->u_CSTATE_l = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_py *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_l;
_rtXdot->u_CSTATE_l += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum40;
_rtXdot->TransferFcn10_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn10_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn10_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn10_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn10_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn6;
_rtXdot->u5_CSTATE_kb = 0.0;
_rtXdot->u5_CSTATE_kb += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_a *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_kb;
_rtXdot->u5_CSTATE_kb += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum41;
_rtXdot->u_CSTATE_nt = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_nt += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_gi *

```

```

    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_nt;
_rtXdot->u_CSTATE_nt += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum46;
_rtXdot->TransferFcn12_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn12_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn12_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn12_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn12_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.TransferFcn4;
_rtXdot->u5_CSTATE_fb = 0.0;
_rtXdot->u5_CSTATE_fb += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u5_A_b *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_fb;
_rtXdot->u5_CSTATE_fb += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum47;
_rtXdot->u_CSTATE_gw = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_gw += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ct *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gw;
_rtXdot->u_CSTATE_gw += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum35;
_rtXdot->u_CSTATE_dg = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_dg += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_nz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dg;
_rtXdot->u_CSTATE_dg += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum38;
_rtXdot->u_CSTATE_e1 = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_e1 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_e *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_e1;
_rtXdot->u_CSTATE_e1 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum29;
_rtXdot->u_CSTATE_if = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_if += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_nf *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_if;
_rtXdot->u_CSTATE_if += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum48;
_rtXdot->u_CSTATE_a = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_a += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_at *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_a;
_rtXdot->u_CSTATE_a += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum51;
_rtXdot->u_CSTATE_kg = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_kg += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_p0 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_kg;
_rtXdot->u_CSTATE_kg += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum42;
_rtXdot->u_CSTATE_mb = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_mb += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_g4 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_mb;
_rtXdot->u_CSTATE_mb += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum25;
_rtXdot->u_CSTATE_fj = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_fj += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_pi *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fj;
_rtXdot->u_CSTATE_fj += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum8;
_rtXdot->u_CSTATE_kk = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_kk += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_kp *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_kk;
_rtXdot->u_CSTATE_kk += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum12;
_rtXdot->u_CSTATE_gf = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_gf += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_cz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gf;
_rtXdot->u_CSTATE_gf += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation23;
_rtXdot->u_CSTATE_de = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_de += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_gn *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_de;
_rtXdot->u_CSTATE_de += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation21;
_rtXdot->u_CSTATE_h = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_h += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ne *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_h;
_rtXdot->u_CSTATE_h += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation31;
_rtXdot->u_CSTATE_j = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_j += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_nv *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_j;
_rtXdot->u_CSTATE_j += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation29;
_rtXdot->u_CSTATE_di = 0.0;

```

```

_rtXdot->u_CSTATE_di += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_fw *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_di;
_rtXdot->u_CSTATE_di += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation16;
_rtXdot->u_CSTATE_o = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_o += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_b *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_o;
_rtXdot->u_CSTATE_o += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Saturation14;
_rtXdot->u_CSTATE_dc = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_dc += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_bn *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dc;
_rtXdot->u_CSTATE_dc += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum26;
_rtXdot->u_CSTATE_bb = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_bb += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_o *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_bb;
_rtXdot->u_CSTATE_bb += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum19;
_rtXdot->u_CSTATE_lb = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_lb += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_eu *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_lb;
_rtXdot->u_CSTATE_lb += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum36;
_rtXdot->u_CSTATE_dcn = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_dcn += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ab *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dcn;
_rtXdot->u_CSTATE_dcn += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum30;
_rtXdot->u_CSTATE_gq = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_gq += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_n4 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gq;
_rtXdot->u_CSTATE_gq += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum49;
_rtXdot->u_CSTATE_lm = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_lm += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_fc *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_lm;
_rtXdot->u_CSTATE_lm += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum43;
_rtXdot->u_CSTATE_ep = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ep += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_dk *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ep;
_rtXdot->u_CSTATE_ep += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_g;
_rtXdot->u_CSTATE_fp = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_fp += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_h *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fp;
_rtXdot->u_CSTATE_fp += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_a4;
_rtXdot->u_CSTATE_h4 = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_h4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_hz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_h4;
_rtXdot->u_CSTATE_h4 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_ja;
_rtXdot->u_CSTATE_ad = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ad += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_mq *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ad;
_rtXdot->u_CSTATE_ad += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_p;
_rtXdot->u_CSTATE_nz = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_nz += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_fq *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_nz;
_rtXdot->u_CSTATE_nz += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_l;
_rtXdot->u_CSTATE_ms = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ms += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ja *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ms;
_rtXdot->u_CSTATE_ms += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.u_h;
_rtXdot->TransferFcn11_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn11_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn11_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn11_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn11_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain14;
_rtXdot->TransferFcn13_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn13_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn13_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn13_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn13_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain12;

```

```

_rtXdot->TransferFcn4_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn4_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn4_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn4_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn4_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain23;
_rtXdot->TransferFcn5_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn5_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn5_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn5_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn5_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain8;
_rtXdot->TransferFcn6_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn6_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn6_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn6_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn6_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain21;
_rtXdot->TransferFcn7_CSTATE = 0.0;
_rtXdot->TransferFcn7_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.TransferFcn7_A *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn7_CSTATE;
_rtXdot->TransferFcn7_CSTATE += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Gain6;
_rtXdot->u_CSTATE_jx = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_jx += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ae *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_jx;
_rtXdot->u_CSTATE_jx += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum9;
_rtXdot->u_CSTATE_ee = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ee += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_jz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ee;
_rtXdot->u_CSTATE_ee += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum20;
_rtXdot->u_CSTATE_ch = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ch += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_pq *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ch;
_rtXdot->u_CSTATE_ch += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum39;
_rtXdot->u_CSTATE_ic = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_ic += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_ky *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ic;
_rtXdot->u_CSTATE_ic += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum31;
_rtXdot->u_CSTATE_db = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_db += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_d3 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_db;
_rtXdot->u_CSTATE_db += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum52;
_rtXdot->u_CSTATE_f0 = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_f0 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_p4 *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_f0;
_rtXdot->u_CSTATE_f0 += dvuhzonnoe_actual_S_M_B.Sum44;
_rtXdot->u_CSTATE_o0 = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_o0 += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_mz *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_o0;
_rtXdot->u_CSTATE_o0 += 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_hm = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_hm += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_lg *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_hm;
_rtXdot->u_CSTATE_hm += 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_bq = 0.0;
_rtXdot->u_CSTATE_bq += dvuhzonnoe_actual_S_M_P.u_A_pa *
    dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_bq;
_rtXdot->u_CSTATE_bq += 0.0;
}
void dvuhzonnoe_actual_S_M_initialize(void)
{
    rt_InitInfAndNaN(sizeof(real_T));
    (void) memset((void *)dvuhzonnoe_actual_S_M_M, 0,
        sizeof(RT_MODEL_dvuhzonnoe_actual_S__T));

    {
        rtsiSetSimTimeStepPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
            &dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.simTimeStep);
        rtsiSetTPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo, &rtmGetTPtr

```

```

        (dvuhzonnoe_actual_S_M_M));
    rtsiSetStepSizePtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.stepSize0);
    rtsiSetdXPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.derivs);
    rtsiSetContStatesPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo, (real_T **))
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.contStates);
    rtsiSetNumContStatesPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        &dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Sizes.numContStates);
    rtsiSetErrorStatusPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        (&rtmGetErrorStatus(dvuhzonnoe_actual_S_M_M)));
    rtsiSetRTModelPtr(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo,
        dvuhzonnoe_actual_S_M_M);
}
rtsiSetSimTimeStep(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo, MAJOR_TIME_STEP);
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.intgData.y =
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.odeY;
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.intgData.f[0] =
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.odeF[0];
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.intgData.f[1] =
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.odeF[1];
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.intgData.f[2] =
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.odeF[2];
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.contStates = ((X_dvuhzonnoe_actual_S_M_T *)
    &dvuhzonnoe_actual_S_M_X);
rtsiSetSolverData(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo, (void *)
    &dvuhzonnoe_actual_S_M_M->ModelData.intgData);
rtsiSetSolverName(&dvuhzonnoe_actual_S_M_M->solverInfo, "ode3");
rtmSetTPtr(dvuhzonnoe_actual_S_M_M, &dvuhzonnoe_actual_S_M_M-
>Timing.tArray[0]);
rtmSetTFinal(dvuhzonnoe_actual_S_M_M, 30.0);
dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.stepSize0 = 0.6;
{
    static RTWLogInfo rt_DataLoggingInfo;
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo = &rt_DataLoggingInfo;
}
{
    rtliSetLogXSignalInfo(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, (NULL));
    rtliSetLogXSignalPtrs(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, (NULL));
    rtliSetLogT(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, "tout");
    rtliSetLogX(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, "");
    rtliSetLogXFinal(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, "");
    rtliSetLogVarNameModifier(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, "rt_");
    rtliSetLogFormat(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, 0);
    rtliSetLogMaxRows(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, 1000);
    rtliSetLogDecimation(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, 1);
    rtliSetLogY(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, "");
    rtliSetLogYSignalInfo(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, (NULL));
    rtliSetLogYSignalPtrs(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, (NULL));
}
(void) memset((void *) &dvuhzonnoe_actual_S_M_B, 0,
    sizeof(B_dvuhzonnoe_actual_S_M_T));
{
    (void) memset((void *) &dvuhzonnoe_actual_S_M_X, 0,
        sizeof(X_dvuhzonnoe_actual_S_M_T));
}
(void) memset((void *) &dvuhzonnoe_actual_S_M_DW, 0,
    sizeof(DW_dvuhzonnoe_actual_S_M_T));
rt_StartDataLoggingWithStartTime(dvuhzonnoe_actual_S_M_M->rtwLogInfo, 0.0,
    rtmGetTFinal(dvuhzonnoe_actual_S_M_M),
    dvuhzonnoe_actual_S_M_M->Timing.stepSize0, (&rtmGetErrorStatus
    (dvuhzonnoe_actual_S_M_M)));
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem = -1;

```



```

dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_bd = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_by = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ee = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_av = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_j5 = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ai = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_pl = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_cb = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_bj = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ael = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_mp = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ld = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ix = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ev = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_du = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_fa = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_oq = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_fg = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ft = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ou = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_f0 = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ph = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_gm = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_ao = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_mr = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_pz = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_kv = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_hz = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_DW.If_ActiveSubsystem_o5 = -1;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_k = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn28_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_p = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn3_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_a = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn20_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_b = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn21_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_j = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_f = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u2_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn29_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn30_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_f = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fy = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_d = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_m = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_c = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_i = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_j = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_e = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_o = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_e2 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_g = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_d4 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dp = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_o = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_ct = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_fs = 0.0;

```

```

dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dt = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_c3 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_p = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_e = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_p = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_h = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_px = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_pi = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_c = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_c = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_g = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn17_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn19_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn2_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn24_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn26_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn27_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_d = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ft = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u0_CSTATE_ox = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u1_CSTATE_l = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ii = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_n = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_k = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn8_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_n = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ip = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn9_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.CSTATE_a0 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_eg = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn14_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u5_CSTATE_n = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_bb = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_lb = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_dcn = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_gq = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_lm = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ep = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ad = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_nz = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ms = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn11_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn13_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn4_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn5_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn6_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.TransferFcn7_CSTATE = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_jx = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ee = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ch = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_ic = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_db = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_f0 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_o0 = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_hm = 0.0;
dvuhzonnoe_actual_S_M_X.u_CSTATE_bq = 0.0;
}
void dvuhzonnoe_actual_S_M_terminate(void)
{
}

```