

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»

Факультет «Аэрокосмический»

Кафедра «Летательные аппараты»

Направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,  
д.т.н., проф.

\_\_\_\_\_/ В.Г. Дегтярь /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**РУЛЕВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД С НЕЧЕТКИМ УПРАВЛЕНИЕМ**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – 13.03.02.2020.616.11 ПЗ ВКР

Руководитель ВКР: к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/ Д.А. Курносов /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

Автор работы:

Студент группы П-428

\_\_\_\_\_/И.Е. Попов /  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

## АННОТАЦИЯ

Попов И.Е. Рулевой электропривод с нечетким управлением – Челябинск: ЮУрГУ, П-428, 2020, 67 с., 35 ил., 3 табл., библиогр. список – 27 наим.

Выпускная квалификационная работа состоит из: введения, четырех глав, которые поделены на параграфы, заключения, списка литературы.

В первой главе выполнен анализ рулевых электроприводов, рассмотрены их особенности как объекта управления, а также рассмотрены существующие системы управления.

Вторая глава посвящена обзору технологий нечеткой логики, применяемой для управления различными техническими объектами.

В третьей главе выполнена разработка системы управления рулевым электроприводом летательного аппарата с применением нечеткой логики. Для этого были разработаны функциональная схема системы управления и нечеткого регулятора, а также входные и выходная переменные регулятора представлены в виде терм-множеств для которых разработаны нечеткие правила.

В четвёртой главе выполнено исследование разработанной системы с помощью математического моделирования в среде Simulink пакета MatLab.

В заключении были приведены основные выводы, которые были получены в результате проведенного исследования.

Пояснительная записка содержит 67 листов печатного текста, в том числе 35 рисунков, 3 таблицы и список использованных источников из 27 наименований.

					<i>ЮУрГУ – 13.03.02.2020.616.11 ПЗ ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		Попов И.Е.			<b>Рулевой электропривод с нечетким управлением</b>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		Курносов Д.А.					6	67
<i>Реценз.</i>						<b>ЮУрГУ Летательные аппараты</b>		
<i>Н. Контр.</i>		Шабуров П.О.						
<i>Утверд.</i>		Дегтярь В.Г.						

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 АНАЛИЗ РУЛЕВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.....	10
1.1 Рулевой электропривод как узел летательного аппарата .....	10
1.2 Системы управления рулевым электроприводом летательного аппарата.....	15
1.3 Выводы по главе .....	20
2 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.....	21
2.1 Общие положения.....	21
2.2 Управление с применением нечеткой логики.....	22
2.3 Технология нечеткого регулятора.....	24
2.4 Выводы по главе.....	27
3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ.....	28
3.1 Функциональная схема системы управления.....	28
3.2 Функциональная схема нечеткого регулятора.....	32
3.3 Определение термов входных переменных нечеткого регулятора.....	35
3.4 Определение термов выходных переменных нечеткого регулятора.....	37
3.5 Разработка базы нечетких правил.....	37
3.6 Выводы по главе.....	41
4 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	42
4.1 Математическая модель и моделирование объекта управления в среде Simulink.....	42
4.2 Математическая модель нечеткого регулятора в среде Simulink.....	50
4.3 Моделирование системы с нечетким регулятором.....	58
4.4 Выводы по главе.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	64
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	65

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Одним из важнейших элементов воздушных судов являются рулевые приводы, которые предназначены для перемещения органов управления в соответствии с командами автопилота. Электрический привод для рулевых механизмов летательных аппаратов обладает множеством преимуществ по сравнению с другими типами приводов (пневно-, гидро-).

Рулевой электропривод летательного аппарата функционирует в режиме следящей системы. При этом в составе этой следящей системы присутствуют нелинейности, усложняющие процесс управления. Игнорирование нелинейностей в составе системы рулевого электропривода может привести к сужению эксплуатационного диапазона летательного аппарата, а также к ухудшению динамики полета.

В последние годы системы управления летательных аппаратов реализуются на основе цифровых систем управления и адаптивных алгоритмов управления, позволяющими учесть множество факторов, влияющих на точность управления основными механизмами. Не исключением является и рулевой электропривод. Во многих случаях при управлении рулевыми электроприводами возникает необходимость учета неопределенных данных, широкого диапазона изменения различных параметров, а также применения ассоциативного подхода. Возможным вариантом реализации систем управления с учетом вышеуказанных особенностей являются системы на основе нечеткой логики, которые способны принимать обоснованные решения об управлении без наличия полной информации об объекте управления. Опыт применения систем управления с нечеткой логикой в большинстве случаев показывает их преимущества по сравнению с системами управления на основе классических регуляторов.

Однако, в настоящее время есть достаточно нерешенных вопросов, связанных разработкой систем управления с нечеткой логикой для следящих систем рулевых электроприводов летательных аппаратов, в связи с чем данная работа является актуальной и ее результаты могут быть полезны при реализации и исследовании аналогичных систем.

					<i>ЮУрГУ – 130302.2020.616.11 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

**Объектом исследования и разработки** в данной работе является рулевой электропривод летательного аппарата.

**Предметом исследования и разработки** в данной работе является рулевой электропривод летательного аппарата с системой управления на основе нечеткой логики.

**Цель выпускной квалификационной работы** – разработка и исследование системы рулевого электропривода летательного аппарата с применением технологии нечеткой логики.

Для достижения поставленной цели необходимо сформулировать и решить следующие **задачи**:

1. Выполнить анализ рулевого электропривода летательного аппарата как объекта управления.
2. Выполнить обзор технологии нечеткой логики.
3. Разработать структурную схему системы управления рулевым электроприводом летательного аппарата на основе нечеткой логики.
4. Разработать нечеткий регулятор для управления электроприводом рулевого механизма.
5. Выполнить исследование системы управления рулевым электроприводом с помощью математического моделирования.

# 1 АНАЛИЗ РУЛЕВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА КАК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ

## 1.1 Рулевой электропривод как узел летательного аппарата

В общем случае к летательным аппаратам (ЛА) относятся следующие машины и аппараты [1-2]:

- самолет;
- вертолет;
- беспилотный управляемый летательный аппарат;
- ракета;
- космический летательный аппарат и другие.

Магистральные самолеты являются достаточно типовыми и распространенными ЛА. Рассмотрим аэродинамические поверхности, принимающие участие в управлении полетом магистрального самолета, показанные схематически на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Аэродинамические поверхности для управления полетом магистрального самолета

В соответствии с рисунком 1.1 для управления ЛА типа магистрального самолета задействованы следующие приводы поверхностей, требующие определенных усилий, в зависимости от размеров ЛА и режимов полета ЛА:

- привод предкрылков, требующий усилие от 1000 кгс до 4000 кгс;
- привод элерона, требующий усилие от 1000 кгс до 5000 кгс;
- привод закрылков, требующий усилие от 1000 кгс до 5000 кгс;
- привод стабилизатора, требующий усилие от 2000 кгс до 5000 кгс;
- привод руля высоты, требующий усилие от 3000 кгс до 7000 кгс;
- привод руля направления, требующий усилие от 3000 кгс до 7000 кгс.

Состав, схема и конструкция привода рулевых поверхностей определяется компоновкой ЛА и его органов управления, задачами, возложенными на систему управления, законами работы системы управления, требуемой статической и динамической точностью воспроизведения законов управления на руле, параметрами рулевых поверхностей и действующими на них нагрузками, требованиями по надежности системы управления и надежности выполнения отдельных режимов полета, а также целым рядом других факторов, связанных с компоновкой и условиями эксплуатации ЛА.

Указанные приводы для различных ЛА могут быть различного типа:

- гидравлические приводы;
- пневматические приводы;
- электрические приводы.

Управление этими приводами выполняется в соответствии с командами, получаемыми от бортовой системы управления, которая в свою очередь воспринимает команды от пилота, или формирует их в режиме автопилота.

Указанные рулевые приводы работают в режиме замкнутых систем следящих приводов.

Условно контур управления, в состав которого входит следящие рулевые приводы можно разделить на следующие звенья:

- управляющее звено, которое может содержать в себе логику действий летчика, автоматической системы управления и стабилизации, система автоматизации управления при пилотировании летчиком и др.;
- передающее звено, которое является приводом рулевых поверхностей летательного аппарата;
- управляемого звена или объекта управления – летательного аппарата.

На рисунке 1.2 показана функциональная схема замкнутого контура управления летательного аппарата с учетом вышеизложенного деления на звенья.

Опыт эксплуатации и исследования [3-8] показывают, что электрические приводы для управления ЛА являются наиболее перспективными в связи со следующим:

- невысокие значения потребляемой мощности;
- простота конструкции;
- высокие массогабаритные показатели;
- высокие динамические свойства.

При этом электрические приводы рулевых механизмов ЛА при своей работе требуют использование механического редуктора, а также других механических элементов. Это обуславливает следующие недостатки электрических приводов рулевых механизмов ЛА:

- относительно невысокая надежность механического редуктора;
- люфты в механизме;
- высокие нагрузки, обусловленные аэродинамическими силами в пассивном режиме работы привода.

Разработка и применение электрических рулевых приводов соответствуют концепции разработки летательных аппаратов с полностью электрифицированным оборудованием [3-4]. Это связано с особенностями электрической энергии, которую можно достаточно легко трансформировать, передавать на расстояния, распределять между потребителями и использовать для выполнения механической работы на уровне потребителей.



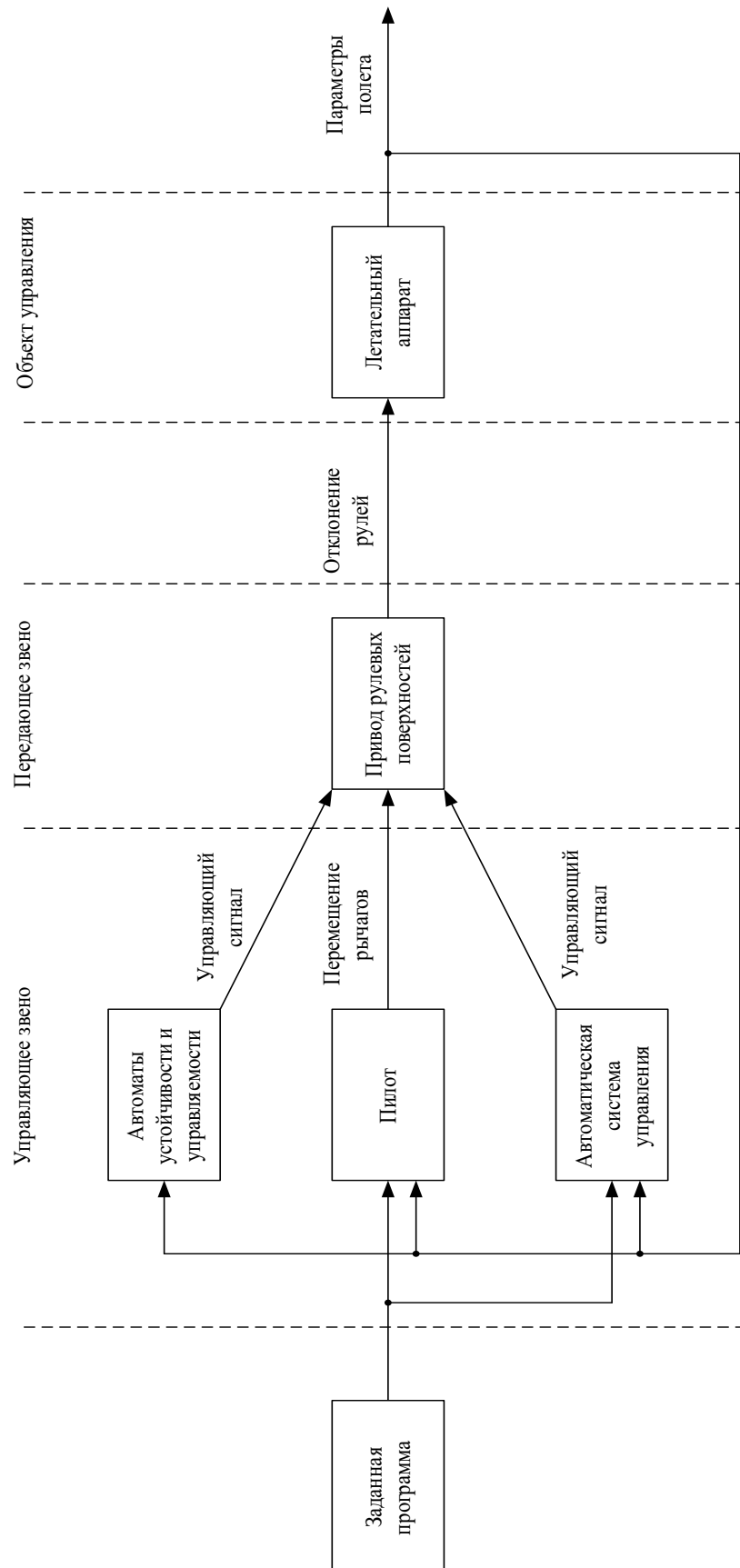


Рисунок 1.2 – Функциональная схема замкнутого контура управления летательного аппарата

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Фактически электрическая энергия, как основной вид бортовой энергии для летательного аппарата, позволит повысить его универсальность, надежность и удобство эксплуатации, а также унифицировать бортовое силовое оборудование. Также применение электрической энергии позволяет достаточно просто автоматизировать все бортовые системы, вплоть до реализации комплексной системы автоматизации летательного аппарата.

На рисунке 1.3 показано наглядное изображение систем энергоснабжения и управления для летательных аппаратов с традиционной схемой энергоснабжения (рис. 1.3, а) и с полностью электрифицированным энергоснабжением (рис.1.3, б).

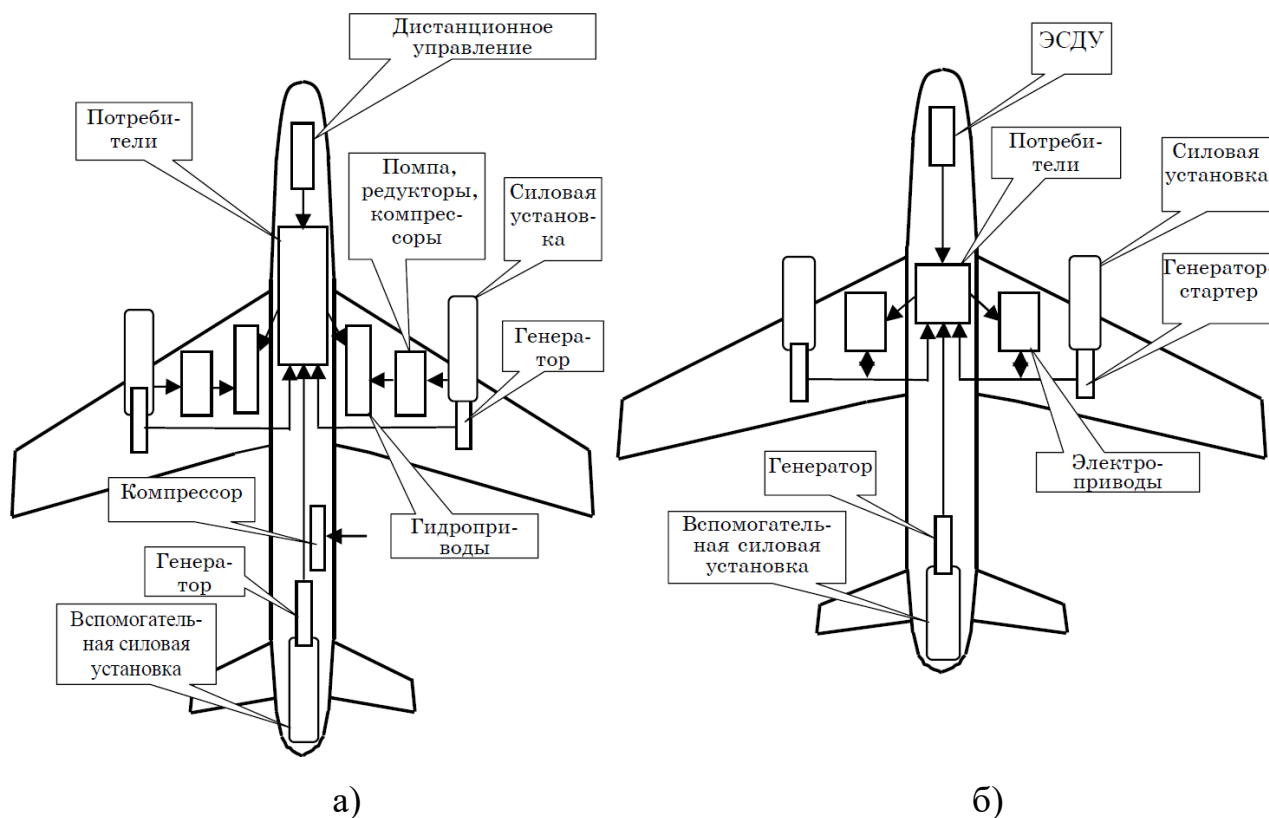


Рисунок 1.3 – Варианты систем энергоснабжения летательного аппарата:

- а) традиционная схема энергоснабжения,
- б) электрифицированное энергоснабжение

Летательный аппарат с традиционной схемой энергоснабжения может содержать в себе различные виды энергии (электрическая, пневматическая и гидравлическая), и соответствующие разнородные силовые элементы – силовые установки, электрические генераторы, компрессоры, гидроприводы, помпы, редукторы и другие.

Летательный аппарат с полностью электрифицированным энергоснабжением имеет единую систему энергоснабжения, обеспечивающую питанием системы управления полетом, привод шасси, системы жизнеобеспечения и кондиционирования, электронные устройства, противообледенительную систему и другие бортовые устройства [3].

В летательном аппарате с электрифицированным энергоснабжением можно применять электронную систему дистанционного управления, которая является более совершенной по сравнению с традиционной системой дистанционного управления [3].

## 1.2 Системы управления рулевым электроприводом летательного аппарата

Электрический привод рулевого механизма состоит из следующих основных компонентов:

- преобразователь механических (угловых и линейных) перемещений в электрический сигнал малой мощности (информационный или управляющий сигнал);
- преобразователь маломощного электрического сигнала в силовую механическую энергию (силовой энергетический или исполнительный канал);
- согласующий элемент характеристик исполнительных элементов и нагрузки (редуктор).

Самыми перспективными и продвинутыми системами управления рулевых электроприводов являются системы на основе полупроводниковых преобразователей энергии. В большинстве случаев к таким управляемым преобразователям электрической энергии относятся тиристорные или транзисторные преобразователи.

Одним из вариантов реализации рулевого электропривода на основе исполнительного электродвигателя и тиристорных усилителей мощности является схема, приведенная на рисунке 1.4.

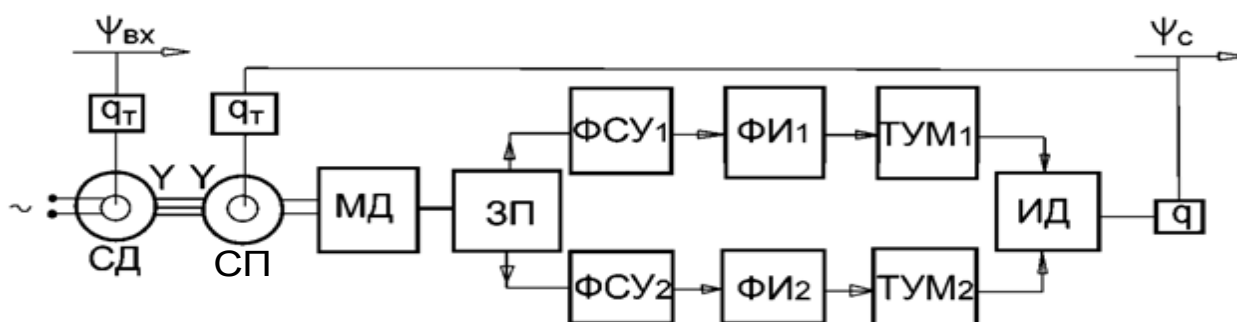


Рисунок 1.4 – Функциональная схема реализации рулевого электропривода с тиристорным усилителем мощности

На рисунке 1.4 обозначены следующие блоки и узлы рулевого электропривода:

- СД – сельсин-датчик;
- СП – сельсин-приемник;
- МД – моментный двигатель;
- ЗП – задатчик положения;
- ФСУ – фазовое сдвигающее устройство;
- ФИ – формирователь импульсов;
- ТУМ – тиристорный усилитель мощности;
- ИД – исполнительный двигатель;
- $\Psi_{вх}$  – входное перемещение;
- $\Psi_{с}$  – фактическое перемещение.

Наиболее распространенные электрические рулевые приводы выполнены на основе электродвигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Функциональная схема реализации данного электропривода показана на рисунке 1.5.

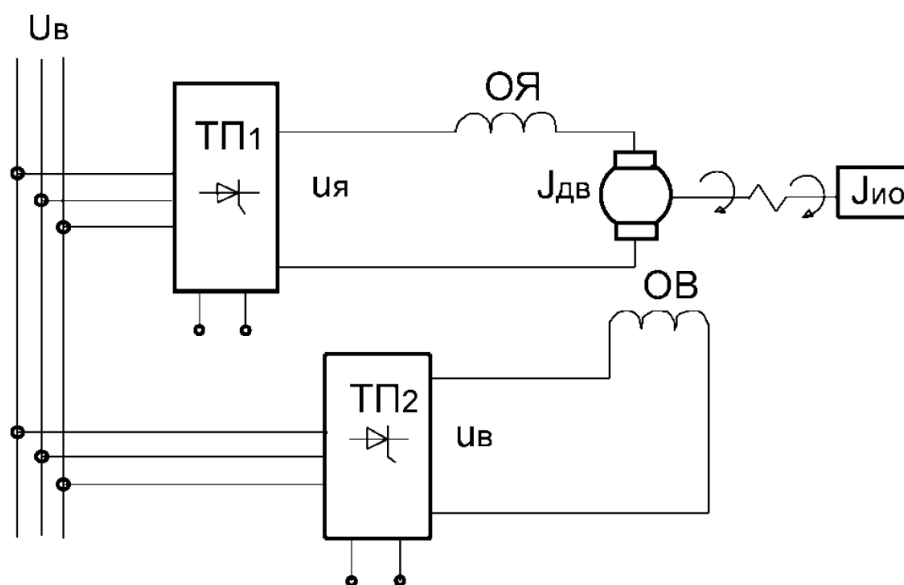


Рисунок 1.5 – Функциональная схема реализации электропривода постоянного тока

В такой схеме напряжение на обмотке якоря (ОЯ) формируется тиристорным преобразователем ТП1, напряжение на обмотке возбуждения (ОВ) формируется тиристорным преобразователем ТП2.

Механическая часть в соответствии с рисунком 1.5 представлена как эквивалентная двухмассовая механическая система с упругой связью, где:

- $J_{дв}$  – момент инерции двигателя;
- $J_{ио}$  – момент инерции исполнительного органа.

В связи с тем, что рулевой электропривод оказывает заметное влияние на динамику полета, то следует учитывать его инерционность в виде влияния  $J_{дв}$  и  $J_{ио}$ .

Для исследований и разработок в рамках данной выпускной квалификационной работы принимаем за основу функциональную схему типовой системы управления рулевым электроприводом, показанную на рисунке 1.6. Данная замкнутая система является следящей системой, которая в общем случае может быть актуальной как для электропривода постоянного тока, так и для электропривода переменного тока.

На рисунке 1.6 обозначены следующие блоки и величины:

- РП – регулятор положения;
- РС – регулятор скорости;
- РТ – регулятор тока;
- П – преобразователь электрической энергии;
- Д – двигатель;
- ОР – объект регулирования (рулевой механизм);
- ДТ – датчик тока;
- ДС – датчик скорости;
- ДП – датчик положения;
- $\varphi_3, \varphi$  – заданное и фактическое перемещение;
- $\omega_3, \omega$  – заданная и фактическая угловая скорость электродвигателя;
- $I_3, I$  – заданный и фактический ток электродвигателя;
- $U_y$  – сигнал управления преобразователем электрической энергии.

Рассматриваемая система управления рулевым электроприводом выполнена по принципу подчиненного регулирования координат.

Внутренний контур регулирования тока состоит из блоков РТ, П и ДТ. Контур регулирования тока является подчиненным к контуру регулирования скорости. Последний является внешним контуром по отношению к контуру регулирования тока.

Контур регулирования скорости, который состоит из блоков РС, Д, ДС и контура регулирования тока, является подчиненным по отношению к контуру регулирования положения.



Контур регулирования положения состоит из блоков РП, ОР, ДП и контура регулирования скорости.

В рассматриваемой системе следящего электропривода можно выделить два режима работы:

- позиционирование, которое заключается в перемещении рабочего органа из текущего положения в заданное за время не более заданного;
- слежение, которое заключается в перемещении рабочего органа в соответствии с управляющим воздействием, изменяющимся по произвольному закону.

### 1.3 Выводы по главе

В данной главе выполнен анализ рулевого электропривода летательного аппарата как объекта управления.

Среди различных вариантов рулевых приводов ЛА электрический рулевой привод является самым перспективным с точки зрения особенностей управления и реализации электрифицированной системы энергоснабжения ЛА.

Для дальнейших разработок и анализа выбрана система управления рулевым электроприводом на основе следящей системы с подчиненным регулированием координат, где внутренний контур тока управляется контуром скорости, а тот в свою очередь контуром положения.



## 2 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

### 2.1 Общие положения

При управлении сложными техническими объектами, к которым относятся и рулевые электроприводы летательных аппаратов, как правило, приходится сталкиваться с различной степенью неопределенности исходных данных, параметров системы, нечеткостью целей и задач управления [7-11].

Причины возникновения неопределенности могут заключаться в стохастической природе влияющих на систему внешних факторов, в особенностях протекающего технологического процесса и в непредсказуемости управляющего воздействия человека.

Методы управления, основанные на теории нечетких множеств, разработанной американским математиком Л.А. Заде, являются наиболее перспективными для решения данного класса задач [10].

В современной научной литературе во многих сферах, как в технике, так в экономике, медицине и других, обращается внимание на необходимость разработки и применения новых методов раскрытия неопределенности при управлении в условиях неполной (нечеткой) информации. Системы использующие нечеткую обработку информации называются системами с нечеткой логикой или с фаззи логикой.

Достоинства систем, функционирующих на основе нечеткой логики, заключаются в улучшении функционирования технических систем и ростом производительности по сравнению с системами, реализованных на классических регуляторах [10,11].

Обычно выделяют следующие основные этапы разработки систем управления с нечеткой логикой:

- анализ проблемной ситуации;
- структуризация предметной области и построение модели;

- выполнение вычислительных экспериментов с моделью;
- применение результатов вычислительных экспериментов;
- коррекция или доработка модели.

Большая часть перечисленных этапов базируются на основе современных программных продуктов, однако, достаточно большое влияние на разработку систем с нечеткой логикой имеют люди, обладающие экспертными знаниями в сфере разрабатываемой системы.

## 2.2 Управление с применением нечеткой логики

Применение управления на основе нечеткой логики в общем случае целесообразно при:

- наличии неопределенности, связанной как с отсутствием информации, так и сложностью системы, и невозможностью или нецелесообразностью ее описания традиционными методами;
- наличии информации качественного характера об объекте, управляющих воздействиях, возмущениях и т.п., без достоверной информации количественного характера.

На рисунке 2.1 схематично показана последовательность управления на основе нечеткой логики [11].

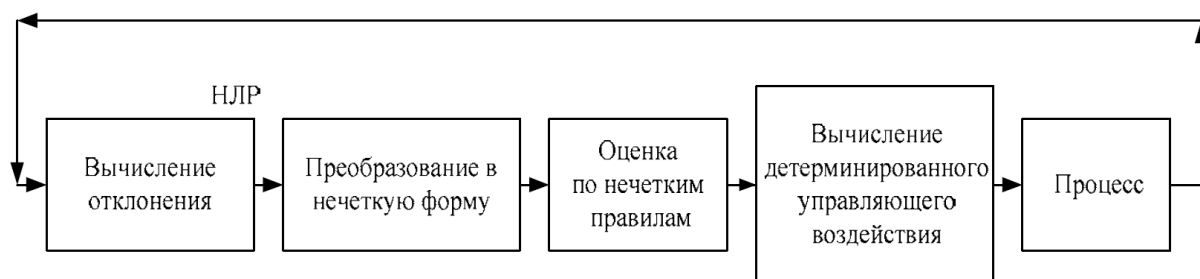


Рисунок 2.1 – Последовательность управления на основе нечеткой логики

Нечеткое управление базируется на использовании не столько аналитических или теоретических моделей, сколько на практическом применении знаний, которые можно представить в форме баз правил [10].

В каких-то случаях такие правила могут быть получены от оператора технологического процесса или от специалиста, имеющего глубокие познания в данной сфере. Нечеткое управление может использоваться в том случае, когда существует определенный опыт экспертов и его можно записать некоторым формальным образом. Широкий диапазон приложений и естественного подхода, основанного на опыте экспертов, делает нечеткое управление основным средством, которое может применяться во многих случаях управления. Нечеткое управление может также непосредственно комбинироваться с классическими методами управления [14-16].

Применение нечеткого управления может быть наиболее эффективно в тех случаях, когда отсутствует явная модель процесса или аналитическая модель является слишком сложной для представления или получения решения в реальном масштабе времени. Другим преимуществом нечеткой логики является возможность непосредственного объединения опыта нескольких специалистов. Нечеткое управление, являясь многозначным управлением, больше ограничивается значениями высказываний «истина» или «ложь». Эта особенность делает нечеткое управление адекватным средством для моделирования эмпирического опыта экспертов, оперируя теми понятиями, в терминах которых формируются управляющие воздействия на заданном множестве входов [16].

Нечеткие логические регуляторы (НЛР) являются экспертными регуляторами, и алгоритмы их синтеза трудно формализовать для сложных объектов управления, обладающих свойством уникальности.

Выполнение функций регулирования с помощью НЛР возможно в виде нечетких переменных на основе высказываний оператора, сформулированных в виде нечетких правил. Совокупность нечетких правил и нечетких переменных используется для осуществления нечеткого логического вывода, результатом которого является управляющее воздействие на объект управления.

Следует понимать, что разработка нечетких регуляторов не является строго формализованной последовательностью действий. Нечеткие правила управления и функции принадлежности обычно разрабатываются на основе эвристических методов проб и ошибок.

Среди причин распространения нечеткого управления, обычно, выделяют следующее [16,22]:

- особые качества систем управления с нечеткой логикой, в частности малая чувствительность к изменению параметров объекта управления;
- синтез систем управления с нечеткой логикой при применении современных средств аппаратной и программной поддержки зачастую проще, чем традиционных.

Как и у любых систем управления у систем с нечеткой логикой существует область, в которой их применение является наиболее предпочтительным. В качестве таких областей, обычно, выделяют следующие:

- системы регулирования, для которых модель объекта управления определена лишь качественно;
- надстройка над традиционными системами регулирования (например, над ПИД-регуляторами) для придания им адаптивных свойств;
- воспроизведение действий человека-оператора;
- системы организационного управления верхнего уровня.

### 2.3 Технология нечеткого регулятора

Ядром любого регулятора с нечеткой логикой является блок с нечеткой логикой (БНЛ), в котором происходят процессы фаззификации, работы с нечеткими правилами и дефаззификации (рис. 2.2) [14].

Рассмотрим подробнее работу блока нечеткой логики.

Алгоритм функционирования БНЛ возможно представить, как модель в виде «вход-выход», показанную на рисунке 2.3.

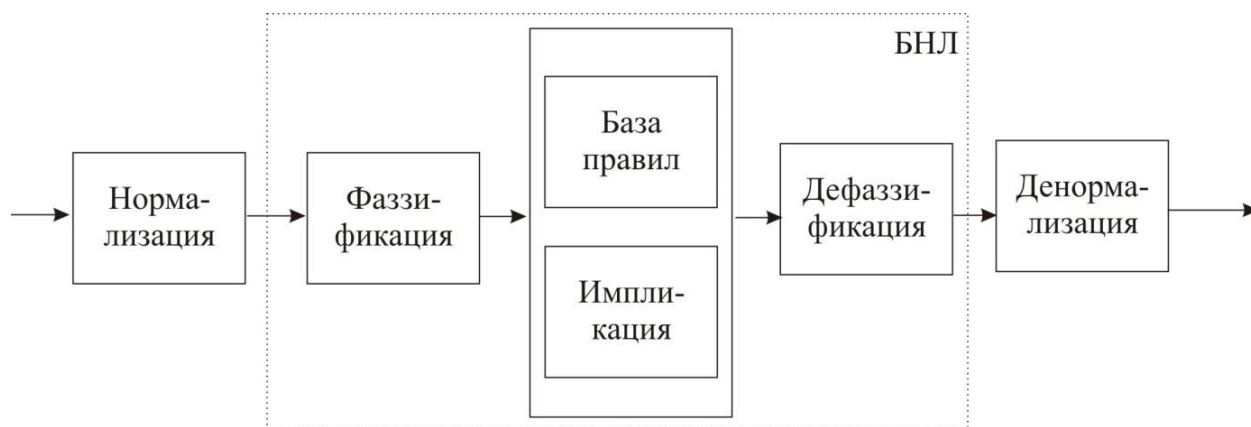


Рисунок 2.2 – Структурная схема регулятора с нечеткой логикой

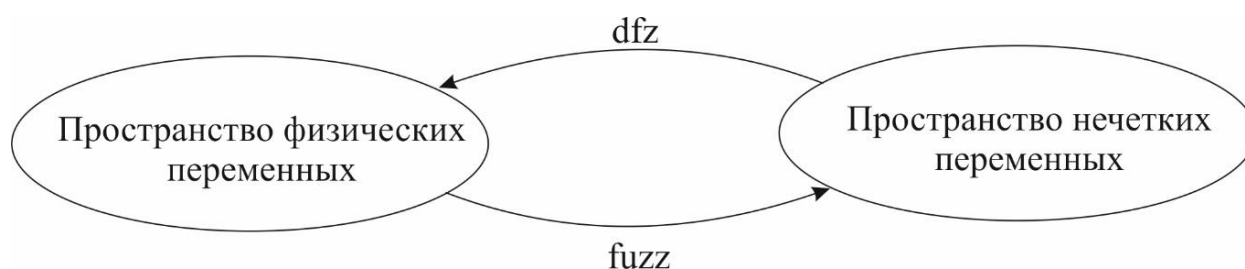


Рисунок 2.3 – Схема преобразования переменных в нечетком регуляторе

Переход из пространства физических переменных в нечеткие осуществляется с помощью операции фаззификации (fuzz) и определяется типом задания нечетких функций принадлежности (в виде треугольников, трапеций, колоколообразных и т.д.). Обратный переход к физическим переменным выполняется операцией дефаззификации (dfz) и производится методами центра тяжести (сog), центра области (соа), среднего максимума (mоm) и т.д.

Таким образом, БНЛ (рис. 2.2) включает в себя три основных блока:

- блок фаззификации;
- блок формирования логического решения;
- блок дефаззификации.

В блоке формирователя логического решения происходит обработка нечетких множеств, выходной сигнал блока определяется способами задания нечеткой импликации и композиции.

Степень детализации объекта зависит от количества термов (разбиений на подмножества). Декомпозиция очень важна и влияет на производительность управляющего контроллера в реальных устройствах управления. На рисунке 2.4 показана грубая нечеткая декомпозиция с 3 термами и тремя нечеткими подмножествами (рис.2.4, а) и более детальная (рис.2.4, б) с семью подмножествами [14].

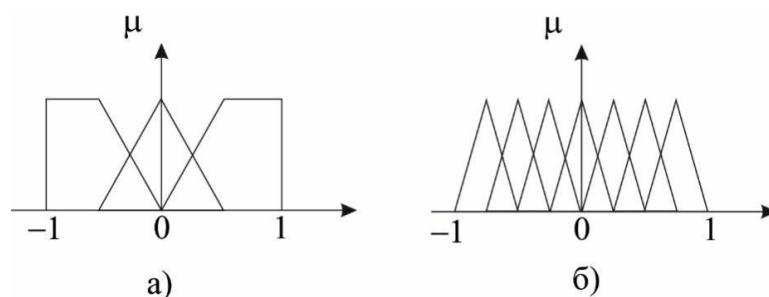


Рисунок 2.4 – Нечеткая декомпозиция а) грубая, б) детальная

В блоке нормализации БНЛ происходит обработка четких данных, полученных от измерительного оборудования (датчиков обратных связей) для дальнейшего их лингвистического описания. Примерами нормализации (предварительной обработки) могут являться:

- квантование по уровню;
- нормализация или масштабирование в конкретном стандартном диапазоне;
- фильтрация для устранения шума;
- усреднение сигнала;
- дифференциация и интеграция, или их приближения в дискретное время.

В блоке денормализации БНЛ происходит масштабирование выходного дефазифицированного сигнала в инженерные единицы – вольты, метры и т.д. Примером такого масштабирования может служить перевод из единиц множества [-1, 1] в физические единицы [-10, 10] Вольт.

Процедуры фаззификации, композиции базы правил, импликации, дефаззификации в комплексе являются алгоритмом Мамдани.

Если при имплицитации выходным сигналом лингвистического решения является не лингвистическое решение в виде нечетких функций, а конкретное число или линейная функция, то такой алгоритм называется алгоритмом Такаги-Сугено, иногда называемый просто алгоритмом Сугено [19].

## 2.4 Выводы по главе

В данной главе выполнен обзор технологий нечеткой логики, которые позволяют реализовать системы управления сложными техническими объектами без использования полной информации об этих объектах.

Разработка систем управления с нечеткой логикой, как правило, требует экспертных знаний об объекте управления, которые могут заключаться в качественном описании процессов управления или других характеристиках, неподдающихся точным численным соотношениям и формулировкам.

Технология разработки нечетких регуляторов для систем управления является достаточно сложной и требует применения специализированных программных продуктов.

					<i>ЮУрГУ – 130302.2020.616.11 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		27

## 3 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

### 3.1 Функциональная схема системы управления

Система управления рулевым электроприводом летательного аппарата должна выполнять следующие функции:

- обрабатывать задание, как результат управления либо пилота, либо автопилота;
- компенсировать изменяющиеся во времени возмущающие воздействия;
- обрабатывать изменения параметров рулевого электропривода.

Для учета большинства особенностей процесса управления рулевым электроприводом ЛА необходимо применять регулятор на основе нечеткой логики (фаззи-регулятор). Одним из достоинств такого регулятора является его работоспособность даже при частичной неопределенности параметров.

На рисунке 3.1 показана функциональная схема системы управления положением рабочего органа рулевого электропривода ЛА на основе нечеткого регулятора.

В соответствии с данной схемой системы управления необходимо на нечеткий регулятор подавать информацию:

- задание на перемещение рулевого рабочего органа;
- фактическое положение рулевого рабочего органа (обратная связь);
- дополнительная информация об объекте управления.

В свою очередь нечеткий регулятор формирует сигнал задания на систему управления электропривод.

Объектом управления для нечеткого регулятора положения является система подчиненного регулирования скорости, которая настроена с применением классических регуляторов, без использования нечеткой логики [12]. На рисунке 3.2 показана функциональная схема объекта управления.



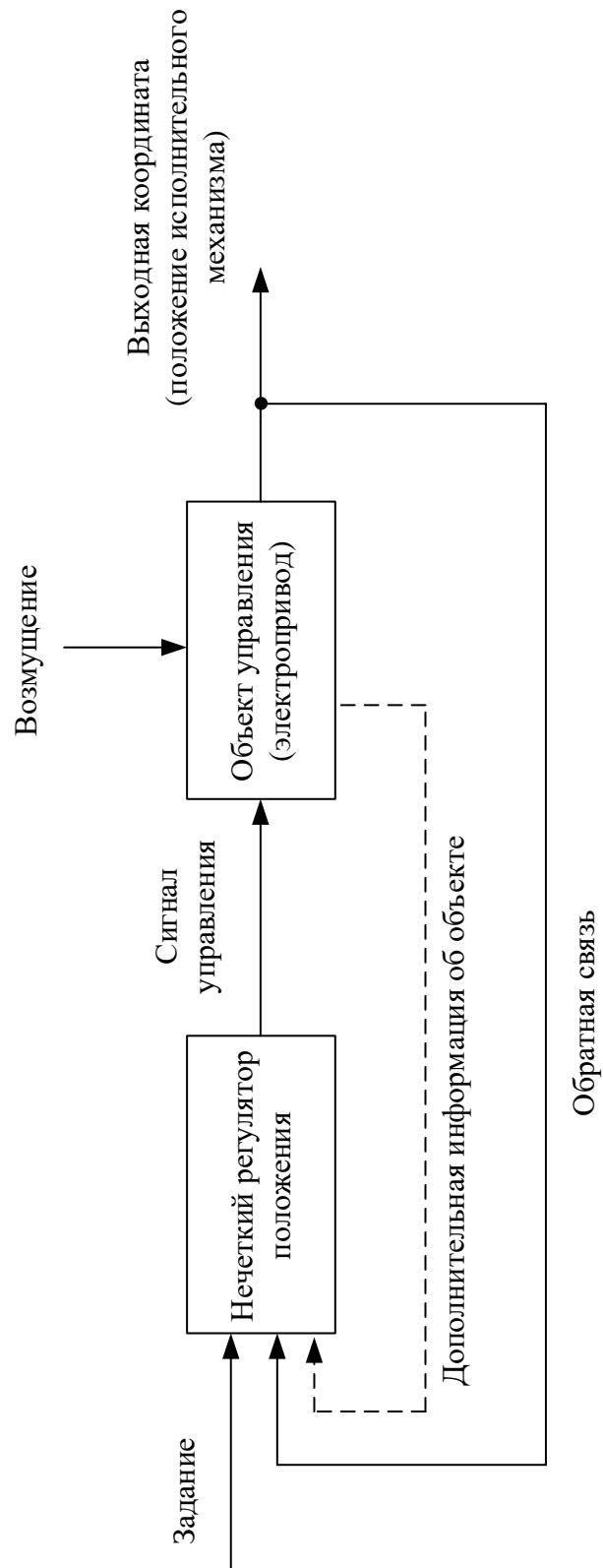


Рисунок 3.1 – Функциональная схема системы управления рулевым электроприводом

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

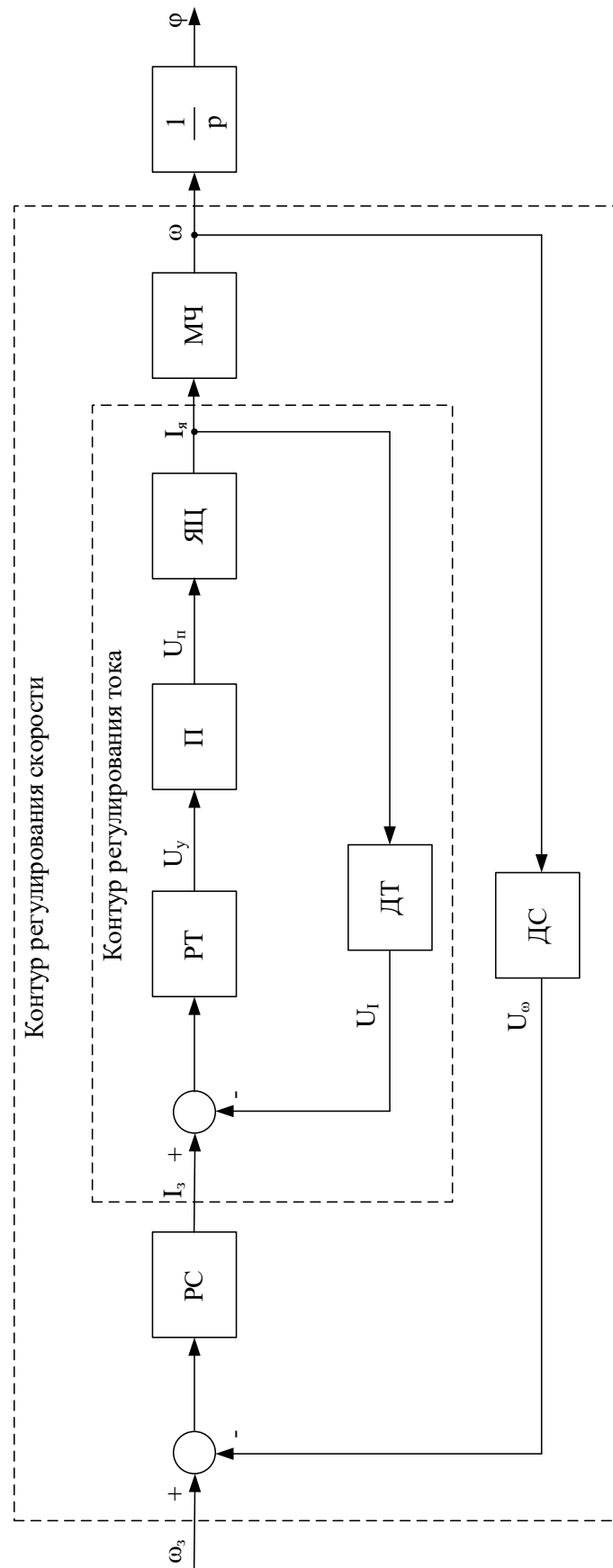


Рисунок 3.2 – Функциональная схема объекта управления

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Объект управления условно можно разбить на два контура системы подчиненного регулирования – внешний контур регулирования скорости и внутренний контур регулирования тока.

Контур регулирования скорости состоит из:

- регулятора скорости РС;
- датчика скорости ДС;
- механической части МЧ.

Контур регулирования скорости получает задание на скорость вращения электропривода  $\omega_3$ . Фактически это задание должно быть сформировано нечетким регулятором положения (рис. 3.1). Для измерения скорости используется датчик ДС. На основе сравнения сигналов заданной скорости и скорости, измеренной датчиком, формируется входной сигнал для регулятора скорости РС. Затем РС формирует задание для контура регулирования тока якоря  $I_{я}$ . Ток якоря является выходным сигналом контура регулирования тока, получаемый на выходе блока якорной цепи ЯЦ. Ток  $I_{я}$  участвует в электромагнитных переходных процессах по созданию электромагнитного вращающего момента двигателя. Электромагнитный момент вызывает вращение вала электродвигателя, что имитирует блок механической части МЧ [17-18].

Контур регулирования тока состоит из:

- регулятора тока РТ;
- электрического управляемого преобразователя П;
- якорной цепи ЯЦ.

Работа контура регулирования тока аналогична работе контура регулирования скорости.

На функциональной схеме объекта управления показано формирование значения текущего угла поворота рабочего органа  $\varphi$  после интегрирования скорости  $\omega$ .

Именно сигнал  $\varphi$  рассматриваем как регулируемую координату в системе, изображенной на рис. 3.1.

### 3.2 Функциональная схема нечеткого регулятора

На рисунке 3.3 показана функциональная схема нечеткого регулятора для рулевого электропривода. Данный нечеткий регулятор обеспечивает формирование управляющего воздействия на скорость рулевого электропривода для отработки заданного перемещения рабочего органа [23].

В соответствии с приведенной структурной схемой основными этапами обработки информации в нечетком регуляторе являются:

- фазификация (блок фазификации);
- принятие решения (блок принятия решения);
- дефазификация (блок дефазификации).

Данные этапы обработки информации отмечены в виде соответствующих блоков на рисунке 3.3.

Входной информацией для работы нечеткого регулятора положения является информация о задании регулируемой координаты, и информация, полученная от датчиков, определяющих текущее состояние рулевого электропривода.

Считаем, что информация, полученная от датчиков, может быть условно разделена на обязательную и на дополнительную (опциональную). К обязательной информации относим информацию о фактическом положении рабочего органа рулевого электропривода, т.к. без данной информации управление положением будет практически невозможным.

К опциональной информации для управления положением можно отнести информацию о скорости движения рабочего органа рулевого электропривода. Предварительно предполагаем, что дополнительная информация о состоянии рулевого электропривода может быть использована для улучшения качества управления не во всех режимах работы электропривода, а в каких-то особых случаях, например, при наличии возмущающих воздействий.

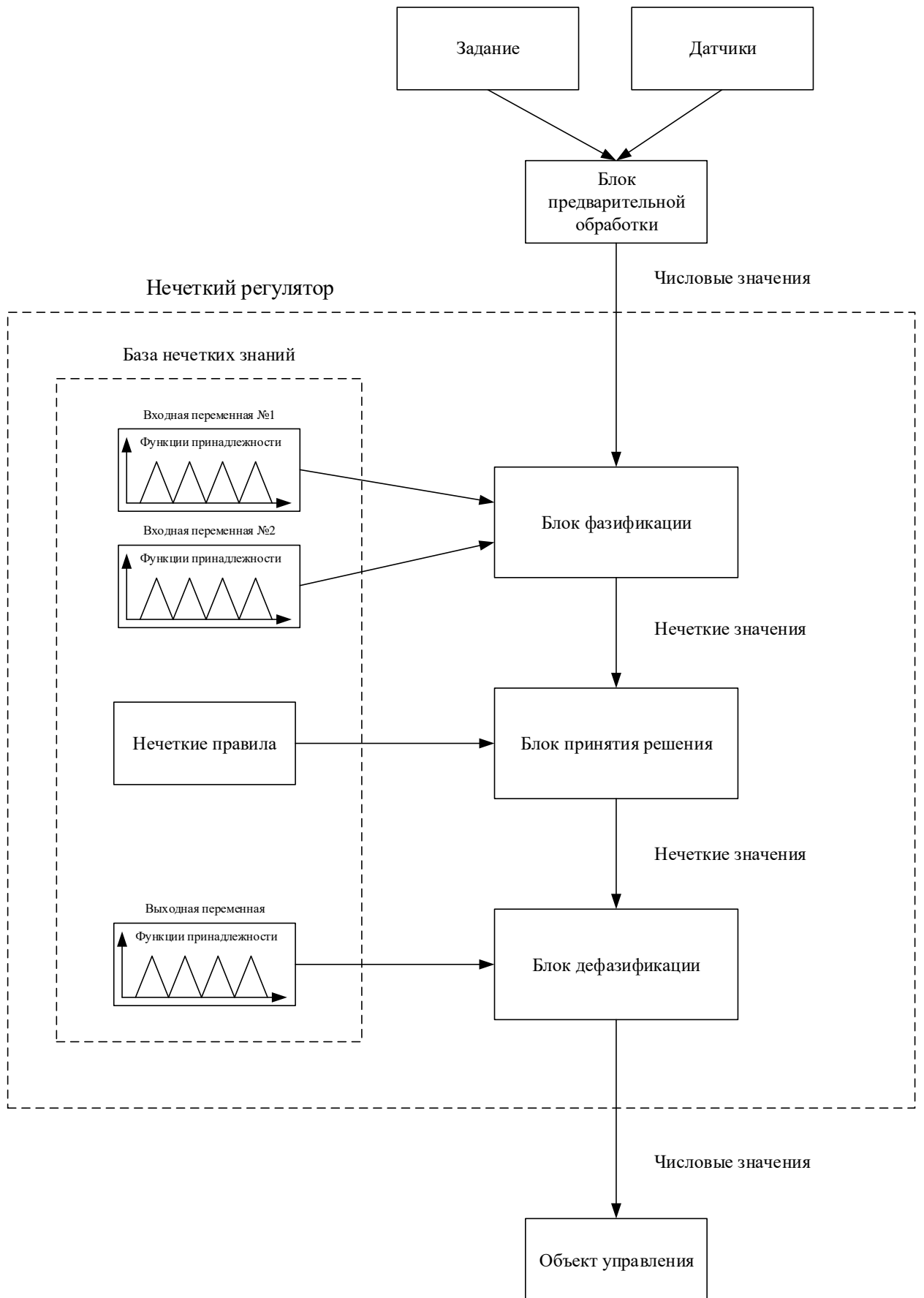


Рисунок 3.3 – Функциональная схема нечеткого регулятора положения

Блок предварительной обработки информации выполняет необходимые предварительные преобразования сигнала задания и сигналов от датчиков. Данные преобразования должны исключать подачу на вход нечеткого регулятора ложной информации. Также эти преобразования в случае необходимости предназначены для необходимого масштабирования сигнала задания и сигналов от датчиков [20-21].

Фазификация выполняется на основе функций принадлежности входных переменных, и позволяет перейти от четких значений к нечетким.

Для управления рулевым электроприводом будем рассматривать две входные переменные нечеткого регулятора:

- ошибка регулирования положения рабочего органа рулевого электропривода;
- скорость движения рабочего органа рулевого электропривода.

Указанные входные переменные нечеткого регулятора определяются на основе обработки информации о задании положения, о фактическом положении рабочего органа и скорости рабочего органа.

Обработка информации в блоке принятия решения выполняется на основе базы нечетких правил. Данная база связывает в нечетком виде состояние входных и выходных переменных [25].

В блоке дефазификации выполняется перевод обработанной информации из нечеткого вида к числовым значениям. Дефазификация выполняется на основе функций принадлежности выходной переменной [22].

Обработка информации в нечетком регуляторе (фазификация, принятие решений, дефазификация) выполняются на основе базы нечетких знаний, куда входит информация о термах входных переменных, нечетких правилах и термах выходных переменных [26-27].

Выход нечеткого регулятора положения подается на объект управления, которым является система регулирования скорости рабочего органа.

### 3.3 Определение термов входных переменных нечеткого регулятора

Входные переменные нечеткого регулятора представим в виде лингвистических переменных, которые разбиты на соответствующие лингвистические терм-множества.

Входную переменную «ошибка регулирования положения» рабочего органа представим пятью терм-множествами, изменяющимися в пределах от «-2» до «2»:

- отрицательная большая (ОБ);
- отрицательная малая (ОМ);
- нулевая (Н);
- положительная малая (ПМ);
- положительная большая (ПБ).

Приведенные терм-множества при фазификации ошибки регулирования положения применимы соотношения функций принадлежности, сведенные в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Соотношения функций принадлежности для терм-множеств входной переменной «ошибка регулирования»

Имя функции принадлежности	Обозначение	Тип функции принадлежности	Диапазон значений
Отрицательная большая	ОБ	S-образная (zmf)	[-1; 0,5]
Отрицательная малая	ОМ	Треугольная (trimf)	[-1; 0,5; 0]
Нулевая	Н	Треугольная (trimf)	[-0,5; 0; 0,5]
Положительная малая	ПМ	Треугольная (trimf)	[0; 0,5; 1]
Положительная большая	ПБ	S-образная (smf)	[0,5; 1]

При выборе количества терм-множеств учтено следующее:

– уменьшение количества терм-множеств, например, до трех, не позволит получить полную информацию о работе объекта управления и приведет к заметным ошибкам при регулировании положения;

– увеличение количества терм-множеств, например, до семи, приведет к заметному усложнению и трудоемкости процесса настройки системы регулирования положения без улучшения качества процесса регулирования; трудоемкость процесса настройки заключается в необходимости знания расширенных экспертных сведений об объекте регулирования.

Поэтому выбрано пять терм-множеств для входной переменной «ошибка регулирования положения».

По аналогии представим лингвистическую переменную «скорость рабочего органа» с помощью пяти терм-множеств (ОБ, ОМ, Н, ПМ, ПБ) в пределах изменения от «-5» до «5».

Для терм-множеств входной переменной «скорость рабочего органа» применимы соотношения, приведенные в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Соотношения функций принадлежности для терм-множеств входной переменной «скорость рабочего органа»

Имя функции принадлежности	Обозначение	Тип функции принадлежности	Диапазон значений
Отрицательная большая	ОБ	S-образная (zmf)	[-4; -2]
Отрицательная малая	ОМ	Треугольная (trimf)	[-4; -2; 0]
Нулевая	Н	Треугольная (trimf)	[-2; 0; 2]
Положительная малая	ПМ	Треугольная (trimf)	[0; 2; 4]
Положительная большая	ПБ	S-образная (smf)	[2; 4]



### 3.4 Определение термов выходных переменных нечеткого регулятора

Лингвистическую переменную выходной переменной «выход» нечеткого регулятора также, как и входные переменные, представим с помощью пяти терм-множеств (ОБ, ОМ, Н, ПМ, ПБ) в пределах изменения от «-50» до «50».

Для терм-множеств переменной «выход» применимы соотношения, приведенные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Соотношения функций принадлежности для терм-множеств выходной переменной «выход»

Имя функции принадлежности	Обозначение	Тип функции принадлежности	Диапазон значений
Отрицательная большая	ОБ	S-образная (zmf)	[-4; -2]
Отрицательная малая	ОМ	Треугольная (trimf)	[-4; -2; 0]
Нулевая	Н	Треугольная (trimf)	[-2; 0; 2]
Положительная малая	ПМ	Треугольная (trimf)	[0; 2; 4]
Положительная большая	ПБ	S-образная (smf)	[2; 4]

### 3.5 Разработка базы нечетких правил

Выполним разработку базы нечетких правил работы нечеткого регулятора положения рабочего органа рулевого электропривода. При разработке нечетких правил будем использовать свои знания и понимания процесса регулирования положения рабочего органа.

Отдельно рассмотрим каждый случай изменения ошибки регулирования.

В случае отрицательной большой (ОБ) ошибки регулирования положения рабочего органа рулевого электропривода и различной скорости движения рабочего органа возможны различные сигналы управления рулевым электроприводом:

– при отрицательной большой (ОБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный малый (ОМ) сигнал управления;

– при отрицательной малой (ОМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления;

– при нулевой (Н) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления;

– при положительной малой (ПМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления;

– при положительной большой (ПБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления.

В случае отрицательной малой (ОМ) ошибки регулирования положения рабочего органа рулевого электропривода и различной скорости движения рабочего органа возможны различные сигналы управления рулевым электроприводом:

– при отрицательной большой (ОБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный малый (ПМ) сигнал управления;

– при отрицательной малой (ОМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим нулевой (Н) сигнал управления;

– при нулевой (Н) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный малый (ОМ) сигнал управления;

– при положительной малой (ПМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления;

– при положительной большой (ПБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления.

В случае нулевой (Н) ошибки регулирования положения рабочего органа рулевого электропривода и различной скорости движения рабочего органа возможны различные сигналы управления рулевым электроприводом:

– при отрицательной большой (ОБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при отрицательной малой (ОМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный малый (ПМ) сигнал управления;

– при нулевой (Н) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим нулевой (Н) сигнал управления;

– при положительной малой (ПМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный малый (ОМ) сигнал управления;

– при положительной большой (ПБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный большой (ОБ) сигнал управления.

В случае положительной малой (ПМ) ошибки регулирования положения рабочего органа рулевого электропривода и различной скорости движения рабочего органа возможны различные сигналы управления рулевым электроприводом:

– при отрицательной большой (ОБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при отрицательной малой (ОМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при нулевой (Н) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный малый (ПМ) сигнал управления;

– при положительной малой (ПМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим нулевой (Н) сигнал управления;

– при положительной большой (ПБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный малый (ОМ) сигнал управления.

В случае положительной большой (ПБ) ошибки регулирования положения рабочего органа рулевого электропривода и различной скорости движения рабочего органа возможны различные сигналы управления рулевым электроприводом:

– при отрицательной большой (ОБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при отрицательной малой (ОМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при нулевой (Н) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при положительной малой (ПМ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим положительный большой (ПБ) сигнал управления;

– при положительной большой (ПБ) скорости движения рабочего органа для уменьшения ошибки регулирования положения необходим отрицательный малый (ОМ) сигнал управления.

### 3.6 Выводы по главе

В данной главе выполнена разработка системы управления рулевым электроприводом летательного аппарата на основе нечеткой логики, для чего были разработаны функциональные схемы системы управления, объекта управления и нечеткого регулятора.

В качестве основной входной информации для нечеткого регулятора выбран сигнал ошибки регулирования положения. В качестве дополнительной – сигнал скорости.

Все сигналы, участвующие в работе нечеткого регулятора разбиты на необходимое количество терм-множеств. Определено, что достаточно пяти терм-множеств для каждой переменной.

Особое внимание уделено базе нечетких правил, определяющих выходной сигнал регулятора при различных сочетаниях входных сигналов.

Также сделано предположение, что дополнительная информация о состоянии рулевого электропривода может быть использована для улучшения качества управления не во всех режимах работы электропривода, а в каких-то особых случаях, например, при наличии возмущающих воздействий. Данное предположение требует проверки при математическом моделировании.

## 4 ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РУЛЕВЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 4.1 Математическая модель и моделирование объекта управления в среде Simulink

При разработке математической модели объекта управления в среде Simulink будем использовать параметры объекта, приведенные на рисунке 4.1.

```
1      %Очистка памяти
2      clc; clear all;
3
4      %Параметры двигателя
5      Ra=6.8; %Сопротивление якорной цепи
6      Ta=0.01; %Электромагнитная постоянная якорной цепи
7      In=1.4; %Номинальный ток якорной цепи
8      c=0.028; %Постоянная электродвигателя
9      w0=314; %Скорость идеального холостого хода
10     Tm=J*Ra/c^2; %Электромеханическая постоянная времени
11
12     %Параметры преобразователя
13     Tmu=0.005; %Постоянная времени преобразователя
14     kp=1; %Коэффициент усиления преобразователя
15
16     %Параметры датчиков
17     kdt=1; %Коэффициент усиления датчика тока
18     kcs=1; %Коэффициент усиления датчика скорости
19     Tds=1e-5; %Постоянная времени датчика скорости
20     kdfi=1; %Коэффициент усиления датчика положения
21
22     %Парамеры
23     kt=Ra/(kp*kdt); %Коэффициент усиления регулятора тока
24     Tt=2*Tmu; %Постоянная времени регулятора тока
25     Tc=24*Tmu; %Постоянная времени регулятора скорости
26     Tfi=16*Tmu; %Постоянная времени регулятора положения
27
```

Рисунок 4.1 – Программа для активации параметров электропривода

Разработку Simulink-модели объекта управления выполним в последовательности контуров подчиненного регулирования:

- контур регулирования тока якоря;
- контур регулирования скорости.

Такой подход позволит убедиться в работоспособности каждого внутреннего контура регулирования, что позволит утверждать об адекватности математической модели.

На рисунке 4.2 показана Simulink-модель контура регулирования тока.

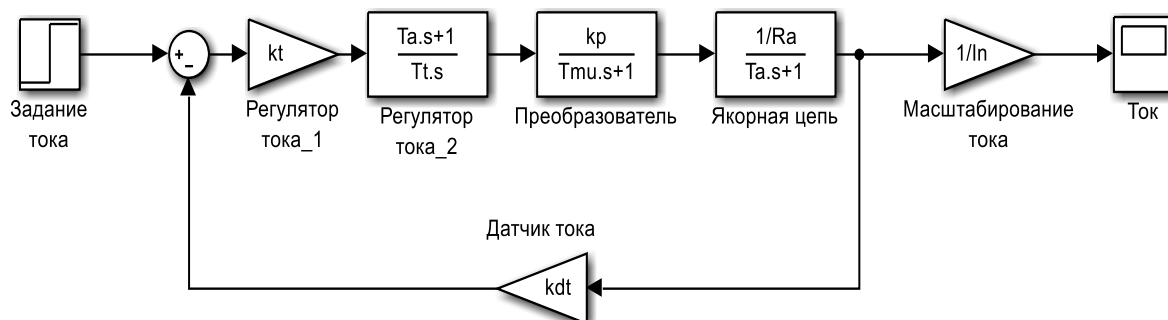


Рисунок 4.2 – Simulink-модель контура регулирования тока

Данная модель содержит в себе Simulink-звенья, моделирующие динамику:

- якорной цепи;
- преобразователя электрической энергии;
- датчика тока;
- регулятора тока.

Регулятор тока якоря представлен двумя Simulink-звеньями, которые представляют полную передаточную функцию регулятора, обеспечивающую компенсацию влияния на динамику контура всех постоянных времени и коэффициентов. При этом постоянная времени преобразователя  $T_\mu$  является малой некомпенсируемой постоянной.

Для удобства просмотра выходной координаты (тока якоря) применяется блок масштабирования, где выполняется деление текущего значения тока на значение номинального тока.

Контур регулирования тока настроен на модульный оптимум. Данная настройка подтверждается полученным графиком переходного процесса тока якоря в результате реакции на скачок задания (рис.4.3).

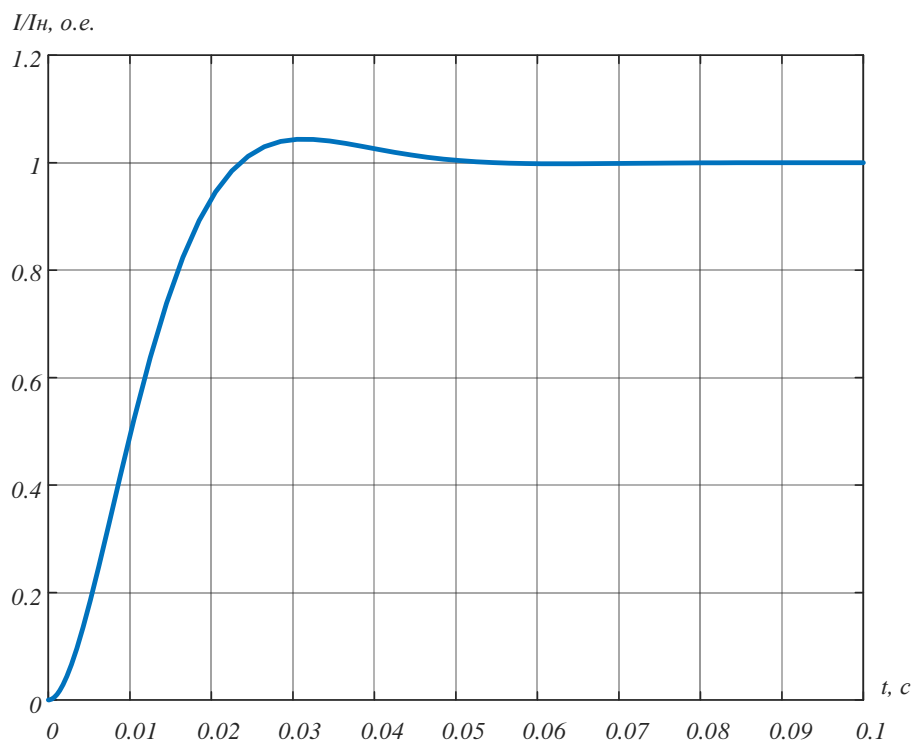


Рисунок 4.3 – Переходный процесс контура регулирования тока

При данной настройке изменение регулируемой координаты характеризуется следующими показателями:

- перерегулирование – 4,3%;
- время первого согласования -  $4,7 \cdot T_{\mu} = 4,7 \cdot 0,005 = 0,0235 \text{ с}$ .

На рисунке 4.4 показана Simulink-модель контура регулирования скорости. Данная модель содержит в себе Simulink-звенья, моделирующие динамику следующих узлов системы:

- контур регулирования тока якоря;
- механическая часть привода;
- датчик скорости;
- регулятор скорости с ограничением выходного сигнала.



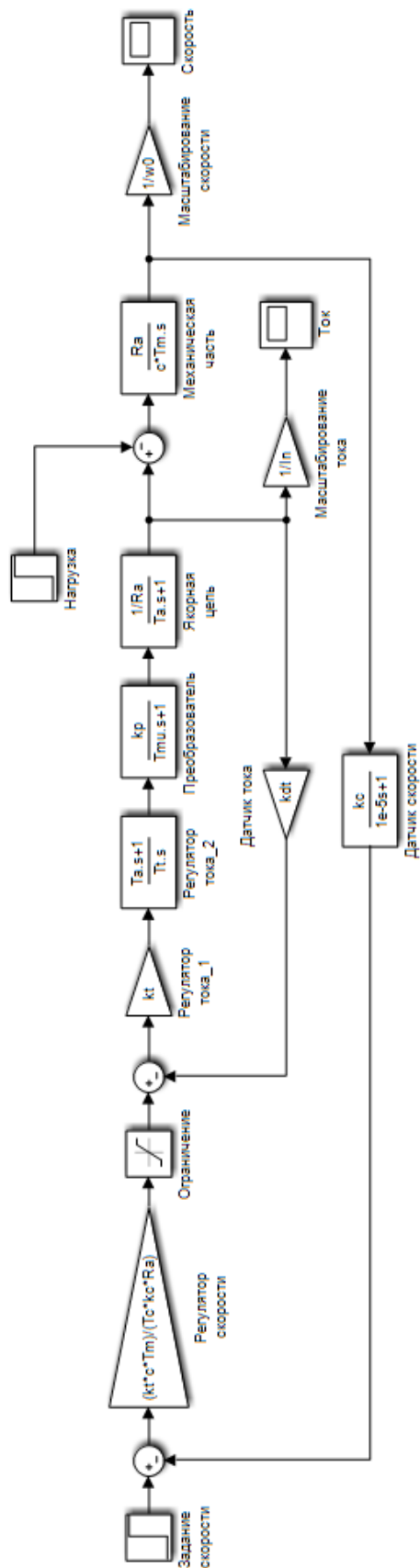


Рисунок 4.4 – Simulink-модель контура регулирования скорости

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Также в Simulink-модели контура регулирования скорости кроме масштабирования тока применяется блок масштабирования скорости, в котором выполняется деление текущего значения скорости на значение номинальной скорости.

Настройки регулятора скорости выбраны таким образом, чтобы обеспечить компенсацию влияния инерционностей и коэффициентов усиления звеньев в объекте регулирования и получить переходный процесс с приемлемым перерегулированием. Ограничение выходного сигнала регулятора скорости выбрано таким образом, чтобы ограничить ток на уровне номинального.

При математическом моделировании контура регулирования скорости учтем приложение нагрузки на электропривод в момент времени 0,5 с. Нагрузка соответствует току  $0,5 \cdot I_H$ .

На рисунке 4.5 показан переходный процесс изменения скорости в контуре регулирования скорости с учетом приложения нагрузки.

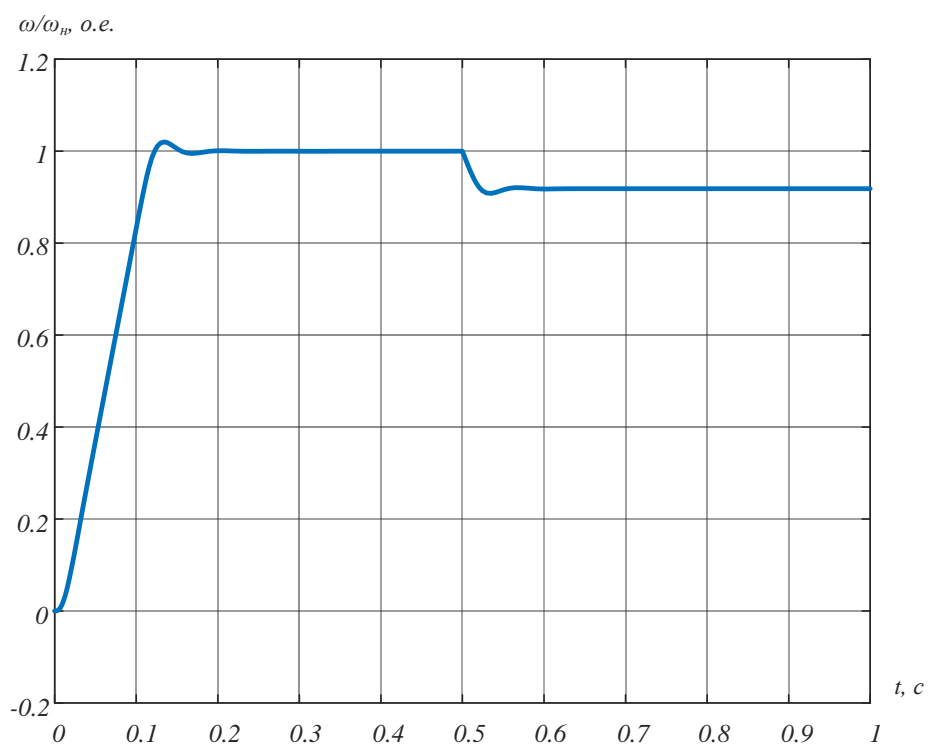


Рисунок 4.5 – Переходный процесс контура регулирования скорости

На рисунке 4.6 показан переходный процесс изменения тока в контуре регулирования скорости с учетом приложения нагрузки.

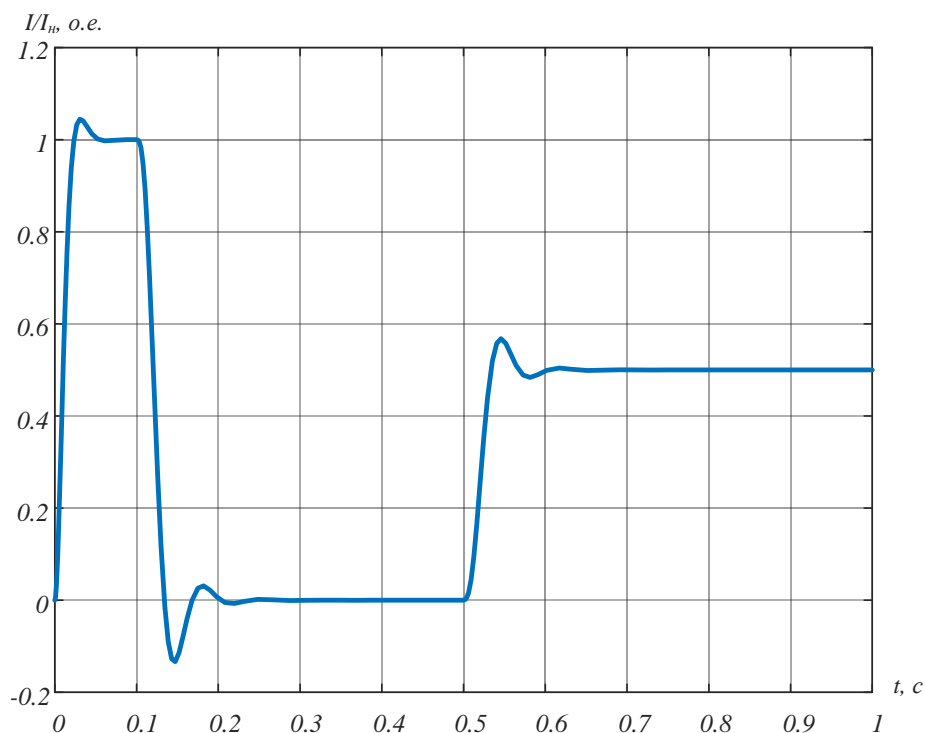


Рисунок 4.6 – Переходный процесс тока в контуре регулирования скорости

Полученные переходные процессы в контуре регулирования скорости позволяют утверждать об адекватности разработанной Simulink-модели контура регулирования скорости.

Также разработаем Simulink-модель контура регулирования положения с классическим линейным регулятором положения (рис. 4.7), результаты работы которой будем сравнивать с системой с нечетким регулятором положения.

На рисунке 4.8 и рисунке 4.9 показаны переходные процессы в системе положения с линейным регулятором положения. Как видно, в случае приложения нагрузки (рис. 4.9, момент времени 0,7...0,9 с) в системе появляется неприемлемая ошибка по положению. Данная ошибка является неприемлемой для рулевого электропривода ЛА.

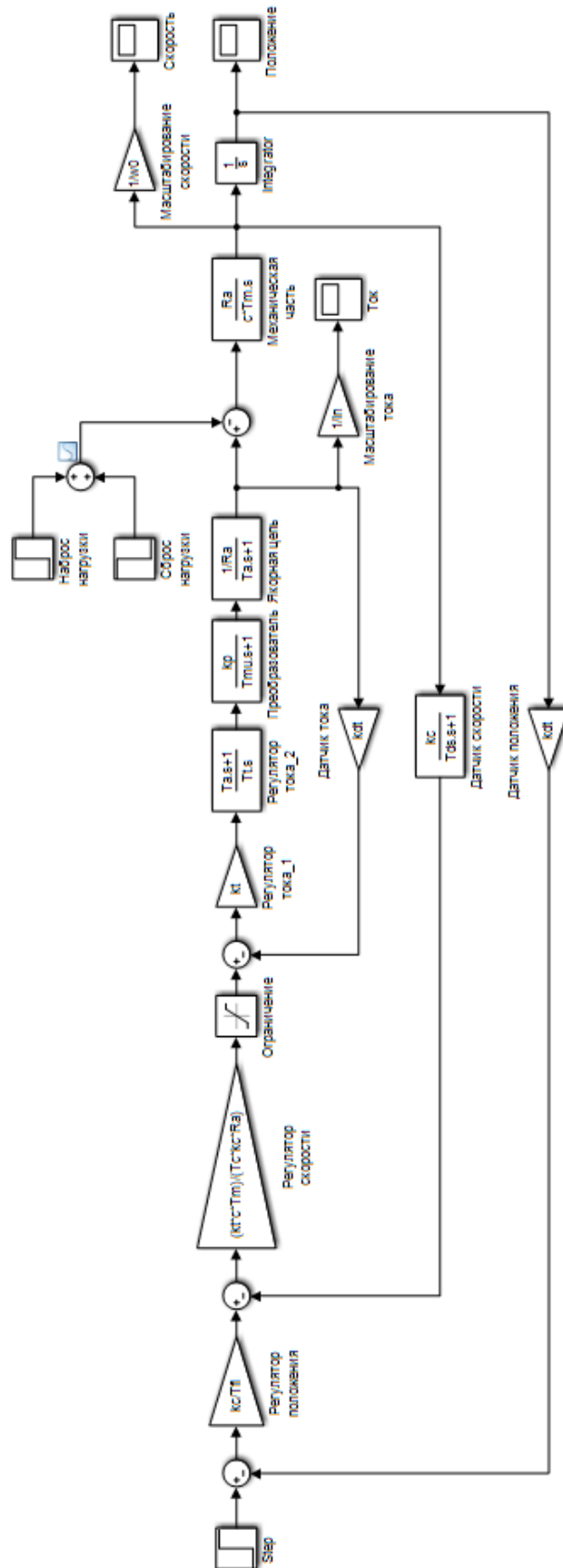


Рисунок 4.7 – Simulink-модель контура регулирования положения с линейным регулятором

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

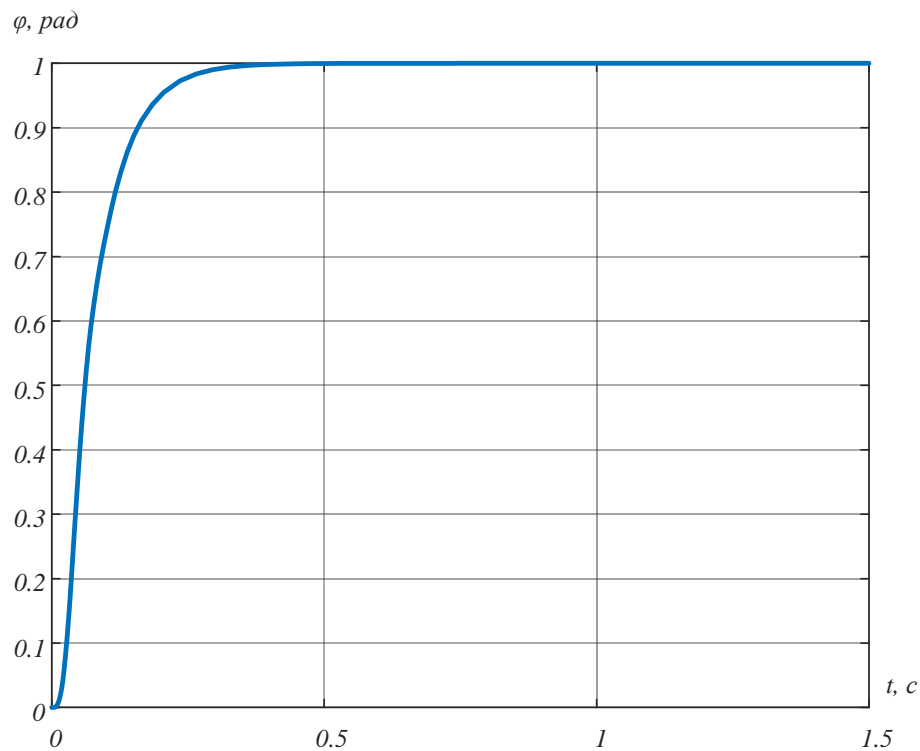


Рисунок 4.8 – Переходный процесс контура положения без нагрузки

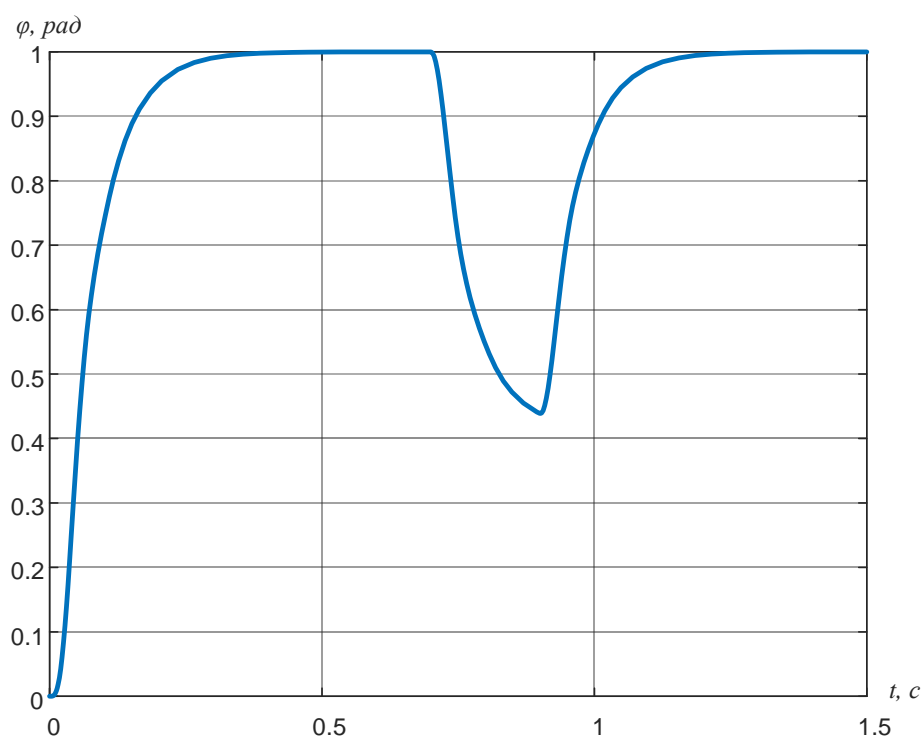


Рисунок 4.9 – Переходный процесс контура положения с нагрузкой

## 4.2 Математическая модель нечеткого регулятора в среде Simulink

Для разработки модели нечеткого регулятора положения необходимо инициализировать нечеткий регулятор в системе MatLab. Для этого в командной строке вводим команду `fuzzy`. После этого появляется стартовая страница разработки нечеткого регулятора, где необходимо сделать два входных канала. Добавление входных каналов осуществляется командой `Add Variable...` и `Input` из меню `Edit`. Один входной канал называем `Error` (ошибка регулирования положения), а другой входной канал – `Speed` (скорость электропривода).

Окно разработки нечеткого регулятора с двумя входными каналами показан на рисунке 4.10.

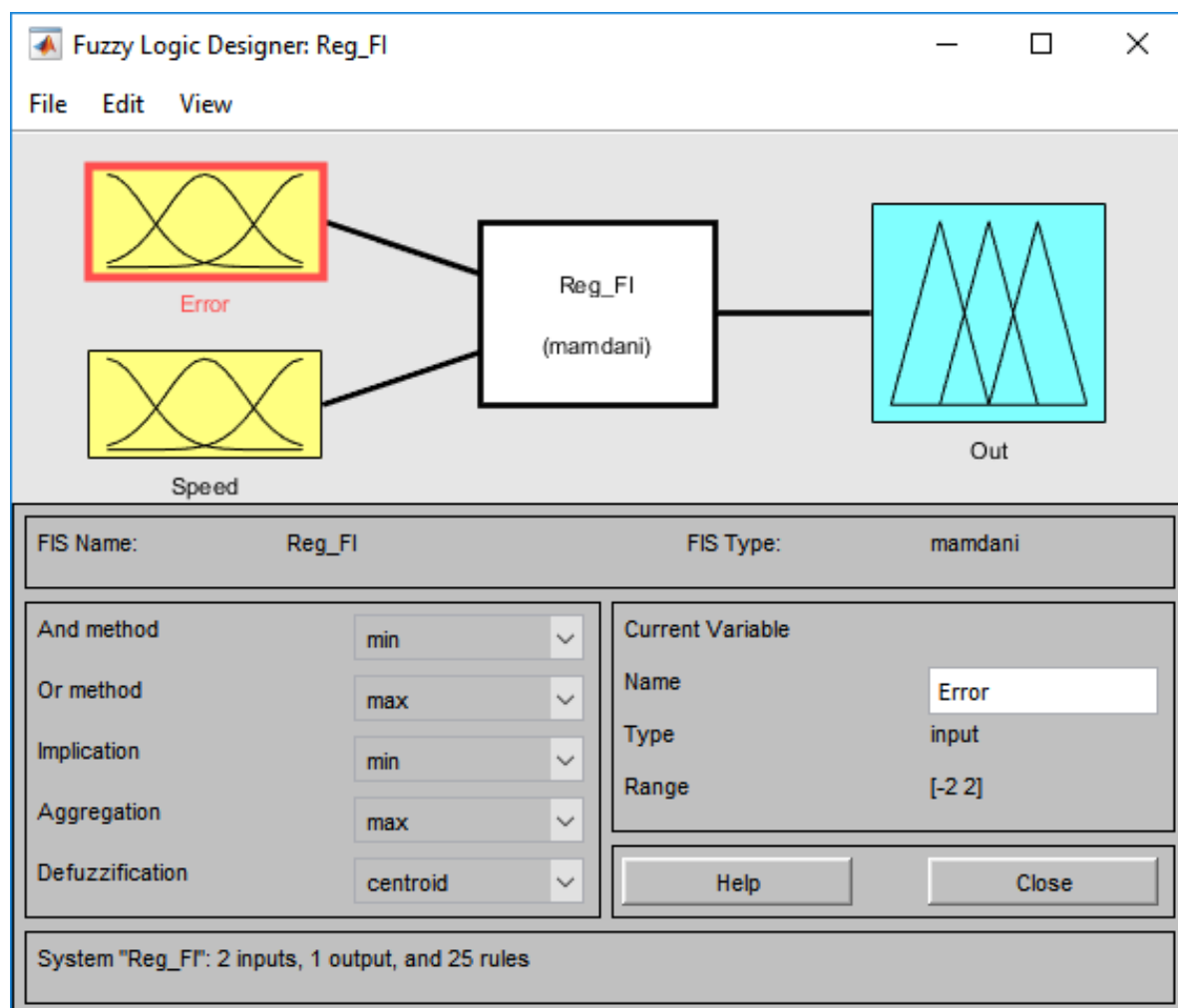


Рисунок 4.10 – Окно разработки нечеткого регулятора

Сам нечеткий регулятор назовем «Reg\_Fi».

Двойным нажатием левой клавиши мыши на первый входной канал нечеткого регулятора можно вызвать окно редактирования настроек данного канала. В вызванном окне для каждого канала необходимо выполнить настройки терм-множеств, где в соответствии с таблицей 3.1, указывается их имя, тип функции принадлежности и диапазон. На рисунке 4.11 показан вид окна настройки терм-множеств первого входного канала (ошибка регулирования положения). В данном случае для терм-множеств входной переменной использованы функции принадлежности треугольного типа (trimf), а также S-образного типа (zmf, smf).

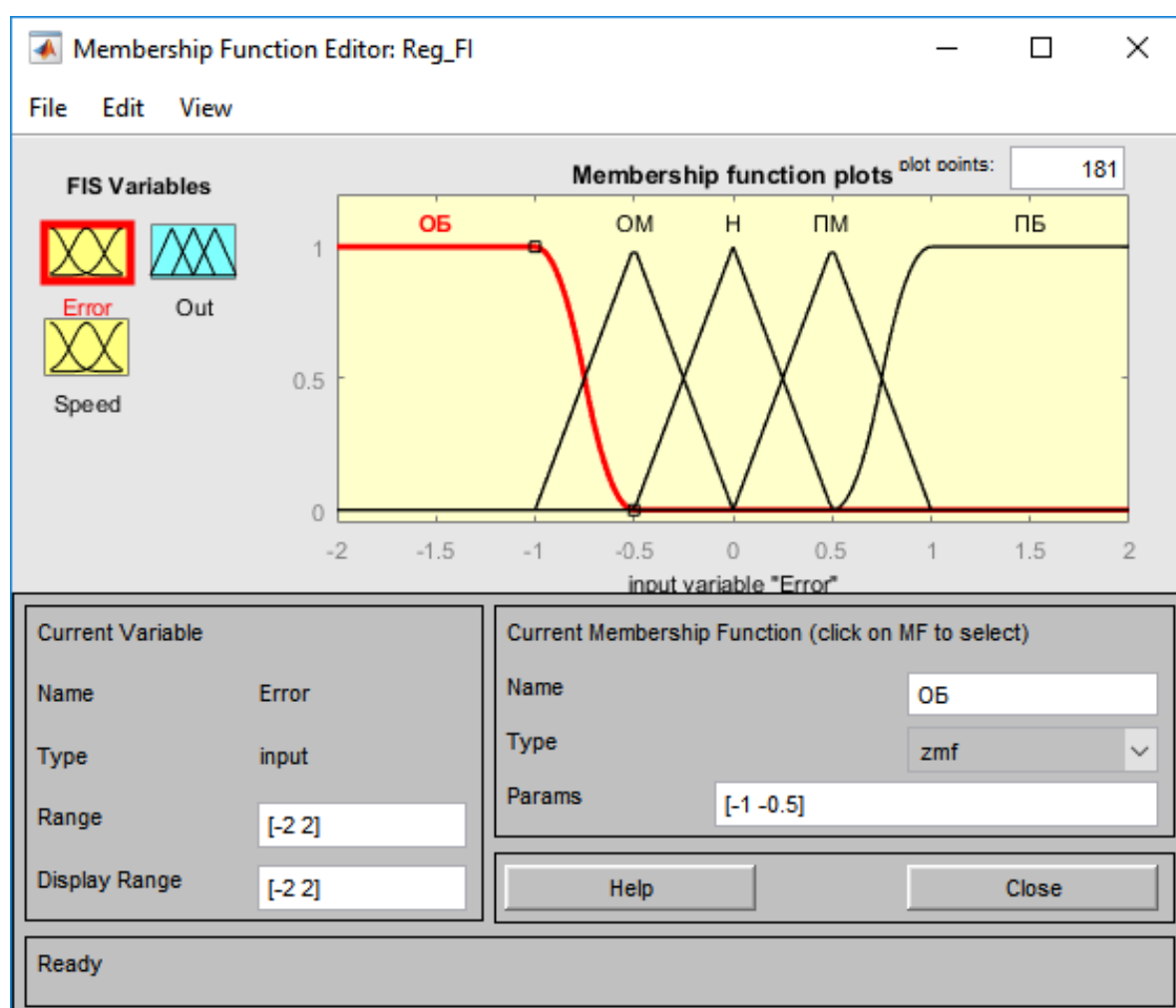


Рисунок 4.11 – Окно настроек терм-множеств входного канала «ошибка регулирования положения»

На рисунке 4.12 показан вид окна настройки терм-множеств второго входного канала (скорость электропривода). Данные терм-множества составлены на основе таблицы 3.2, терм-множества имеют функции принадлежности треугольного типа (trimf), а также S-образного типа (zmf, smf).

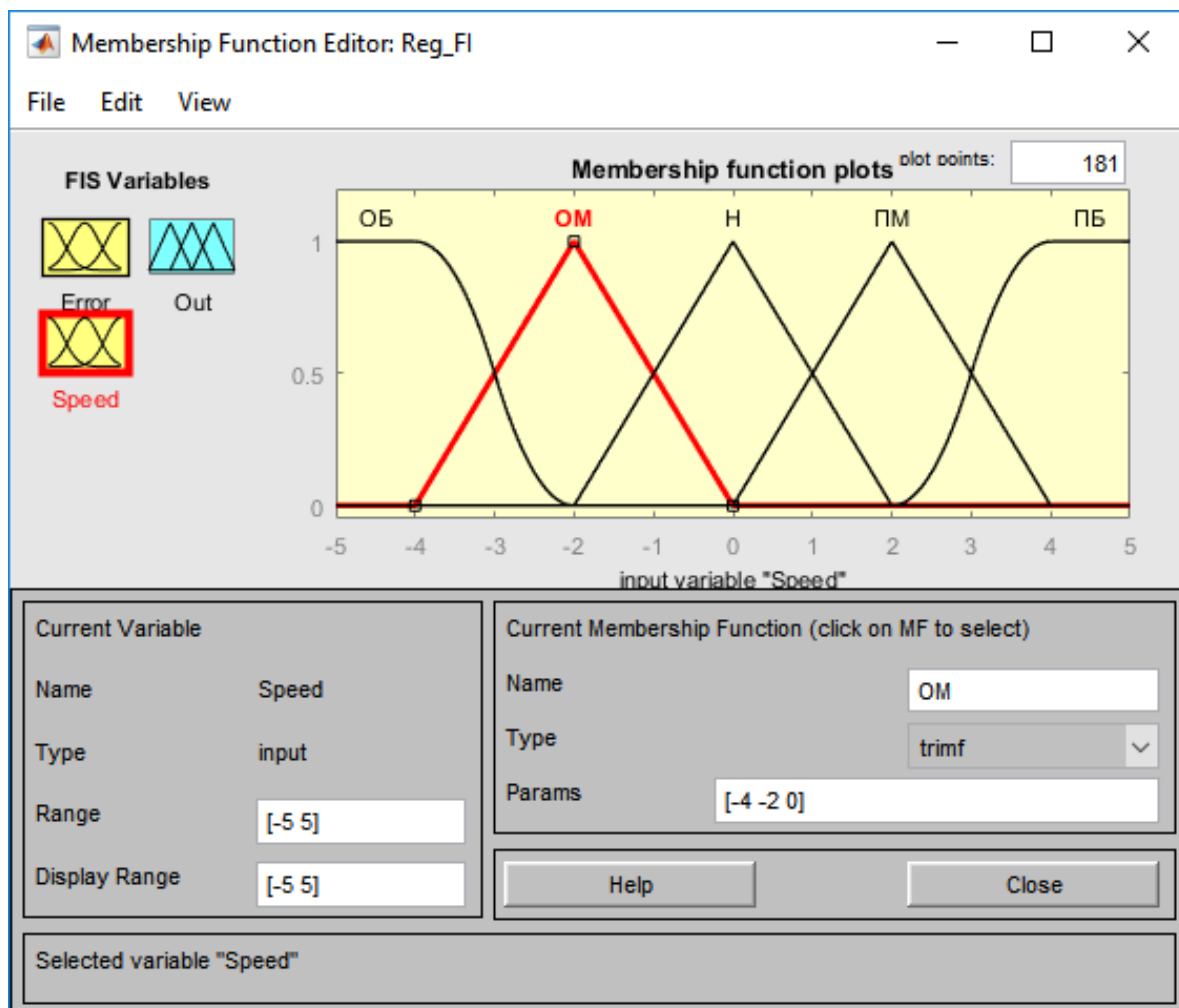


Рисунок 4.12 – Окно настроек терм-множеств входного канала «скорость электропривода»

Аналогичным образом выполнены настройки выходного канала нечеткого регулятора (сигнал заданной скорости). Результат настройки выходной переменной нечеткого регулятора показан на рисунке 4.13. Функции принадлежности терм-множеств выходной переменной имеют тип trimf (треугольный) и S-тип (zmf, smf).





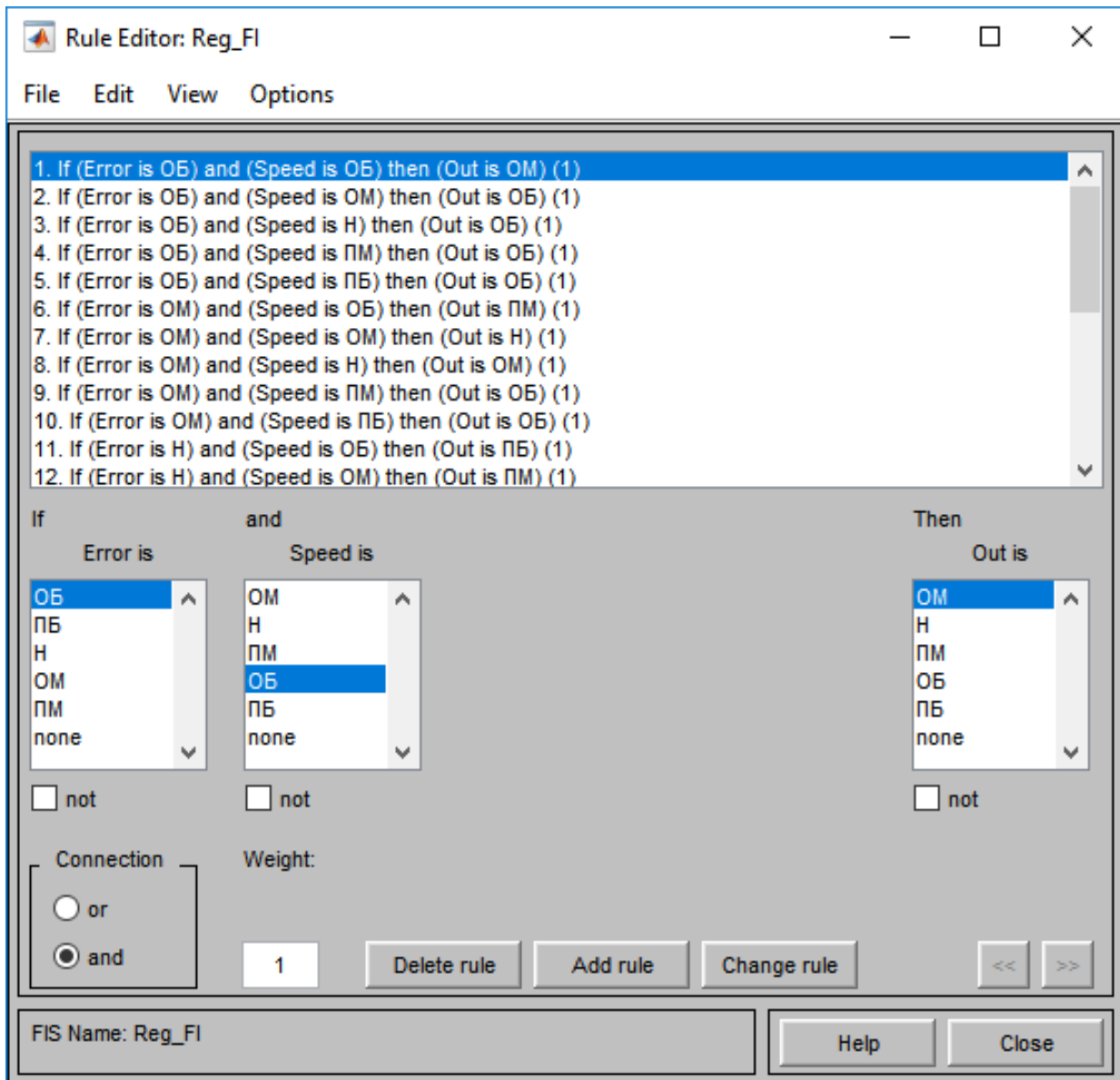


Рисунок 4.14 – Окно настроек правил нечеткого регулятора

Для добавления правил необходимо использовать кнопку «Add rule», для изменения – «Change rule», для удаления – «Delete Rule».

Полный набор правил разработанного нечеткого регулятора показан на рисунке 4.15.

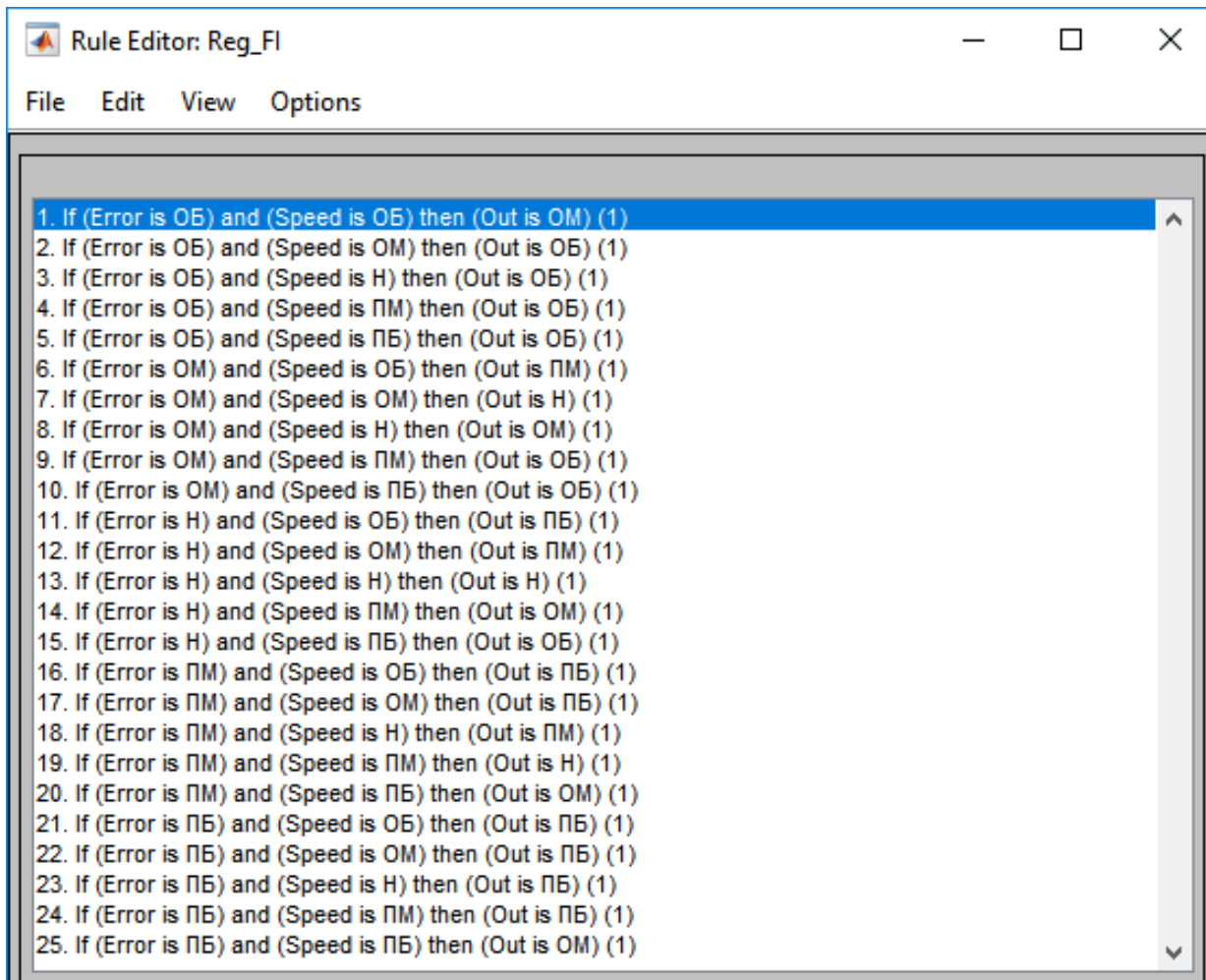


Рисунок 4.15 – Набор правил нечеткого регулятора

На рисунке 4.16 показано графическое отображение правил разработанного нечеткого регулятора. Такая форма представления правил работы регулятора позволяет в наглядной форме протестировать отработку регулятором тех или иных правил, заложенных в базу правил. Такое представление может быть применимо для анализа работы и тестирования разработанного регулятора при участии эксперта, т.к. результаты работы регулятора представляются в графически понятном виде.

Также внесенные правила работы нечеткого регулятора могут быть изображены графически в виде поверхности отклика. Вывод данной поверхности также возможен средствами разработки нечеткого регулятора в среде MatLab (рис. 4.17).

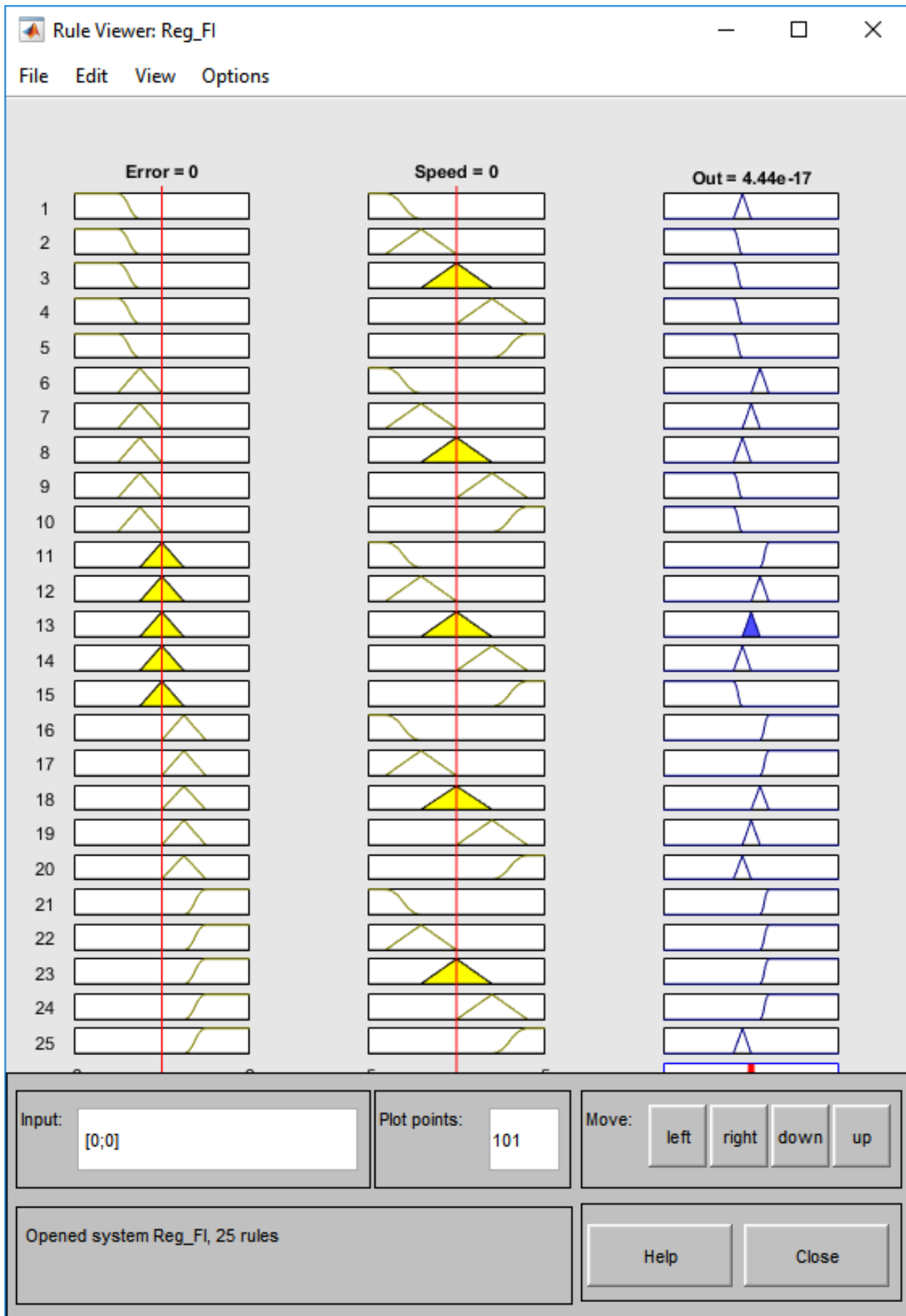


Рисунок 4.16 – Окно с графическим отображением правил нечеткого регулятора

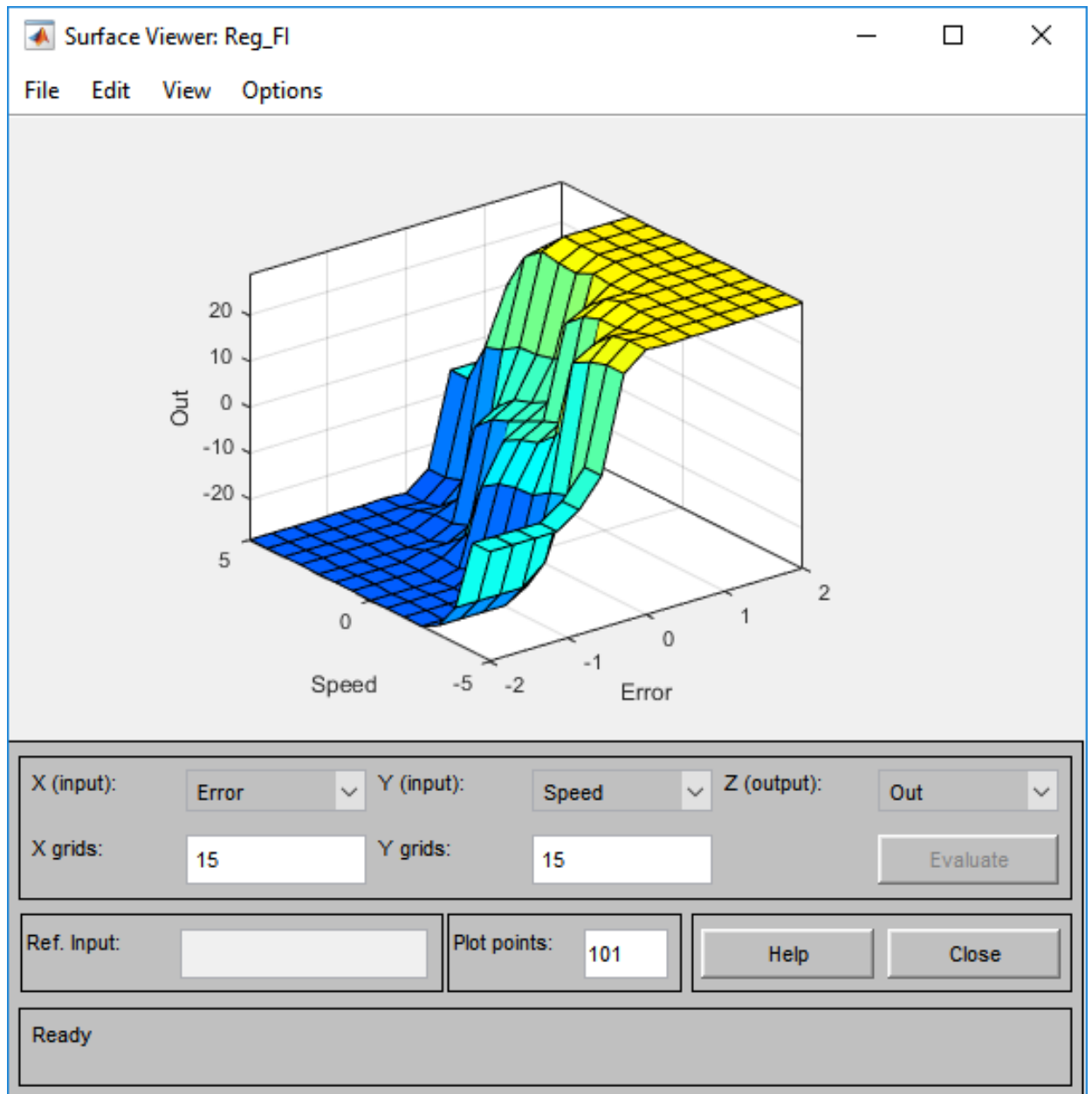


Рисунок 4.17 – Окно с графическим отображением поверхности правил нечеткого регулятора

Данная поверхность может быть получена при вызове команды Surface из меню Edit.

На поверхности отклика по оси X отложено изменение первого входного канала (ошибка регулирования положения), по оси Y отложено изменение второго канала (скорость электропривода), по оси Z отложена выходная координата нечеткого регулятора.

После внесения всех настроек в модель нечеткого регулятора необходимо выполнить сохранение регулятора в рабочей памяти системы MatLab. Это выполняется командой Export – To Workspace... в пункте меню File.

#### 4.3 Моделирование системы с нечетким регулятором

На рисунке 4.18 показана Simulink-модель системы регулирования положения с нечетким регулятором положения, разработанным выше.

В состав данной Simulink-модели входят следующие элементы системы:

- контур регулирования тока;
- контур регулирования скорости;
- датчик положения;
- регулятор положения с нечеткой логикой (блок «регулятор с Fuzzy»).

Также в модели учтен режим наброса и сброса нагрузки.

На рисунке 4.19 показано содержимое подсистемы регулятора положения «Регулятор с Fuzzy».

Как показали опыты математического моделирования, необходимо обеспечить подачу информации о скорости электропривода на соответствующий вход нечеткого регулятора с некоторыми корректирующими коэффициентами. Данные корректирующие коэффициенты учтены в Simulink-модели подсистемы «Регулятор с Fuzzy» (рис. 4.19) – коэффициенты  $K_{c1}$  и  $K_{c2}$ . Также при моделировании учитывался корректирующий коэффициент на выходе нечеткого регулятора  $K_f$ . Это необходимо для получения переходных процессов с приемлемыми показателями качества (ошибка, перерегулирование, колебательность).

На рисунке 4.19 с помощью блоков Switch, Switch1, Clock, Clock1 реализована логика переключения между корректирующими коэффициентами следующим образом:

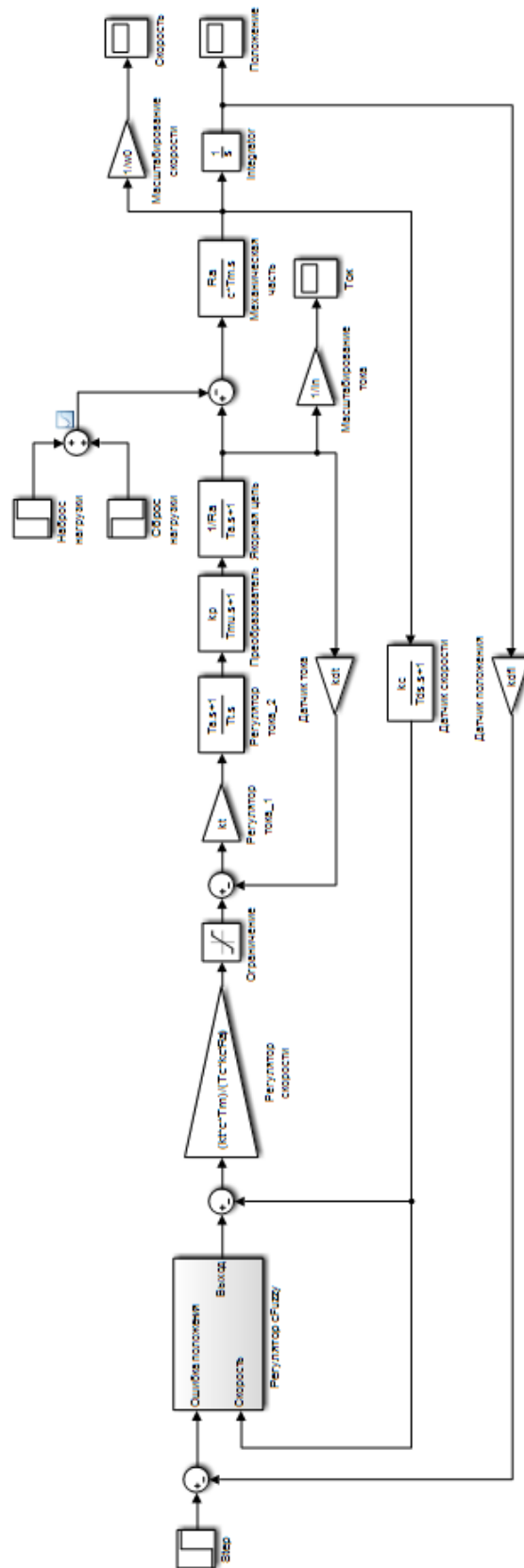


Рисунок 4.18 – Simulink-модель системы регулирования положения с нечетким регулятором

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

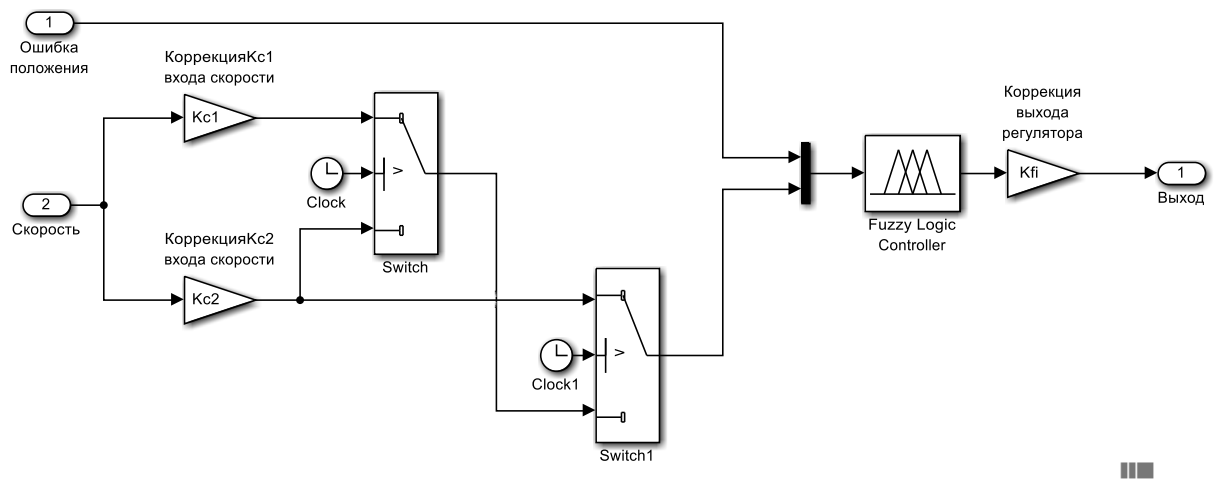


Рисунок 4.19 – Содержимое подсистемы «Регулятор с Fuzzy»

- при работе без нагрузки активен корректирующий коэффициент  $K_{c2}$ ;
- при работе под нагрузкой активен корректирующий коэффициент  $K_{c1}$ .

Эксперименты при моделировании показали наилучшие результаты со следующими значениями корректирующих коэффициентов -  $K_{c1}=0,1$  (работа с нагрузкой),  $K_{c2}=0,001$  (работа без нагрузки).

На рисунке 4.20 показан переходный процесс контура положения с нечетким регулятором при работе без нагрузки. В данном случае получено более быстрое завершение переходного процесса по положению в сравнении с системой на основе классического регулятора положения (рис. 4.8). При этом в случае системы регулирования положения с нечетким регулятором появилось перерегулирование по положению около 5%.

На рисунке 4.21 показан переходный процесс контура положения с нечетким регулятором с нагрузкой и без смены корректирующих коэффициентов  $K_{c1}$  и  $K_{c2}$ . Видно, что при действии нагрузки в моменты времени 0,7...0,9 с, переходные процессы в системе с нечетким регулятором не обеспечивают компенсацию влияния нагрузки, также, как и в системе с классическим линейным регулятором положения (рис. 4.9).



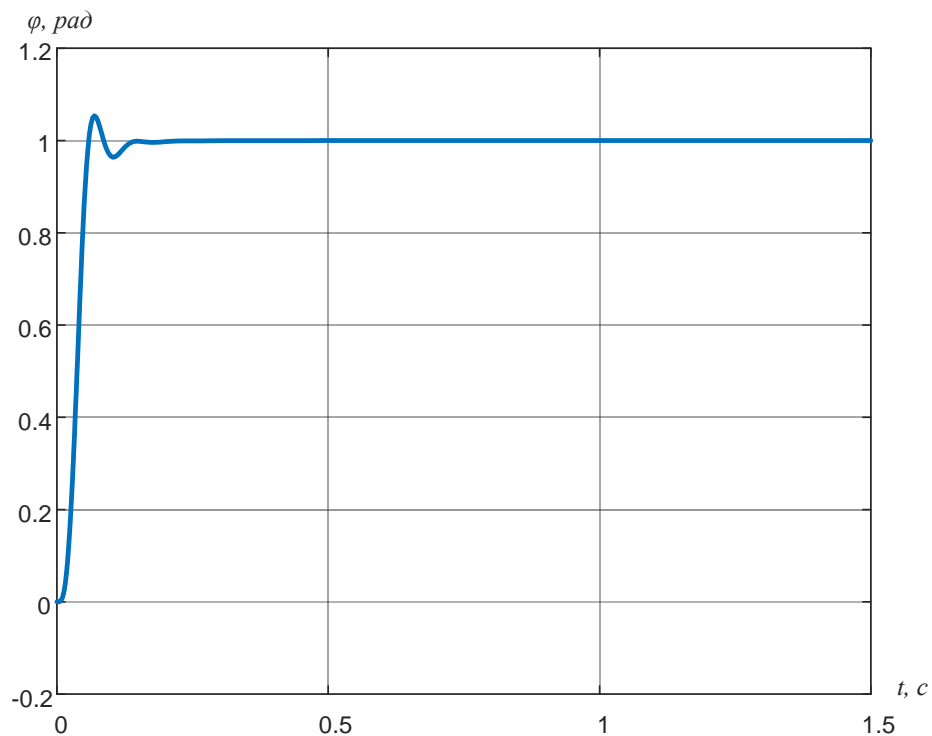


Рисунок 4.20 – Переходный процесс контура положения с нечетким регулятором без нагрузки

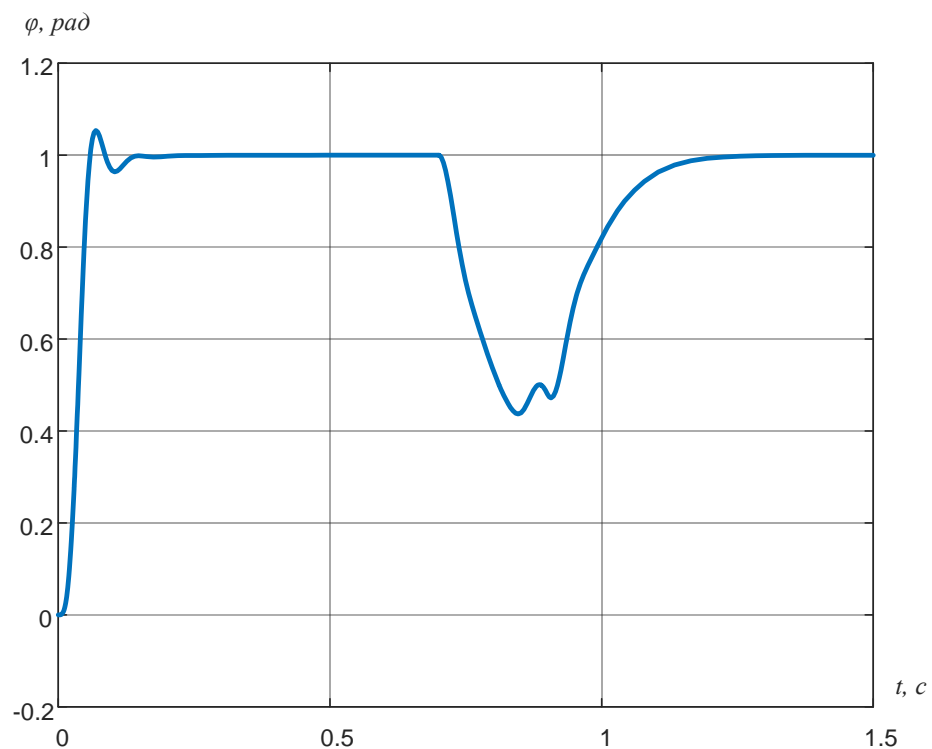


Рисунок 4.21 – Переходный процесс контура положения с нечетким регулятором с нагрузкой и без смены корректирующих коэффициентов

На рисунке 4.22 показан переходный процесс контура положения с нечетким регулятором с нагрузкой и логикой смены корректирующих коэффициентов –  $K_{с1}=0,1$  (работа с нагрузкой),  $K_{с2}=0,001$  (работа без нагрузки).

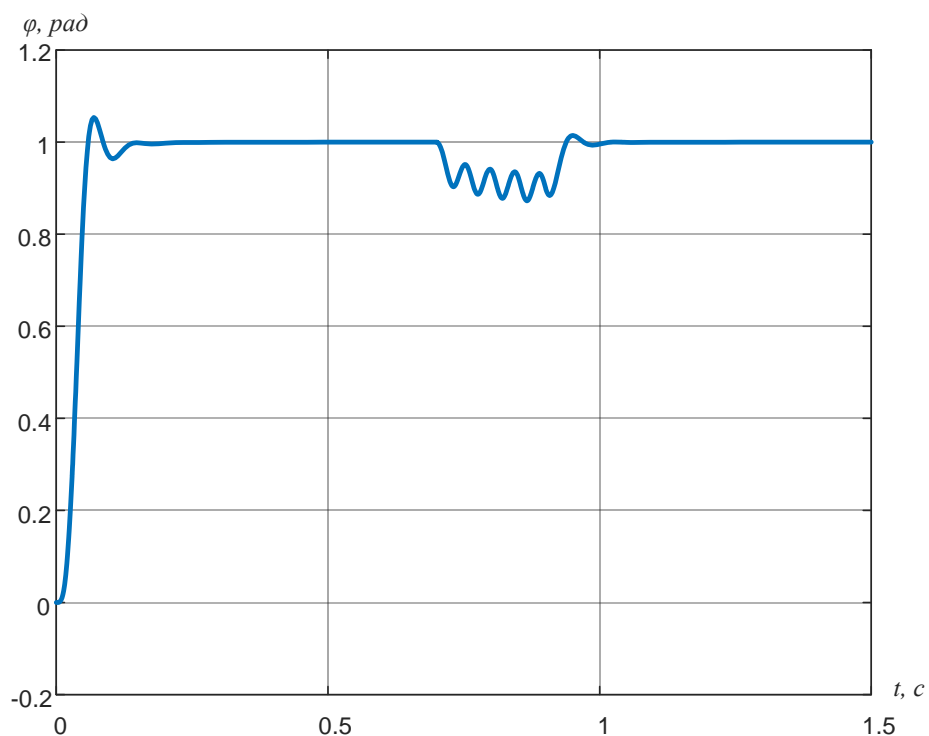


Рисунок 4.22 – Переходный процесс контура положения с нечетким регулятором с нагрузкой и логикой смены корректирующих коэффициентов

#### 4.4 Выводы по главе

В данной главе выполнено исследование системы управления рулевым электроприводом с помощью математического моделирования. Для этого в среде Simulink разработана и исследована математическая модель управления, разработана модель нечеткого регулятора положения и проведено математическое моделирование системы с нечетким регулятором положения.

Для обеспечения приемлемого качества переходных процессов регулирования положения в режимах работы без нагрузки и под нагрузкой предложено применять корректирующие коэффициенты  $K_{с1}$  и  $K_{с2}$  для входа нечеткого регулятора «скорость электропривода».

Нагрузка может быть вызвана не только работой механизма рулевого электропривода ЛА, но и действующими возмущениями, возникающими от различных внешних факторов.

Смена корректирующих коэффициентов на входе «скорость электропривода» позволяет получить некоторую компенсацию влияния нагрузки при отработке заданного перемещения электропривода.

Увеличение значения  $K_{с1}$  более чем 0,1 не приводит к улучшению качества переходных процессов при нагрузке, а наоборот – увеличивает колебательность системы.

					<i>ЮУрГУ – 130302.2020.616.11 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>63</i>

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе выполнена разработка и исследование системы рулевого электропривода летательного аппарата с применением технологии нечеткой логики.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ рулевого электропривода летательного аппарата как объекта управления.
2. Выполнен обзор технологии нечеткой логики, необходимый для выполнения данной работы.
3. Разработана структурная схема системы управления рулевым электроприводом летательного аппарата на основе нечеткой логики.
4. Разработан нечеткий регулятор для управления электроприводом рулевого механизма.
5. Выполнено исследование системы управления рулевым электроприводом с помощью математического моделирования.
6. При математическом моделировании предложено применение корректирующих коэффициентов для учета информации о скорости электропривода.
7. Опытным путем при математическом моделировании определены значения корректирующих коэффициентов для обеспечения приемлемого качества переходных процессов по положению как при работе без нагрузки, так и при работе под нагрузкой.

						Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ЮУрГУ – 130302.2020.616.11 ПЗ ВКР	64

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красовский А.А. Системы автоматического управления летательных аппаратов / А.А. Красовский, Ю.А. Вавилов, А.И. Сучков. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1986 г. – 476 с.

2. Системы управления летательных аппаратов: учебник для курсантов и слушателей вузов ВВС / под ред. В.В. Воробьева. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008 г. – 203 с.

3. Гарганеев А.Г. Техничко-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием / А.Г. Гарганеев, С.А. Харитонов // Доклады ТУСУРа, №2 (20), декабрь 2009. – с. 179 – 184.

4. Лёвин А.В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования / А.В. Лёвин, С.П. Халютин, Б.В. Жмуров // Научный вестник МГТУ ГА, №213, 2015. – 8 с.

5. Киселев М.А. Электрический привод для адаптивного крыла летательного аппарата / М.А. Киселев, Ф.Р. Исмагилов, В.Е. Вавилов, И.Ф. Саяхов // Вестник УГАТУ, 2017, т. 21, №1(75). – с. 136 – 141.

6. Саяхов И.Ф. Электромеханические приводы для управления адаптивными крыльями летательных аппаратов / И.Ф. Саяхов, А.Н. Николаева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. №1, т. 13, 2017. – с. 37 – 42.

7. Занорин С.М. Математические модели рулевых электроприводов летательных аппаратов / С.М. Занорин, Р.И. Балабаев // Известия ЮФУ. Технические науки, 2006, 6(61) – с. 246 – 254.

8. Веселов Г.Е. Синергетическое управление электрическими рулевыми приводами / Г.Е. Веселов, С.М. Занорин, А.А. Осташин, Р.И. Балабаев // Известия ЮФУ. Технические науки, 2006, 6(61) – с. 254 – 263.

9. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

					<i>ЮУрГУ – 130302.2020.616.11 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
11. Демидова Г.Л., Лукичев Д.В. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 81 с.
12. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления - СПб.: БХВ-Петербург, 2011. - 416 с.
13. Пегат Анджей. Нечеткое моделирование и управление. – М. Бином, 2009. – 798 с.
14. Усков А.А. Системы с нечеткими моделями объектов управления. – Смоленск: СФРУК, 2013. – 153 с.
15. Усков А.А., Киселев Е.В. Теория нечетких супервизорных систем управления. – Смоленск: СФРУК, 2013. – с. 161.
16. Усков А.А., Круглов В.В. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. – Смоленск: СГТ, 2003. – с. 177.
17. Воронин, С. Г. Электропривод летательных аппаратов (Ч. 1): конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2006. – с. 170.
18. Воронин, С. Г. Электропривод летательных аппаратов (Ч. 2): конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2008. – с. 114.
19. Шилкина С.В. Контроллер нечеткой логики в управлении технологическими процессами / С.В. Шилкина, Е.Н. Фокина // Вестник СибАДИ, том 15(59), №1, 2018 г. – с. 106 – 114.
20. Карпович Д.С. Синтез системы управления с нечетким регулятором и шумом во входном канале / Д.С. Карпович, А.Н. Шумский // Труды БГТУ, серия 3, №1, 2017. – с. 52 – 57.
21. Карпович Д.С. Система управления беспилотным летательным аппаратом с применением теории нечетких множеств / Д.С. Карпович, А.Н. Шумский, В.В. Сарака // Труды БГТУ, №6, 2016. – с. 110 – 116.

22. Энаятоллах А.С. Контроллер позиционного электропривода на основе нечеткой логики / Алави Сайед Энаятоллах, Ю.Р. Петренко // Труды БГТУ. Серия 4. 2008. – 4 с.
23. Маргацкая Е.А. Нечеткий регулятор как средство повышения точности позиционирования и быстродействия в системе управления малыми линейными перемещениями / Е.А. Маргацкая, С.А. Гордеев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014, том.14, №4. – с. 60 – 66.
24. Меспорян А.В. К вопросу об эффективности применения нечеткой логики в системах управления исполнительными гидроприводами / А.В. Меспорян, Р.Р. Шарипов // Вектор науки ТГУ, 2019, №2(48). – с. 49 – 56.
25. Муравьева Е.А. Разработка метода адаптации нечеткого регулятора, предназначенного для регулирования технологических параметров / Е.А. Муравьева, Д.С. Радакина, М.И. Шарипов, Э.Р. Еникеева, Э.М. Артыкаева // Вестник Чувашского университета, 2018, №1. – с. 137 – 145.
26. Бошляков А.А. Проектирование нечеткого регулятора следящей системы / А.А. Бошляков, В.И. Рубцов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2013. – 11 с.
27. Лукичев Д.В. Нечеткая система управления позиционным следящим электроприводом опорно-поворотных устройств с нежесткими осями / Д.В. Лукичев, Г.Л. Демидова // Вестник ИГЭУ, вып. 6, 2013. – 5 с.