

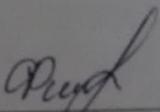
Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение
Высшего образования
«Комсомольский - на - Амуре государственный технический университет»

Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок»
Направление 27.04.04 – «Управление в технических системах»
Профиль «Управление и информатика в технических системах»

К ЗАЩИТЕ ДОПУСКАЮ
Заведующий кафедрой
 В.А. Соловьев
«06» 06 2016 г.

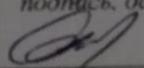
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
Моделирование нечетких систем управления с переменной
структурой

Студентка группы 4АУм-1


подпись, дата

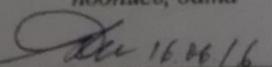
А.С. Филатова

Научный руководитель
канд. техн. наук, доцент


подпись, дата

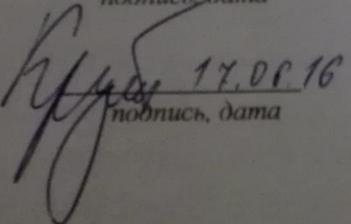
С.П. Черный

Нормоконтролёр


подпись, дата

Н.Е. Дерюжкова

Рецензент


подпись, дата

Р.Н. Кравцов

2016

Кортун
Елена Борисовна

Проверено

23.06.2016 Зачтено Библиотека

РЕЦЕНЗИЯ
на магистерскую диссертацию

студента федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Рихтовский Анны Сергеевны

(Ф.И.О.)

по направлению 27.04.04- Управление в технических системах

Тема магистерской диссертации Моделирование нечетких систем
управления с переменной структурой

Объем работы:

количество листов пояснительной записки 83

количество листов чертежей 6

Заключение о степени соответствия, выполненной работы заданию _____

максимум соответствия.

Характеристика выполнения каждого раздела работы, степень использова-
ния последних достижений науки и техники, передовых методов работы

В первом разделе представлены существующие
подходы к построению интеллектуальных систем
управления. Вторым разделом получена описанию
специального положения теории нечетких систем
с примененной типовой структуры регулятора.
Третье глава описывает исследование нечеткого
многосекторного регулятора и применение
его в нечеткой структуре и даны формулы
для. В четвертом разделе проведен анализ
ММР по быстроты реакции с учетом влияния
структурной структуры.

Перечень положительных качеств работы _____

1. Представлена модель многосекторного нечеткого
регулятора и даны формулы для его
структуры. В заключении даны формулы
структуры.

2. Исследование, обработка и интерпретация
данных уравнений для различных составов
многократного резонатора

Перечень основных недостатков работы

1. Не совсем корректное сочетание некоторых
критериев выбора для многократного резонатора
2. Не проведена оценка многократного
резонатора с разнесенной информационной
связью на адекватность

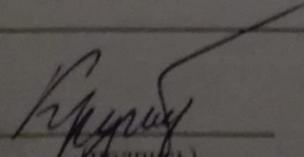
Оценка качества магистерской диссертации

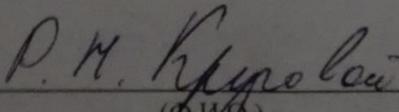
В целом магистерская диссертация
выполнена на уровне общеобразовательном
уровне. Проведенные расчеты и моделирование
не вызывают сомнений.

Отзыв о работе в целом и предполагаемая оценка

С работой связанной оригинальностью
и качеством обработки предоставленного
материала считаю что работа выполнена
в полной «объемно»

Рецензент


(подпись)
Канд. техн. наук
(должность)


(Ф.И.О.)

«17» 06 2016 г.

О Т З Ы В
на магистерскую диссертацию

студента федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Филатовой Анны Сергеевны

(Ф.И.О.)

по направлению 27.04.04 – Управление в технических системах

Тема магистерской диссертации Моделирование нечетких систем управ-
ления с переменной структурой

Объем работы:

количество листов пояснительной записки 83

количество листов чертежей 6

Заключение о степени соответствия, выполненной работы заданию _____
полностью соответствует

Проявленная диссертантом самостоятельность при выполнении работы. Ритмичность и дисциплинированность в работе. Умение пользоваться литературным материалом, индивидуальные особенности диссертанта _____
При выполнении выпускной квалификационной работы студентом была проявлена самостоятельность, методичность и дисциплинированность. Основные главы пояснительной записки, расчеты, модели, алгоритмы и программная реализация законов управления выполнялись четко согласно принятого ранее графика работы над магистерской диссертации. Дипломником был охвачен достаточный спектр учебной и специальной технической литературы. В процессе работы над пояснительной запиской студентом были проявлены достаточная самостоятельность, методичность при разработку материалов ВКР, а также способность к постановке и решению задач соответствующих направлению подготовки

Положительные стороны работы _____

К положительным сторонам представленной выпускной квалификационной работы необходимо отнести использование современного программного обеспечения, как промышленного, так и средств моделирования, широкий спектр реализованных алгоритмов управления, математический аппарат применяемый при реализации различных законов регулирования. Кроме того, проведен анализ адаптивных возможностей многокаскадных нечетких систем регулирования при изменении их внутренней структуры

Недостатки работы _____

1. Не обоснован выбор именно такого подхода к реализации интеллектуальных систем управления и не выявлены его преимущества перед другими
2. Не проведен анализ нечеткой многокаскадной системы при реализации законов регулирования для нелинейных объектов

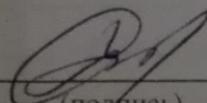
Характеристика общетехнической и специальной подготовки диссертанта

В целом по результатам выполнения выпускной квалификационной работы можно сделать вывод о достаточно высоком уровне общетехнической специальной подготовке студента

Заключение и предлагаемая оценка работы _____

С учетом достаточной степени оригинальности ^{-13,7%} пояснительной пилски выпускной квалификационной работы, качества и проработанности представляемого материала считаю, что текстовая часть выполнена с оценкой «отлично», графическая часть с оценкой «отлично». В целом работу можно оценить на «отлично»

Научный руководитель, _____


(подпись)

Черный С.П.
(Ф.И.О.)

должность, ученая степень _____ доцент, канд. техн. наук

« _____ » _____ 201

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Кафедра АП и АПУ

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

[Подпись]

« 16 » ав 2015 г.

ЗАДАНИЕ
на магистерскую диссертацию

Выдано студенту группа ЧАЧ-1 Филозовой Анне Сергеевне
Тема магистерской диссертации Моделирование
клеточных сетей управления с переменной
структурой

утверждена приказом по университету № 20-0 от 21.01.2015.

Срок сдачи студентом законченной работы _____

Исходные данные к работе материалы производственной
практики

Перечень подлежащих разработке вопросов: _____

Введение

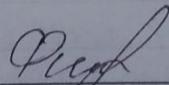
- 1 Анализ существующих подходов к построению
интеллектуальных сетей управления
- 2 Интеллектуальные сети управления
на основе машинного зрения
 - 2.1 Математическое описание клеточных
регуляторов
 - 2.1.1 Различия
 - 2.1.2 Матрица разности

- 2.1.3 Методы логические входы
- 2.1.4 Декодирование
- 3 Методы многокаскадные системы управления
- 3.1 Описание объекта управления
- 3.2 Структурная и функциональная системы управления
- 4 Описание и исследование методов многокаскадных регуляторов при управлении их функцией структуры
- 5 Оценка эффективности работы каскадного регулятора по быстродействию замкнутой

Перечень графического материала:

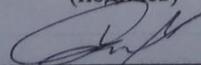
- 1 Структурные схемы объектов управления
- 2 Функциональная схема многокаскадного каскадного ПЧД-регулятора
- 3 Функциональная схема МНПР без прорывной, дифференциальной, интегрирующей составляющих (3 варианта)
- 4 Функциональная схема МНПР с структурной избыточностью
- 5 Динамические характеристики

Задание принял к исполнению


(подпись)

«05» 02 2015 г.

Научный руководитель,


(подпись)

Черный С. П.
(Ф.И.О.)

должность, ученая степень

доктор техн. наук, доцент

«05» 02 2015 г.

Аннотация

Моделирование нечетких систем управления с переменной структурой

Пояснительная записка 84с., 41 рис., 32 источника, приложения отсутствуют.

В интеллектуальной системе управления проверили адаптивность к различным возмущающими воздействиям и вычислили время отработки каждого из регулятора. Проведен анализ существующих подходов к построению нечетких систем управления с использованием различных алгоритмов вывода. Разработана интеллектуальная модель управления. Описан и исследован нечеткий регулятор при изменении их внутренней структуры. Оценка эффективности работы нечеткого регулятора по быстродействию.

Abstract

Simulation of fuzzy control systems with variable structure

Explanatory Note 84с., 41 fig., 32 sources, no application.

The intelligent control system to check the adaptability to various disturbance and calculated the time of processing of each regulator. The analysis of existing approaches to the construction of fuzzy control systems using a variety of output algorithms. The intellectual model of governance. Described and investigated the fuzzy controller when changing their internal structure. Evaluation of the effectiveness of the fuzzy controller for speed.

Содержание

Введение.....	5
1 Анализ существующих подходов к построению интеллектуальных систем управления.....	8
2 Интеллектуальные системы управления на основе мягких вычислений.....	16
2.1 Математическое описание нечетких регуляторов.....	16
2.1.1 Фаззификация.....	21
2.1.2 Нечеткая база знаний.....	24
2.1.3 Нечеткие логические выводы.....	25
2.1.4 Дефаззификация.....	31
3 Нечеткие многокаскадные системы управления.....	33
3.1 Описание объекта управления.....	33
3.2 Синтез интеллектуальной системы управления.....	35
4 Описание и исследование нечетких многокаскадных регуляторов при изменении их внутренней структуры.....	52
5 Оценка эффективности работы нечеткого регулятора по быстродействию.....	74
Заключение.....	79
Список использованных источников.....	80

Введение

Исторически сложилось так, что специалисты в области управления занимались лишь поиском процедуры управления объектом (ОУ), когда и сам объект, и критерий управления им были уже описаны в точных терминах. Лишь на последнем этапе развития теории автоматического управления (ТАУ) внимание специалистов переместилось на проблему идентификации объекта управления (ОУ). С течением времени объекты управления развивались, стали более сложными, из-за чего типовые наработанные приемы стали неприменимы к нетрадиционным объектам управления[1].

В свое время появление формальной логики было шагом вперед в борьбе с неопределенностью, расплывчивостью представления человеческих знаний. Логика была призвана исключить не строгость, неоднозначность из рассуждений [10]. Теперь же возникла необходимость создания теории, позволяющей формально описывать нестрогие, нечеткие понятия и обеспечивающие возможность продвинуться в познании процессов рассуждений, содержащих такие понятия. Крупным шагом в этом направлении явился подход, основанный на использовании понятий нечеткого множества Л. Заде[1]. Этот подход позволяет дать строгое математическое описание в действительности расплывчатых утверждений, реализуя таким образом попытку преодолеть лингвистический барьер между человеком, суждения и оценки которого являются приближенными и нечеткими, и машинами, которые могут выполнять только четкие инструкции.

В области техники теория нечетких алгоритмов стимулирует развитие гибких автоматизированных производств и робототехнических комплексов, в частности, роботов, способных выполнять отдельные интеллектуальные действия человека[2]. Это создает предпосылки как развитию командного

управления (выполнения нечетких инструкций), так и созданию управляемых систем с повышенной автономностью[15].

Источниками неопределенностей такого представления являются: невозможность точного измерения реальных величин; невозможность полного и четкого описания многих физических объектов и ситуаций; принципиальные ограничения по точности и большие погрешности выполнения сенсорных или перцептивных действий[10]; неточность исполнительских действий, которые зачастую не достигают цели; недостаточность размерности модели, не позволяющая отразить все значимые свойства мира. Все это позволяет считать отношение моделирования нечетким.

Математическая теория нечетких множеств (fuzzysets) и нечеткая логика (fuzzylogic) являются обобщениями классической теории множеств и классической формальной логики [12].

Стало уделяться внимание вопросам построения экспертных систем, построенных на нечеткой логике, разработке нечетких контроллеров. Нечеткие экспертные системы принятия решений находят широкое применение в медицине и экономике. Наконец, в третьем периоде, который длится с конца 80-х годов и продолжается в настоящее время, появляются пакеты программ для построения экспертных систем, а области применения нечеткой логики заметно расширяются. Она применяется в аэрокосмической и машиностроительной промышленности, в бытовой технике, в сфере финансов, анализа и принятия управленческих решений и многих других. В отличие от традиционной математики, требующей на каждом шаге моделирования точных и однозначных формулировок закономерностей, нечеткая логика предлагает совершенно иной уровень мышления, благодаря которому процесс моделирования происходит на уровне абстракции, при котором постулируется лишь минимальный набор закономерностей [4].

Нечеткие модели являются связующим звеном между двумя подходами – количественным и качественным, и являются наиболее приемлемыми для

описания слабо формализованных процессов. С помощью нечетких логических систем имеется возможность имитации мыслительных способностей человека при описании управления процессами, используя сравнительно небольшое количество правил. С помощью нечеткого представления довольно несложно описать переходы в пространстве состояний, исходя из желаемых свойств функционирования системы, даже когда проектировщик имеет лишь смутные представления об их природе. Нечёткие системы позволяют повысить качество продукции при уменьшении ресурса энергозатрат, обеспечивают более высокую устойчивость к воздействию внешних факторов, по сравнению с традиционными системами автоматического управления. Новые подходы позволяют расширить сферу приложения систем автоматизации за пределы применимости классической теории [8].

1 Анализ существующих подходов к построению интеллектуальных систем управления

Основная функция интеллектуальных САУ, качественно отличающая их от других САУ – это реализация определенных «разумных», человекоподобных рассуждений действий [7], направленных на достижение определенной цели в соответствующей предметной области. Всякая задача, для которой неизвестен алгоритм решения, относится к области применения систем искусственного интеллекта. При решении этих задач человек действует, не имея точного метода решения проблемы. Данный тип задач обладает двумя характерными особенностями [8]:

- использование информации в символьной форме (слова, знаки, рисунки), что отличает системы искусственного интеллекта от традиционных компьютерных систем, обрабатывающих только числовые данные;
- наличие возможности выбора – отсутствие алгоритма решения означает только то, что необходимо делать выбор между многими вариантами в условиях неопределенности.

По кругу решаемых задач системы искусственного интеллекта можно подразделить на следующие группы:

- системы распознавания образов;
- математические системы и системы автоматического доказательства теорем;
- игровые системы;
- системы решения технических задач, связанных с целенаправленным движением в пространстве и времени;
- системы понимания естественного языка;

Данная классификация была введена на заре становления систем искусственного интеллекта и быстро себя исчерпала, поскольку дальнейшее развитие интеллектуальных систем привело к своеобразному «сращиванию» отдельных задач в одно целое в рамках решаемой системой глобальной

технической задачи. К примеру, мобильные робототехнические системы должны решать и задачи распознавания образов, и технические задачи по позиционированию, обходу препятствий и т.д. Экспертные системы должны обладать возможностью понимания естественного языка, обладать способностями математических систем, реализовывать прогностические возможности игровых систем. Таким образом, с развитием интеллектуальных систем росла их сложность и многофункциональность, да это и понятно – в идеале интеллектуальная система должна воспроизводить мыслительную деятельность человека [10], а человек, как известно, самое многофункциональное интеллектуальное устройство.

Интеллектуальная САУ структурно подразделяется на три обобщенных уровня, упорядоченных в соответствии с фундаментальным принципом IPDI (Increasing Precision with Decreasing Intelligence) теории интеллектуальных машин: по мере продвижения к высшим уровням иерархической структуры повышается интеллектуальность системы, но снижается ее точность, и наоборот [2]. Под «интеллектуальностью» системы подразумевается ее способность работать с базой событий с целью выявления неких специальных знаний, позволяющих уточнить предложенную задачу и наметить пути ее решения. Под «неточностью» подразумевается неопределенность в выполнении операции по решению задачи.

Каждому из уровней (которые сами могут быть многоуровневыми) соответствует специальная подсистема, реализующая функции, отвечающие определенным ниже пяти принципам организации интеллектуальных управляющих систем [13]:

1. Наличие взаимодействия управляющих систем с реальным внешним миром с использованием информационных каналов связи. Первый принцип подчеркивает непосредственную связь интеллектуальных управляющих систем с внешним миром. Находясь в непрерывном взаимодействии с внешним миром, интеллектуальные системы получают из него всю необходимую информацию в виде извлеченных знаний. Модель знаний о

внешнем мире, используемая интеллектуальной системой, должна предполагать не только уточнение описания внешней среды, но и изменение состояния внешней среды вследствие реализации активного поведения интеллектуальной системы. Таким образом интеллектуальная система может воздействовать на внешнюю среду не только в рамках инициализируемого системой процесса получения знаний, но и исключительно с целью изменения внешнего мира в соответствии с целью функционирования системы. Выполнение принципа взаимодействия системы с внешним миром позволяет организовать каналы связи для извлечения необходимых знаний с целью организации целесообразного поведения.

2. Принципиальная открытость систем с целью повышения интеллектуальности и совершенствования собственного поведения. Открытость систем обеспечивается наличием таких уровней высшего ранга в иерархической структуре, как самонастройка, самоорганизация и самообучение. Система знаний интеллектуальной управляющей системы состоит из двух частей: постоянных (проверенных) знаний, которыми система обладает и постоянно пользуется, и временных (проверяемых) знаний, в которых система не уверена, с которыми она экспериментирует в процессе обучения. Выполнение второго принципа позволяет организовать в интеллектуальной системе процесс приобретения, пополнения и верификации знаний.

3. Наличие механизмов прогноза изменения внешнего мира и собственного поведения системы в динамически меняющемся внешнем мире. Наглядным примером могут служить автономно функционирующие интеллектуальные робототехнические системы в экстремальных ситуациях.

4. Наличие у управляющей системы многоуровневой иерархической структуры, построенной в соответствии с правилом IPDI. Данный принцип позволяет планировать пути построения моделей сложных управляющих систем в тех случаях, когда неточность знаний о модели объекта управления или его поведении можно компенсировать за счет повышения

интеллектуальности создаваемых систем или соответствующих алгоритмов управления.

5. Постоянство функционирования при разрыве связей или потере управляющих воздействий от высших уровней иерархии управляющей структуры.

Данный принцип устанавливает только потерю интеллектуальности, но не прекращения функционирования системы в целом при отказах в работе высших уровней иерархии системы. Сохранение автономного функционирования в рамках более простого (автоматного) поведения системы, характерного для низших уровней структуры управления обеспечивает максимальную живучесть систем управления [23].

Приведенные пять принципов организации структуры интеллектуальной управляющей системы позволяют уточнить такое понятие, как «интеллектуальность» управляющей системы, а также производить классификацию интеллектуальных систем по уровню их интеллектуальности. Очевидно, что степень интеллектуальности системы будет находиться в прямой зависимости от функциональной насыщенности уровней, т.е. от полноты реализации базовых принципов организации интеллектуальных управляющих систем в виде соответствующих функций.

Система интеллектуальная вбольшом – это система построенная и функционирующая в соответствии с описанными выше всеми пятью базовыми принципами IPDI.

Системы интеллектуальные в большом [4] должны иметь многоуровневую иерархическую структуру со следующими уровнями (в порядке понижения ранга): уровень обучения, уровень самоорганизации, уровень прогноза событий, уровень работы с базами знаний, уровень формирования решений, уровень планирования операций, уровень адаптации, исполнительный уровень. Каждый из этих уровней имеет свою функциональную специфику и может состоять из нескольких подуровней. При этом на двух нижних уровнях иерархии используются традиционные

модели и методы теории автоматического управления. Остальные уровни более высокого ранга, или так называемая интеллектуальная надстройка, существенно расширяют возможности этих традиционных моделей. Минимальная интеллектуальная надстройка может содержать только элементарную базу знаний в виде простых продукционных правил (кстати именно такую структуру имели первые интеллектуальные регуляторы), однако уже одно это дополнение будет вводить систему автоматического регулирования в класс интеллектуальных систем, хотя, разумеется, эта интеллектуальная система интеллектуальной в большом не будет. Подобная интеллектуальная САУ будет «интеллектуальной в малом».

Система интеллектуальная в малом – это система структурно и функционально не организованная в соответствии с описанными выше всеми пятью базовыми принципами IPDI, но использующая при своей работе знания как средство преодоления неопределенности входной информации, модели управляемого объекта или его поведения.

Системы интеллектуальные в малом [4, 7] и в большом устанавливают нижнюю и верхнюю границы интеллектуальности управляющих систем. Степень интеллектуальности систем, находящихся внутри этого диапазона, можно определить по наличию или отсутствию тех или иных уровней IPDI. Например, наивысшей степенью интеллектуальности обладает управляющая система, способная к обучению, изменению структуры и прогнозу возможных ситуаций. Меньшей степенью интеллектуальности обладает система, не способная к обучению, но способная к самоорганизации.

Система, стоящая на более высокой ступени иерархии, включает функции систем с более низким интеллектуальным уровнем, а каким образом реализованы эти функции – это не принципиально важно [8].

Введенная трактовка понятия интеллектуальности и признаков систем интеллектуальных в большом и в малом позволяет установить связи с основными понятиями классической теории управления, используя

разработанные в ней методы и сохраняя преемственность при построении интеллектуальных управляющих систем.

Первыми интеллектуальными САУ, объединившими в себе методы традиционной ТАУ и инженерии знаний стали так называемые активные экспертные системы, или как их называли позже – интеллектуальные контроллеры [7]. Экспертная система – это система, ориентированная на хранение, обработку и использование знаний, целью которой является принятие решений по тем или иным вопросам конкретной предметной области, приближенным по качеству к решениям, принятым человеком-экспертом или коллективом экспертов. Первоначально экспертные системы использовались в качестве советчика в паре с оператором, управляющим технологическим объектом. Экспертная система могла предложить возможную стратегию управления объектом в определенной ситуации либо спрогнозировать поведение объекта в ответ на предполагаемое воздействие. Традиционно экспертная система включала в себя базу знаний конкретной предметной области. По мере совершенствования экспертных систем, как на методологическом уровне, так и на уровне технической реализации, решения экспертных систем перестали уступать решениям экспертов-людей, а скорость принятия этих решений существенно превзошло скорость реакции человека [14].

Полученная таким образом интеллектуальная система управления представляет собой качественно новую систему управления сложными объектами, поскольку базируется не только на данных, но и на знаниях [9]. Так как знания и опыт человека имеют вербальный характер, то для преобразования и представления этих знаний, а также информационного обмена с базой знаний вводятся блоки, осуществляющие ввод знаний, вывод знаний, описание и представление знаний, а также их коррекцию. Структура базы знаний, а также структура и алгоритмы работы этих блоков зависят от выбранной модели представления знаний: продукционной, фреймовой, семантической, логики предикатов. Построенная по данному принципу база

знаний содержит множество лингвистических переменных, соответствующих лексическим категориям, с которыми оперирует мозг человека при управлении объектом, а также таблицу нечетких отношений между лингвистическими переменными, которая отражает приобретенный человеком опыт по управлению объектом в виде отношений между лексическими категориями. Средства ввода и вывода знаний осуществляют так называемые процессы фаззификации и дефаззификации[1]– прямого и обратного преобразований количественных (числовых) и качественных (лингвистических) показателей свойств объекта и показателей качества его функционирования. Такие системы в настоящее время наиболее широко применяются для управления сложными объектами и функционируют в роли советчика ЛПР или в автономном режиме.

Поскольку множество ситуаций при управлении объектом постоянно в той или иной степени пополняется из-за нестабильности и непредсказуемости свойств объекта и его внешнего окружения, то интеллектуальной САУ должна быть предусмотрена возможность расширения базы знаний. Основным сигналом о возникшей существенной неполноте знаний в системе служит либо участившееся неприятие советов системы со стороны ЛПР (неадекватность управления объектом, предлагаемого системой, с точки зрения ЛПР), либо отсутствие рекомендаций по управлению, либо неудовлетворительное функционирование САУ в автономном режиме. При этом лингвистические правила управления объектом, содержащиеся в таблице нечетких отношений, по необходимости могут подвергаться коррекции как со стороны ЛПР, так и со стороны группы экспертов. Однако, при таком подходе к обновлению базы знаний неизбежны определенные недостатки, связанные с методологией «интеллектуализации» САУ, т.е. с процессом передачи машине способностей человека по управлению сложными процессами [12].

База знаний, являющаяся основой такой интеллектуальной САУ, является максимально близкой копией знаний коллектива экспертов, но

копией актуальной только на момент получения знаний и заполнения базы данных. Периодическая верификация базы знаний экспертами – это процесс долгий и непродуктивный, поскольку знания экспертов всегда носят субъективный характер и могут меняться со временем, что также приводит к конфликту с уже установленными знаниями. Фактически со стороны экспертов понадобится не дополнительное обучение, а полное переобучение интеллектуальной системы.

Этап развития интеллектуальных САУ, их дальнейшая «интеллектуализация» путем введения в них функций самообучения имеет множество направлений решения задачи «обучения системы самообучению»: использование методов эволюционного моделирования и эволюционных алгоритмов, применение нейронных сетей, использование ассоциативных запоминающих устройств и т.п. Именно в этой области развития интеллектуальных САУ при разработке теории и практики построения так называемых открытых систем, т.е. систем, способных с течением времени совершенствовать свое поведение благодаря заложенным в них алгоритмам обучения, формируется сейчас новое научное направление – теория интеллектуальных машин. Однако, вне зависимости от выбранного направления развития адаптивных способностей интеллектуальных САУ большинство открытых интеллектуальных САУ при обработке знаний опираются на лингвистический подход на базе теории нечетких множеств и лингвистической переменной. Это дает возможность предположить, что открытые системы будущего будут в основном использовать при работе со знаниями методы теории нечетких множеств и нечеткой логики – логики, которая ближе по духу к человеческому мышлению и естественным языкам, чем традиционные логические системы; логики, которая предоставляет наиболее эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реального мира и позволяет построить модель, максимально приближенную к реальности [1].

2 Интеллектуальные системы управления на основе мягких вычислений

2.1 Математическое описание нечетких регуляторов

В последние годы в нашей стране и за рубежом наблюдается повышенный интерес к использованию нечетких интеллектуальных технологий в различных областях, в том числе и в промышленности. Проведенный анализ показывает [9, 11], что в США рост спроса на нечеткие контроллеры в технологических средах увеличился в 1998 г. на 5 млрд. долл. по сравнению с предыдущим годом и составляет 8 млрд. долл. в год. Проекты, связанные с разработкой нечетких технологий, активно финансируются во всем мире. Создаются научные институты и центры, в том числе и международные, работающие по данной тематике. В несколько раз возросло число научных конференций и публикаций по этой проблематике, в том числе и по возможности использования нечетких технологий для управления электромеханическими объектами [13]. На данный момент нечеткие системы являются частью новой комплексной дисциплины, называемой с 1994г. «вычислительный интеллект».

Появление данного научного направления является закономерным развитием систем управления. Возникновение необходимости управления сложными объектами, для которых не совсем подходит традиционная схема управления, поиски на базе известных методов адекватных алгоритмов управления, оценка качественных параметров процесса управления, высокая зависимость процесса управления от лица принимающего решения – все это предопределило развитие систем управления в сторону нечетких систем [5].

Нечеткая логика, в настоящее время делится на несколько типов, среди которых существует специализированная нечеткая логика, представляющая собой непосредственное обобщение двухзначной булевой логики на интервальное множество значений.

Пусть x_1, x_2, \dots, x_n - переменные, $x_i \in [0,1]$. Основные операции определяются следующим образом:

$$\neg x = 1 - x, \quad (2.1)$$

$$x_1 \cup x_2 = \max(x_1, x_2), \quad (2.2)$$

$$x_1 \cap x_2 = \min(x_1, x_2), \quad (2.3)$$

Истинность нечетких переменных $T(x)$ задается их значениями, т.е. $T(x) = x$, тогда истинность $T(f)$ нечеткой формулы f вычисляется, например, с помощью (2.1 – 2.3).

Данный тип нечеткой логики лежит в основе алгоритма функционирования нечетких систем автоматического управления и регулирования.

Нечеткое управление есть логическое управление, при котором управляющее воздействие является результатом логического вывода. В специализированной нечеткой логике используется минмаксный алгоритм, реализующий логический вывод в виде расширенного Modus Ponens по следующей схеме:

Посылка 1: Если X есть A , То Y есть B

Посылка 2: Если X есть A'

Следствие: Y есть B' ,

где $B' = A' \bullet (A \rightarrow B)$.

В мировой практике существует некоторый теоретический и прикладной опыт по синтезу нечетких регуляторов и настройки нечетких систем управления сложными объектами. Среди исследователей, занимавшихся этой проблемой, можно отметить И.Х. Мамдани, чью работу традиционно считают первой работой, посвященной практическому применению нечеткого регулятора (в работе приведен сравнительный анализ

результатов регулирования стандартными средствами непосредственного цифрового управления и нечетким регулятором, который показал преимущество последнего); В.И.Захаров и С.В.Ульянов, рассматривавшие принципы построения нечеткого регулятора и их методологию проектирования (в данных работах предлагаются наиболее законченные концепции по анализу и синтезу нечеткого регулятора для сложных промышленных объектов); К.Асаи, Д. Ватада, С.Иваи и др., рассмотревшие прикладные вопросы использования НР в различных областях жизнедеятельности человека, в том числе и в промышленности; А.Н.Блохнин, предложивший использовать преобразование функции принадлежности для проведения нечеткого логического вывода (данный исследователь использует операторные методы преобразования функции принадлежности, которые наиболее полно согласуются с интуицией человека) и т. д [8].

В целом, необходимо отметить ряд общих особенностей, проявившихся при проектировании и исследовании нечетких регуляторов различными авторами. Проектировщики нечеткого регулятора не опираются на точную модель технологического процесса. При этом интуиция разработчика, его знания о процессе непосредственно преобразовывались в алгоритм управления. Далее следовал итерационный процесс, заключающийся в проверке функционирования алгоритма, изучении его поведения и последующей модификации соответствующих управляющих правил. В случаи если не используется СОНР, эта процедура требует значительных затрат времени. Во всех нечетких регуляторах использовался основополагающий принцип регулирования - принцип регулирования по отклонению.

Для разработки нечеткого регулятора используется широкий спектр программных и аппаратных средств. На сегодняшний день существует ряд прикладных пакетов для синтеза нечетких регуляторов, таких как «FuzzyLogicToolboxforMATLAB» фирмы «TheMathWorksInc.», «Fuzzy-

ControlforCONCEPT» фирмы «SchneiderAutomationInc.», «CubiCalc» фирмы «HyperLogicCorporation», «FuzzyInferenceDevelopmentEnvironment (FIDE)» фирмы «ArtronixInc.» и др [20].

В связи с проведенным обзором работ по нечеткому регулятору необходимо отметить следующее:

- применение нечеткого регулятора позволяет использовать для управления рассматриваемыми объектами информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования;

- применение нечеткого регулятора эффективно для управления сложными объектами с неполным математическим описанием;

- нечеткие регуляторы оказываются малочувствительными к возмущениям в определенном

- диапазоне демонстрируют лучшие характеристики по сравнению с классическими регуляторами;

- для составления управляющих правил нечеткого регулятора требуются интуиция разработчика и/или хорошее знание объекта управления, т.е. в литературе практически отсутствует какая-либо методика для непосредственного синтеза нечеткого регулятора;

- изменение параметров объекта управления влечет за собой модификацию управляющих правил нечеткого регулятора.

Общая схема нечеткого регулятора. Нечеткий логический регулятор состоит из настройки трех взаимосвязанных блоков (фаззификация, база знаний (БЗ), дефаззификация), при этом формирование второго блока базируется на методах представления и поиска знаний. Основная роль в этом процессе отдается оператору-эксперту, в качестве которого выступает квалифицированный специалист или знающий данную предметную область инженер; т.е. и в данном случае процесс составления базы знаний носит субъективный характер [12].

Под нечетким управлением понимается стратегия управления, основанная на эмпирически приобретенных знаниях относительно функционирования объекта (процесса), представленных в лингвистической форме в виде некоторой совокупности правил. Реализация алгоритмов нечеткого управления принципиально отличается от классических ("жестких") алгоритмов, построенных на основе концепции обратной связи и, по существу, просто воспроизводящих некоторую заданную функциональную зависимость или дифференциальное уравнение. Нечеткий регулятор берет на себя те функции, которые обычно выполняются опытным и умелым обслуживающим персоналом. Эти функции связаны с качественной оценкой поведения системы, анализом текущей меняющейся ситуации и выбором наиболее подходящего для данной ситуации способа управления объектом. Данная концепция управления получила название опережающего (или упреждающего) управления [8].

Блок-схема нечеткого регулятора в общем случае принимает вид, изображенный на рисунке 2.1

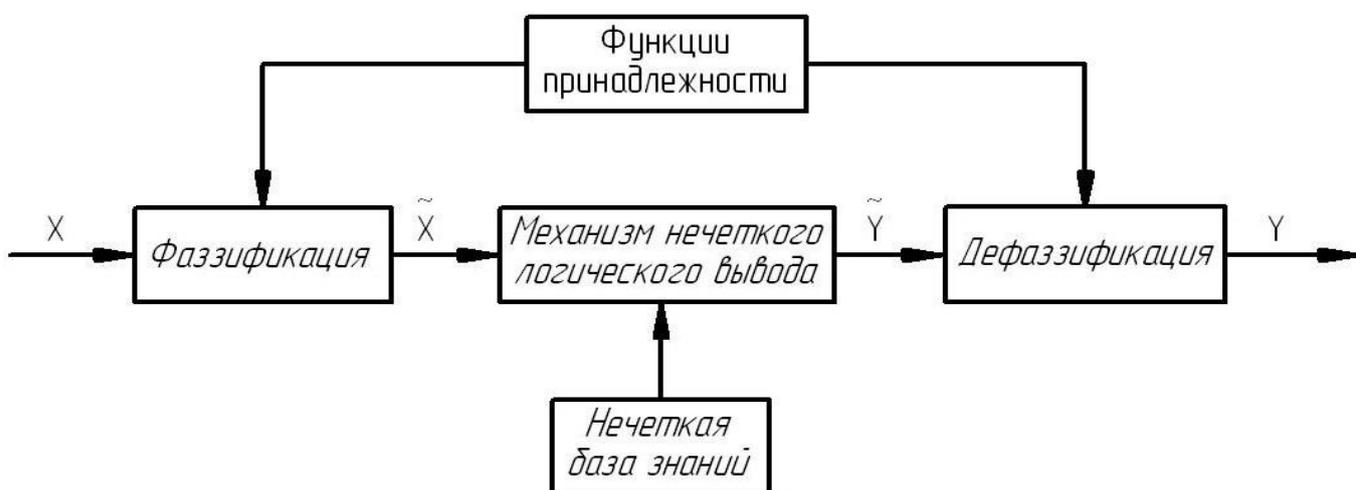


Рисунок 2.1 – Блок-схема нечеткого регулятора

Как видно из данной схемы, формирование управляющих воздействий Y включает в себя следующие этапы [4]:

1 Получение отклонений управляемых координат и скоростей их изменения – X ;

2 "Фаззификация" этих данных, т.е. преобразование полученных значений к нечеткому виду, в форме лингвистических переменных \tilde{X} ;

3 Определение нечетких (качественных) значений выходных переменных \tilde{Y} на основе заранее сформулированных правил логического вывода, записанных в базе знаний;

4 "Дефаззификация", т.е. вычисление реальных числовых значений выходов Y , используемых для управления объектом.

2.1.1 Фаззификация

Любой элемент нечеткого множества может полностью принадлежать некоторому нечеткому множеству или принадлежать ему только в определенной степени. Поэтому может быть введена очень важная для нечетких множеств количественная мера – степень принадлежности. При этом используются, как правило, только нормализованные множества.

В нормализованном множестве степени принадлежности всех элементов множества находятся (лежат) в диапазоне между 0 и 1:

$$\mu_A(x) \in [0, 1], \text{ т.е. } \max \mu_A(x) = 1, x \in X, \quad (2.4)$$

где X – основное множество.

Любой элемент в определенном рассматриваемом множестве всегда характеризуется его степенью принадлежности. Запись вида $\mu_A(x) = 0,6$ означает, что степень принадлежности x к множеству A составляет 0,6.

Нечеткое множество строго определяется с помощью функции принадлежности.

Форма изображения нечеткого множества может быть различной.

Пусть A – нечеткое множество и x_i – его элемент со степенью принадлежности μ_i . Запись для множества A может быть представлена в виде упорядоченных пар:

$$A = \{(x_1, \mu_1), (x_2, \mu_2), \dots\}, \quad \forall x \in G. \quad (2.5)$$

Здесь G – основное множество для элементов x , для упрощения записи элемент x_i , для которого степень принадлежности $\mu_i = 0$, опущен. Знак \forall – так называемый квантор общности. Запись для множества A может быть представлена в более кратком виде:

$$A = \{(x; \mu_A(x)) / x \in G\}. \quad (2.6)$$

Графическое изображение множества A представлено на рисунке 2.2

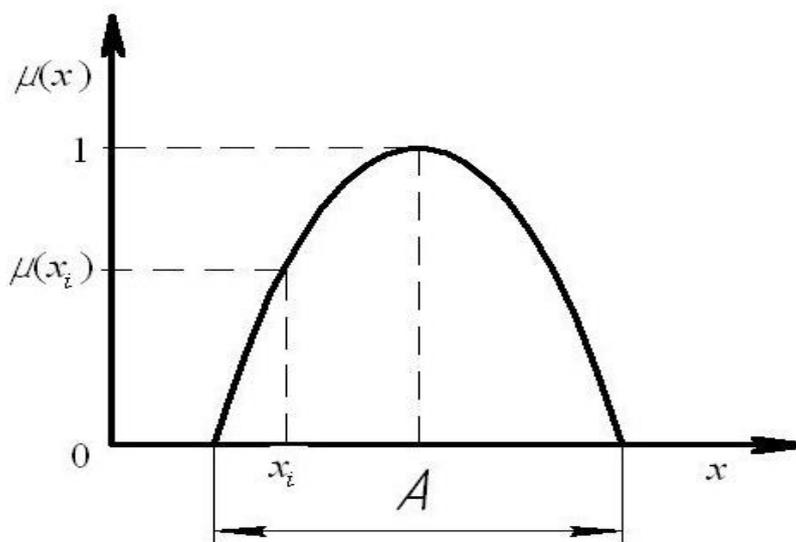


Рисунок 2.2 – Моделирование нечеткой функции принадлежности

Нечеткая переменная характеризуется тройкой $(N, X, R(N, x))$, где N – название переменной; X – универсальное множество с базовой переменной x ; $R(N, x)$ – нечеткое подмножество множества X , представляющее собой нечеткое ограничение на значения переменной x , обусловленное N . В общем случае значениями таких переменных могут быть слова или предложения естественного или формального языка, и тогда соответствующие переменные называют лингвистическими.

Лингвистическая переменная является переменной более высокого порядка, чем нечеткая переменная, в том смысле, что значениями лингвистической переменной являются нечеткие переменные. Лингвистические переменные предназначены в основном для анализа сложных или плохо определенных явлений. Использование словесных описаний типа тех, которыми оперирует человек, делает возможным анализ систем настолько сложных, что они недоступны обычному математическому анализу [11].

Более точно структура лингвистической переменной описывается набором (N, T, X, G, M) , в котором N – название этой переменной; T – термножество N , т.е. совокупность ее лингвистических значений; X – универсальное множество с базовой переменной x ; G – синтаксическое правило, которое может быть задано в форме бесконтекстной грамматики, порождающей термы множества T ; M – семантическое правило, которое каждому лингвистическому значению t ставит в соответствие его смысл $M(t)$, причем $M(t)$ обозначает нечеткое подмножество множества X .

Значениями лингвистической переменной являются нечеткие множества, символами которых являются слова и предложения в естественном или формальном языке, служащие, как правило, некоторой элементарной характеристикой явления.

2.1.2 Нечеткая база знаний

Нечеткой базой знаний называется совокупность нечетких правил, задающих взаимосвязь между входами и выходами исследуемого объекта. Формат нечетких правил имеет вид:

ЕСЛИ<посылка правила >, **ТО**<заключение правила>.

Посылка правила, или *антецедент* представляет собой утверждение типа “ x есть низкий”, где “низкий” – это терм, заданный нечетким множеством на универсальном множестве лингвистической переменной x . Квантификаторы “очень”, “не”, “почти” и другие могут использоваться для модификации термов антецедента.

Заключение правила, или *консеквент* – это факт типа “ y есть d ”, в котором значение выходной переменной может задаваться:

- нечетким термом – “ y есть высокий”;
- классом решений – “ y есть остановка”;
- четкой константой – “ $y = 5$ ”;
- четкой функцией от входных переменных – “ $y = 5 + 4x$ ”.

Если выходная переменная задана нечетким множеством, тогда правило может быть представлено нечетким отношением. Для расчета нечеткого отношения можно применять нечеткую импликацию или t -норму.

Многомерные зависимости «входы – выходы» задают нечеткими правилами с логическими операциями Ии ИЛИ. Например, “Если $x_1 =$ “низкий” И $x_2 =$ “средний” И $x_3 =$ “очень высокий”, то $y =$ “высокий”. Нечеткую базу знаний, связывающую входы $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ с выходом y , можно представить следующим образом:

$$(x_1 = \tilde{a}_{1j} \quad \Theta_j \quad x_2 = \tilde{a}_{2j} \quad \Theta_j \dots \Theta_j \quad x_n = \tilde{a}_{nj}) \rightarrow y = d_j, \quad j = 1, m, \quad (2.7)$$

где \tilde{a}_{ij} – нечеткий терм, которым оценивается переменная x_i в j -м правиле; d_j – заключение j -го правила; m – количество правил в базе знаний; Θ_j – логическая операция, связывающая фрагменты антецедента j -го правила (ей может быть логическая операция И или ИЛИ); \rightarrow – нечеткая импликация.

Если правила содержат только логические операции И, тогда нечеткую базу знаний удобно записывать в виде таблицы [6].

Важным условием эффективного функционирования НЛР является построение непротиворечивой и оптимально полной БЗ. При этом зачастую, адекватность БЗ зависит от величины среза объема выборки экспертных оценок, что является в большинстве случаев взаимоисключающим фактором.

2.1.3 Нечеткие логические выводы

Знание эксперта $A \rightarrow B$ отражает нечеткое причинное отношение предпосылки и заключения, поэтому его можно назвать нечетким отношением и обозначить через R .

Отношение R можно рассматривать как нечеткое подмножество прямого произведения $X \times Y$ полного множества предпосылок X и заключений Y . Таким образом, процесс получения нечеткого результата вывода B' с использованием данного наблюдения A' и знания $A \rightarrow B$ можно представить в виде формулы:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B), \quad (2.8)$$

где « \circ » – операция свертки.

Как операцию композиции, так и операцию импликации в алгебре нечетких множеств можно реализовывать по-разному, но в любом случае общий логический вывод осуществляется за следующие четыре этапа [1]:

1 *Нечеткость* (фаззификация). Функции принадлежности, определенные на входных переменных применяются к их фактическим значениям для определения степени истинности каждой предпосылки каждого правила.

2 *Логический вывод*. Вычисленное значение истинности для предпосылок каждого правила применяется к заключениям каждого правила. Это приводит к одному нечеткому подмножеству, которое будет назначено каждой переменной вывода для каждого правила. В качестве правил логического вывода обычно используются только операции *min* (МИНИМУМ) или *prod* (УМНОЖЕНИЕ). В логическом выводе МИНИМУМА функция принадлежности вывода «отсекается» по высоте, соответствующей вычисленной степени истинности предпосылки правила (нечеткая логика «И»). В логическом выводе УМНОЖЕНИЯ функция принадлежности вывода масштабируется при помощи вычисленной степени истинности предпосылки правила.

3 *Композиция*. Все нечеткие подмножества, назначенные к каждой переменной вывода (во всех правилах), объединяются вместе, чтобы формировать одно нечеткое подмножество для каждой переменной вывода. При подобном объединении обычно используются операции *max* (МАКСИМУМ) или *sum* (СУММА). При композиции МАКСИМУМА комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечный максимум по всем нечетким подмножествам (нечеткая логика «ИЛИ»). При композиции СУММЫ комбинированный вывод нечеткого подмножества конструируется как поточечная сумма по всем нечетким подмножествам, назначенным переменной вывода правилами логического вывода.

4 *Приведение к четкости* (дефаззификация) используется, когда полезно преобразовать нечеткий набор выводов в четкое число. Имеется большое количество методов приведения к четкости, некоторые из которых рассмотрены ниже.

Рассмотрим следующие наиболее часто используемые модификации алгоритма нечеткого вывода, полагая, что базу знаний организуют два нечетких правила вида:

П₁: если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда z есть C_1 ,

П₂: если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда z есть C_2 ,

где x и y – имена входных переменных, z – имя переменной вывода, $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – некоторые заданные функции принадлежности, при этом четкое значение z_0 необходимо определить на основе приведенной информации и четких значений x_0 и y_0 .

Алгоритм Мамдани:

Данный алгоритм математически может быть описан следующим образом.

1) *Нечеткость*: находятся степени истинности для предпосылок каждого правила: $A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0)$.

2) *Логический вывод*: находятся уровни “отсечения” для предпосылок каждого из правил (с использованием операции МИНИМУМ)

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0),\end{aligned}\quad (2.9)$$

где через “ \wedge ” обозначена операция логического минимума (*min*), затем находятся “усеченные” функции принадлежности

$$\begin{aligned}C'_1(z) &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)), \\ C'_2(z) &= (\alpha_2 \wedge C_2(z)).\end{aligned}\quad (2.10)$$

3) *Композиция*: с использованием операции МАКСИМУМ (*max*, далее обозначаемой как “ \vee ”) производится объединение найденных усеченных

функций, что приводит к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности:

$$\mu_z(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z)). \quad (2.11)$$

4) Определяется четкое значение переменной вывода.

Данный алгоритм представлен на рисунке 2.3

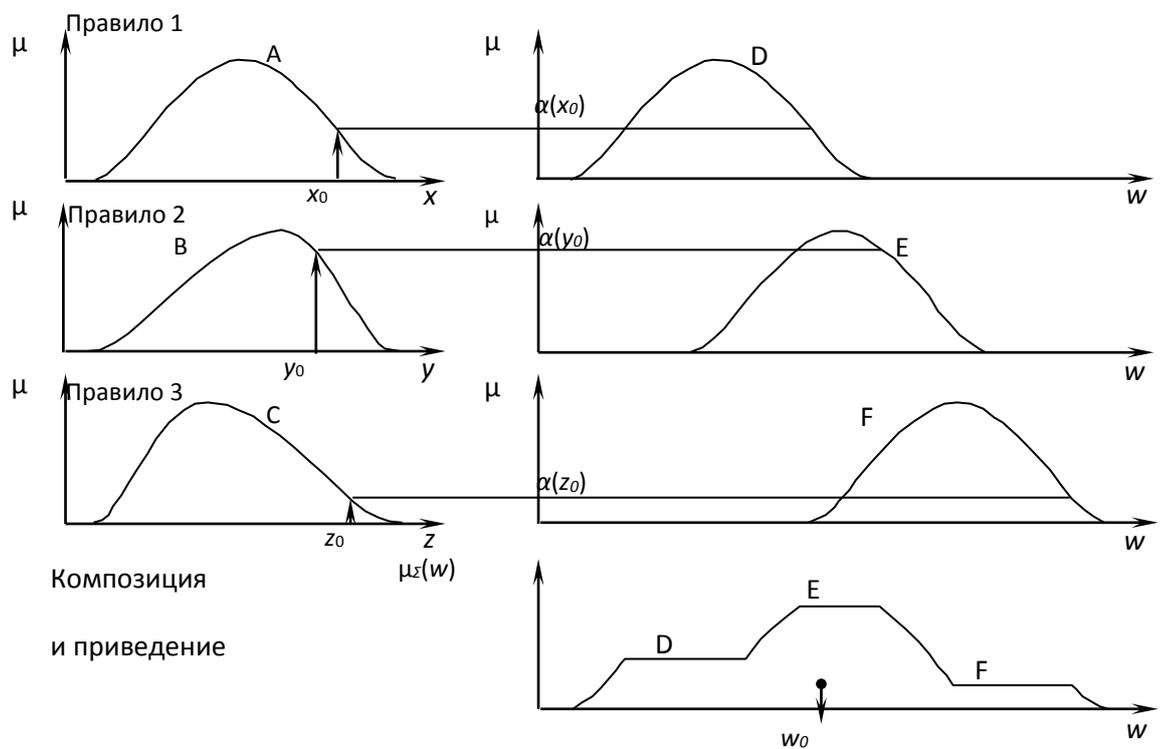


Рисунок 2.3 – Процедура логического вывода алгоритма Мамдани

Алгоритм Сугено:

Используется набор правил в следующей форме:

Π_1 : если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда $z_1 = a_1x + b_1y$,

Π_2 : если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда $z_2 = a_2x + b_2y$.

1) Находятся степени истинности для предпосылок каждого правила:

$$A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0).$$

2) Находятся уровни “отсечения” для предпосылок каждого из правил:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0), \end{aligned} \quad (2.12)$$

и индивидуальные выходы правил:

$$\begin{aligned} z_1^* &= a_1 x_0 + b_1 y_0, \\ z_2^* &= a_2 x_0 + b_2 y_0. \end{aligned} \quad (2.13)$$

3) Определяется четкое значение переменной вывода по формуле:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 z_1^* + \alpha_2 z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (2.14)$$

Данный алгоритм представлен на рисунке 2.4

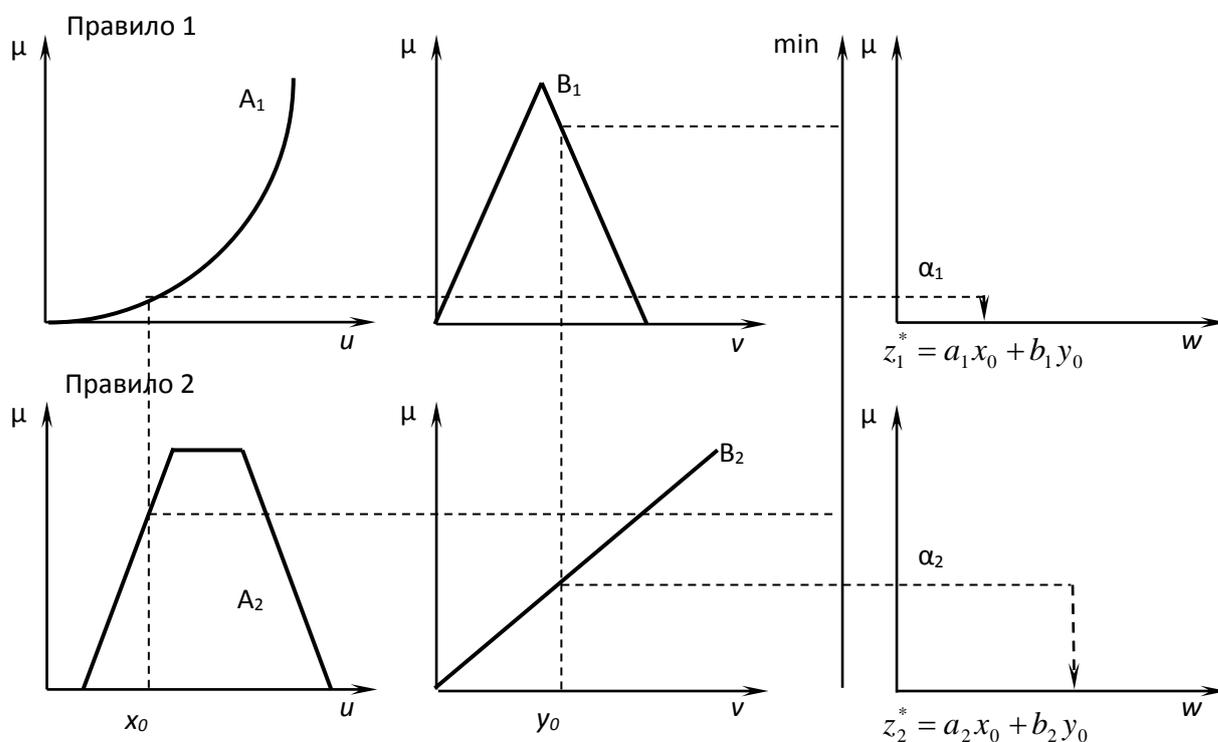


Рисунок 2.4 – Процедура логического вывода алгоритма Сугено

Упрощенный алгоритм нечеткого вывода:

Исходные правила в данном случае задаются в виде:

Π_1 : если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда $z_1 = c_1$,

Π_2 : если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда $z_2 = c_2$,

где c_1 и c_2 – некоторые обычные (четкие) числа.

1) Находятся степени истинности для предпосылок каждого правила: $A_1(x_0)$, $A_2(x_0)$, $B_1(y_0)$, $B_2(y_0)$.

2) Находятся уровни “отсечения” для предпосылок каждого из правил:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0),\end{aligned}\quad (2.15)$$

3) Находится четкое значение выходной переменной по формуле:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 c_1 + \alpha_2 c_2}{\alpha_1 + \alpha_2}. \quad (2.16)$$

Данный алгоритм представлен на рисунке 2.5

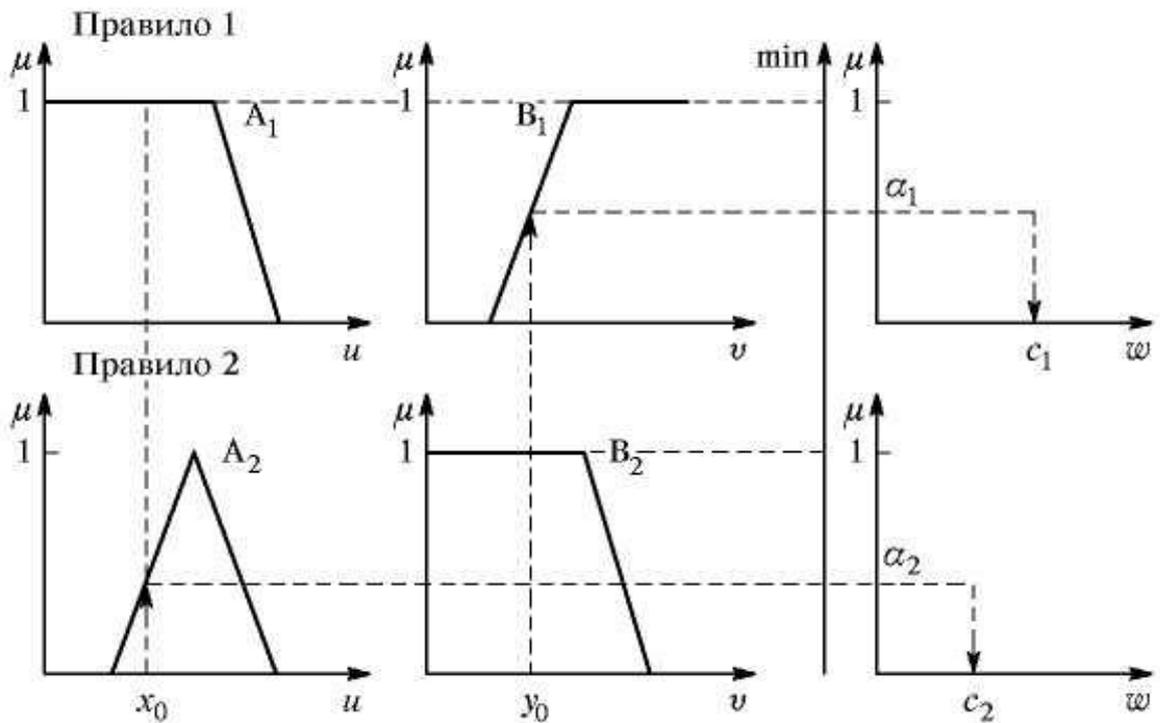


Рисунок 2.5– Процедура логического вывода упрощенного алгоритма

2.1.4 Дефаззификация

Центроидный метод. Для непрерывного варианта:

$$z_0 = \frac{\int_{\Omega} zC(z)dz}{\int_{\Omega} C(z)dz} , \quad (2.17)$$

Первый максимум. Четкая величина переменной вывода находится как наименьшее значение, при котором достигается максимум итогового нечеткого множества, т.е.

$$z_0 = \min \left(z \mid C(z) = \max_u C(u) \right). \quad (2.18)$$

Средний максимум. Четкое значение находится по формуле:

$$z_0 = \frac{\int_G z dz}{\int_G dz}, \quad (2.19)$$

где G – подмножество элементов, максимизирующих C .

Критерий максимума. Четкое значение выбирается произвольно среди множества элементов, доставляющих максимум C , т. е.

$$z_0 \in [z \mid C(z) = \max_u C(u)]. \quad (2.20)$$

Высотная дефаззификация. Элементы области определения Q , для которых значения функции принадлежности меньше, чем некоторый уровень α , в расчет не принимаются, и четкое значение рассчитывается по формуле:

$$z_0 = \frac{\int_{C_\alpha} z C(z) dz}{\int_{C_\alpha} C(z) dz}, \quad (2.21)$$

где C_α – нечеткое множество α -уровня.

3 Нечеткие многокаскадные системы управления

3.1 Описание объекта управления

Применение нечеткой логики в управлении позволяет отказаться от создания достаточно точной математической модели динамической системы и использовать лишь экспертные знания о поведении системы. В связи с этим рассмотрим упрощенную математическую модель (и ее реализация в системе Simulink) системы с отрицательной обратной связью и ПИД – регулятором (рисунок 3.1). В качестве входных измеряемых координат выбраны ошибка и производная ошибки, в качестве выходной координаты - выход ПИД-регулятора. [16]

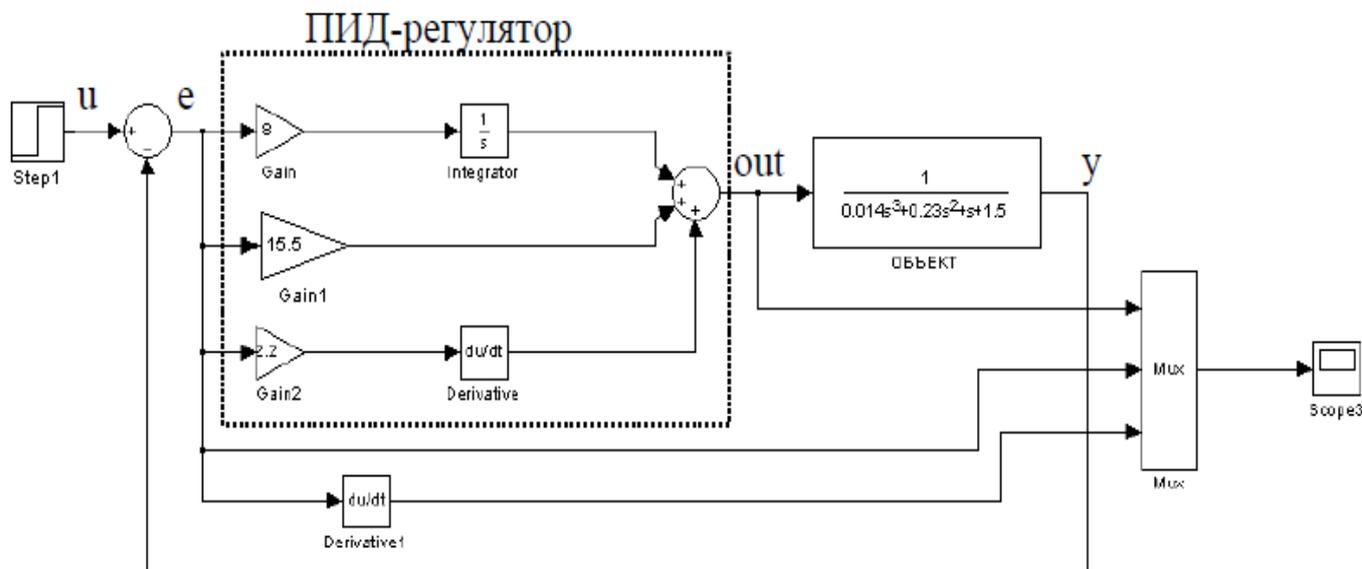
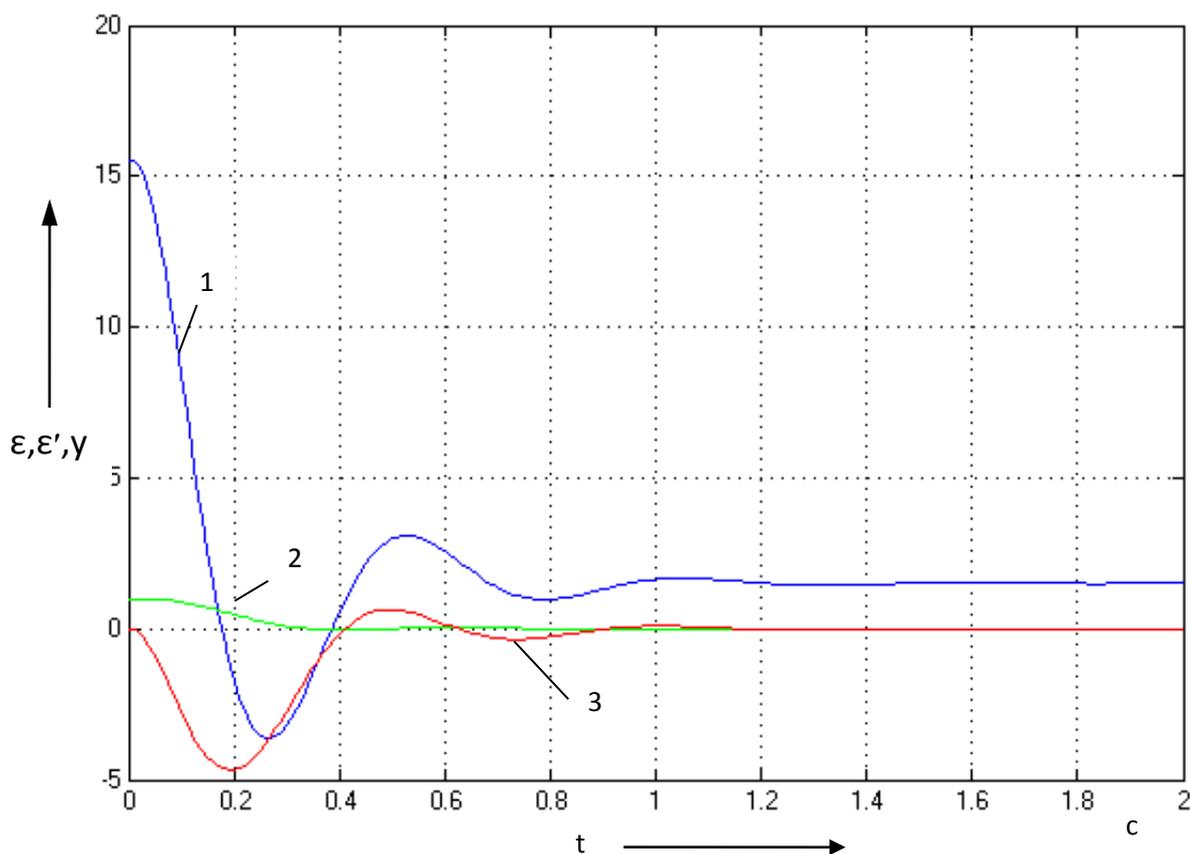


Рисунок 3.1 - Система с отрицательной обратной связью и ПИД - регулятором

Объект управления представляет собой полином третьего порядка. Его передаточная функция $W_o(s)$ имеет вид:

$$W_o(s) = \frac{1}{0.014 \cdot s^3 + 0.23 \cdot s^2 + s + 1.5}, \quad (3.1)$$

Математическая модель системы с ПИД-регулятором исследована с точки зрения переходных процессов по "ошибке", "производной ошибки" и "выходу" при скачке сигнала задания и при неизменных параметрах объекта управления. Переходные процессы исследуемых величин приведены на рисунке 3.2



- 1-выход регулятора;
- 2-ошибка;
- 3-производная ошибки.

Рисунок 3.2 – Графики переходных процессов измеряемых величин ПИД-регулятора:

В качестве средства моделирования рассматриваемой динамической системы используется система Simulink пакета MATLAB. Одной из основных причин использования пакета MATLAB является большой спектр средств, который он предоставляет пользователю для решения разнообразных задач в различных областях научной деятельности.

Основным недостатком приведенной системы стабилизации является сравнительно невысокая динамическая точность при действии недетерминированных возмущений и изменениях параметров объекта управления. Для повышения динамической точности целесообразно использовать в системе регулирования вместо ПИД-регулятора нечеткие логические регуляторы.

В пользу НЛР может выступать и то, что хорошо настроить ПИД-регулятор на практике достаточно сложно. Поиск хороших ПИД настроек – процесс во времени длительный. Хорошо если инженер имеет специальные компьютерные программы, позволяющие ему искать правильные решения эффективно и с минимальными временными затратами, но на практике это не всегда так. Поэтому для ослабления влияния отмеченных факторов попробуем интеллектуализировать систему управления за счёт введения НЛР.

3.2 Синтез интеллектуальной системы управления

Для моделирования контроллеров, основанных на нечеткой логике, в работе используется расширение FuzzyLogicToolbox пакета MATLAB. Этот пакет позволяет создавать системы нечеткого логического вывода и нечеткой классификации в рамках среды MATLAB с возможностью их интегрирования в Simulink. Базовым понятием FuzzyLogicToolbox является FIS-структура — система нечеткого вывода (FuzzyInferenceSystem). FIS-структура содержит все необходимые данные для реализации функционального отображения «входы–выходы» на основе нечеткого логического вывода. Моделирование в системе MATLAB и пакете FuzzyLogicToolbox заключается в задании следующих основных характеристик [16]:

- входных переменных;
- выходных переменных;

- термов входных и выходных переменных;
- функций принадлежности термов;
- базы правил;
- алгоритма нечеткого логического вывода;
- процедуры преобразования нечеткого множества в четкое число (процедуры дефаззификации).

Нечёткая система управления представлена на рисунке 3.3

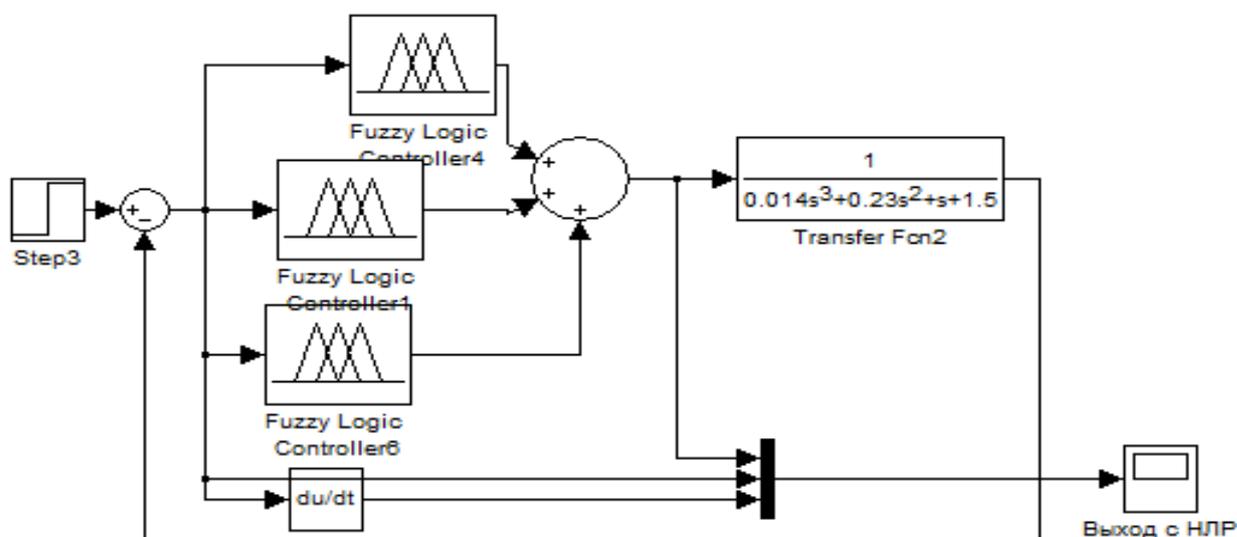


Рисунок 3.3 – Структурная схема нечёткой системы управления

При синтезе нечёткого регулятора будем применять алгоритм нечёткого логического вывода Сугено. Для метода Сугено характерна эффективность в вычислительном отношении, он хорошо работает с линейными методами (ПИД-управление), а также он хорошо подходит для математического анализа. [16]

Как отмечалось в разделе 2.1, нечеткий регулятор состоит из трех основных блоков: блока фаззификации, блока нечеткого логического вывода и блока дефаззификации. В первом блоке необходимо произвести фаззификацию входных сигналов, т.е. перевести четко определенные сигналы в нечеткую форму. Для получения нечетких переменных

необходимо инициализировать нечеткие множества, соответствующие заданным входным сигналам.

Нечеткое множество A универсального множества E определяется как множество упорядоченных пар $A\{\mu_A(x)/x\}$, где $\mu_A(x)$ - функция принадлежности, принимающая значения в упорядоченном множестве M . Функция принадлежности указывает на степень принадлежности элемента x подмножеству A .

Необходимо отметить, что если $M = [0,1]$, а A есть нечеткое множество, описываемое элементами из универсального множества E и множеством принадлежностей M , то нечеткое множество нормально, если его высота равна 1

($\sup \mu_A(x)=1$). При $\mu_A(x) < 1$ нечеткое множество называется субнормальным. Нечеткое множество является пустым, если " $\forall x \in E \mu_A(x)=0$ ". Непустое

субнормальное множество можно нормализовать по формуле

$$\mu_A(x) = \frac{\mu_A(x)}{\sup \mu_A(x)}. \quad (3.2)$$

Нечеткое множество унимодально, если $\mu_A(x) = 1$ только на одном $x \in E$.

Носителем нечеткого множества A является обычное подмножество со свойством $\mu_A(x) > 0$, т.е. носитель $A = \{x/\mu_A(x)>0\}$ " $x \in E$ ". Элементы $x \in E$, для которых $\mu_A(x)=0.5$, называются точками перехода множества A .

Построенный нечёткий регулятор заменяет каждую из составляющих исходного ПИД-регулятора. Он состоит из одного входа и одного выхода[17].

Функциональная схема НЛР представлена на рисунке 3.4

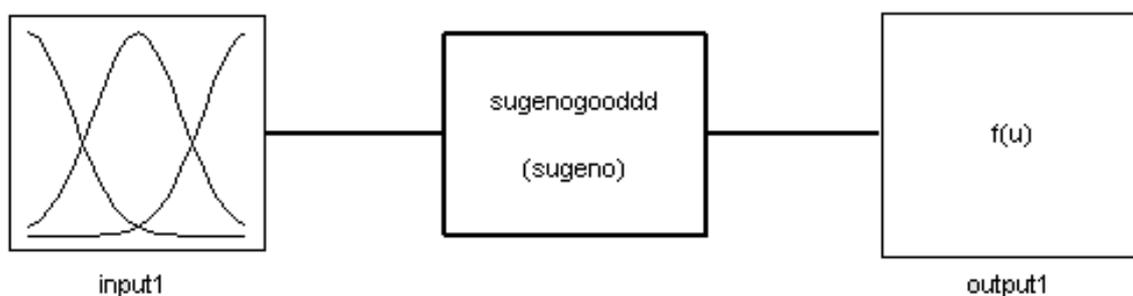


Рисунок 3.4– Функциональная схема НЛР

Настройка НЛР осуществляется в соответствии со структурной схемой приведённой на рисунке 3.4. Средством, позволяющим связать любую физическую величину с каким-либо множеством, качественно характеризующим ее значения, является лингвистическая переменная. Введем лингвистическую переменную «ошибка» (ε). Для всех внутренних термов, входной переменной, назначим треугольные функции принадлежности [17].

Учитывая, что к виду переходной характеристики системы не предъявляются специальные требования, для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечёткого контроллера базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне пяти. Терм множество – T лингвистических переменных – имеет название термов: $T = \{S, PS, PM, PB, PVB\}$, означающее соответственно: «малое», «положительное малое», «положительное среднее», «положительное большое», «положительное очень большое».

Количественные характеристики функций принадлежности определим в зависимости от диапазона изменения параметра, для которого строятся функции принадлежности его термов. Они могут быть получены либо из экспериментальных данных, либо из результатов моделирования, но в любом случае они должны действительно влиять на систему. В работе диапазоны входных переменных получены по результатам моделирования ПИД-регулятора. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-0.05, 1]$. Вид

термов для лингвистической переменной «ошибка» представлен на рисунке 3.5

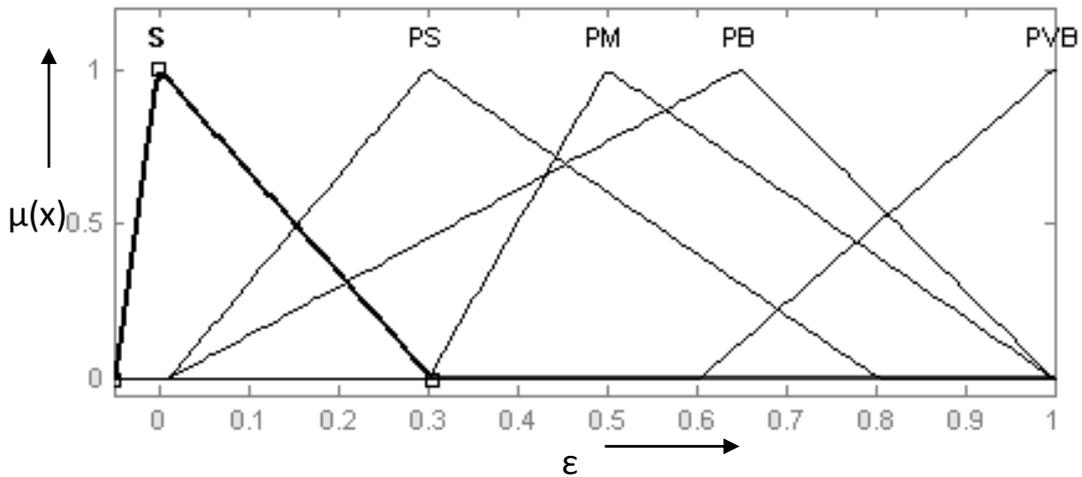


Рисунок 3.5 -Функции принадлежности лингвистической переменной «ошибка»

Терм-множество выходных лингвистических переменных ограничим на уровне трёх. Терм множество – $T1$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T1 = \{NS, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательно малое», «положительное малое», «положительное большое».

Для выхода регулятора диапазон изменения параметров управляющего воздействия принят $[-4, 16]$. Функции принадлежности управляющего воздействия представлены на рисунке 3.6

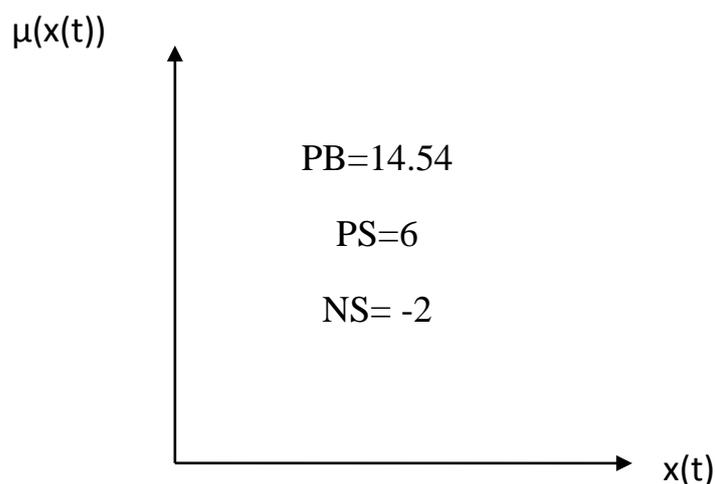


Рисунок 3.6 - Функции принадлежности управляющего воздействия

Содержательным компонентом блока нечеткого вывода является база знаний НЛР. Она строится исходя из цели применения НЛР.

В естественно-языковой форме управление будет иметь следующий вид:

Если сигнал ошибки положительный и возрастает, то управляющий сигнал будет – положительный малый. Если положительный сигнал ошибки будет очень большой, то управляющий сигнал на выходов также будет расти, становясь положительным большим. Если сигнал ошибки будет падать, то выходной сигнал также будет падать[17].

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

- 1) Если «ошибка» есть PB , тогда «управление» есть $PS=6$,
- 2) «Если «ошибка» есть PVB , тогда «управление» есть $PB=14.54$,
- 3) «Если «ошибка» есть PM , тогда «управление» есть $NS=-2$,
- 4) «Если «ошибка» есть PS , тогда «управление» есть $NS=-2$.

Оценим базу знаний нечеткого регулятора на оптимальность через такие показатели, как полнота и непротиворечивость правил управления. Наиболее часто требование полноты для системы продукций сводится к виду:

$$X = \bigcup_{i=1}^n \text{Supp } A_i \quad (3.3)$$

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

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

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

Непротиворечивость системы управляющих правил обычно трактуется как отсутствие правил, имеющих сходные посылки и различные или взаимоисключающие следствия.

Степень непротиворечивости j -го и k -го правил можно задать величиной:

$$C_{jk} = \left| \bigcup_{E_1} (\mu_{A_1^j}(E_1) \wedge \mu_{A_1^k}(E_1)) \right| \quad (3.4)$$

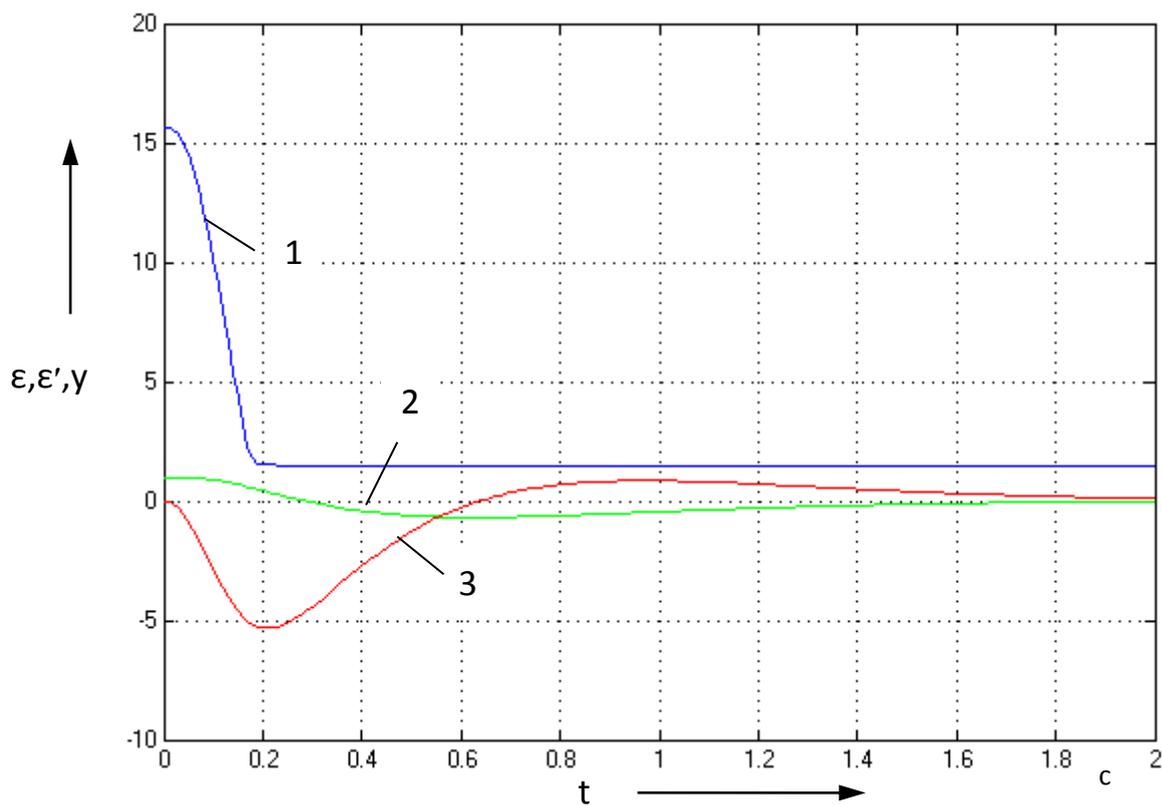
Суммируя по k , получаем оценку непротиворечивости j -го правила в системе:

$$C_j = \sum_{k=1}^n C_{jk}, \quad 1 < j < 5 \quad (3.5)$$

Исходя из этого, можно судить о непротиворечивости системы управляющих правил.

Проверим созданную базу знаний нечеткого регулятора и рассмотрим переходный процесс системы с НЛР.

Графики переходных процессов системы представлены на рисунке 3.7



- 1 выход регулятора;
- 2 ошибка;
- 3 производная ошибки

Рисунок 3.7 – Графики переходных процессов измеряемых величин в системе с НЛР.

Результаты моделирования, приведенные на рисунке 3.7, наглядно показывают правомерность применения НЛР. Полученная система обладает лучшими показателями качества, чем система с ПИД-регулятором. Длительность переходного процесса уменьшилась в 6 раз. Использование методов нечеткого управления позволило получить качественный переходный процесс без использования громоздких вычислительных процедур, характерных для классического метода управления [17].

Структурно многокаскадная нечёткая система регулирования может быть реализована путём добавления дополнительного НЛР в систему приведенную на рисунке 3.3. НЛР ставится последовательно в канал

управления. Интеллектуальные свойства нечёткого регулятора дают возможность формировать корректирующее воздействие на каждый локальный канал управления. Регулятор формирует корректирующие поправки заменяющие коэффициенты $K1$, $K2$ и $K3$ ПИД – регулятора. Выходы НЛР подаются на вход НЛР, который соответственно вырабатывает управляющий сигнал сходный с управляющими сигналами ПИД-регулятора, являющийся суммой трёх слагаемых.

Структурная схема многокаскадной нечёткой системы регулирования представлена на рисунке 3.8

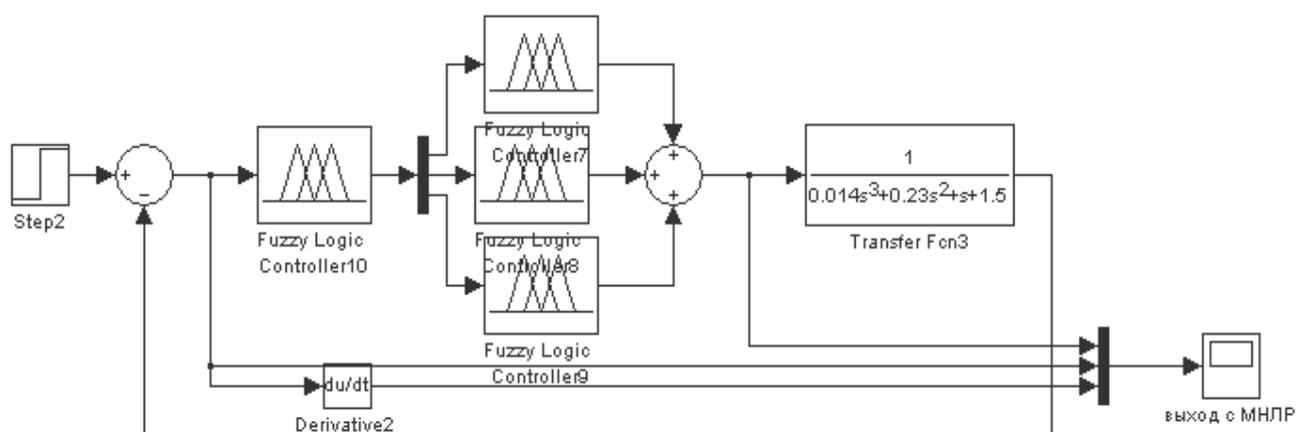


Рисунок 3.8 – Структурная схема многокаскадной нечёткой системы управления

Данная система должна обеспечить формирование переходных характеристик рассматриваемых каналов близких к полученным в системе с ПИД-регулятором и в системе с НЛР (или улучшить эти характеристики).

Функциональная схема многокаскадного нечёткого логического регулятора приведена на рисунке 3.9

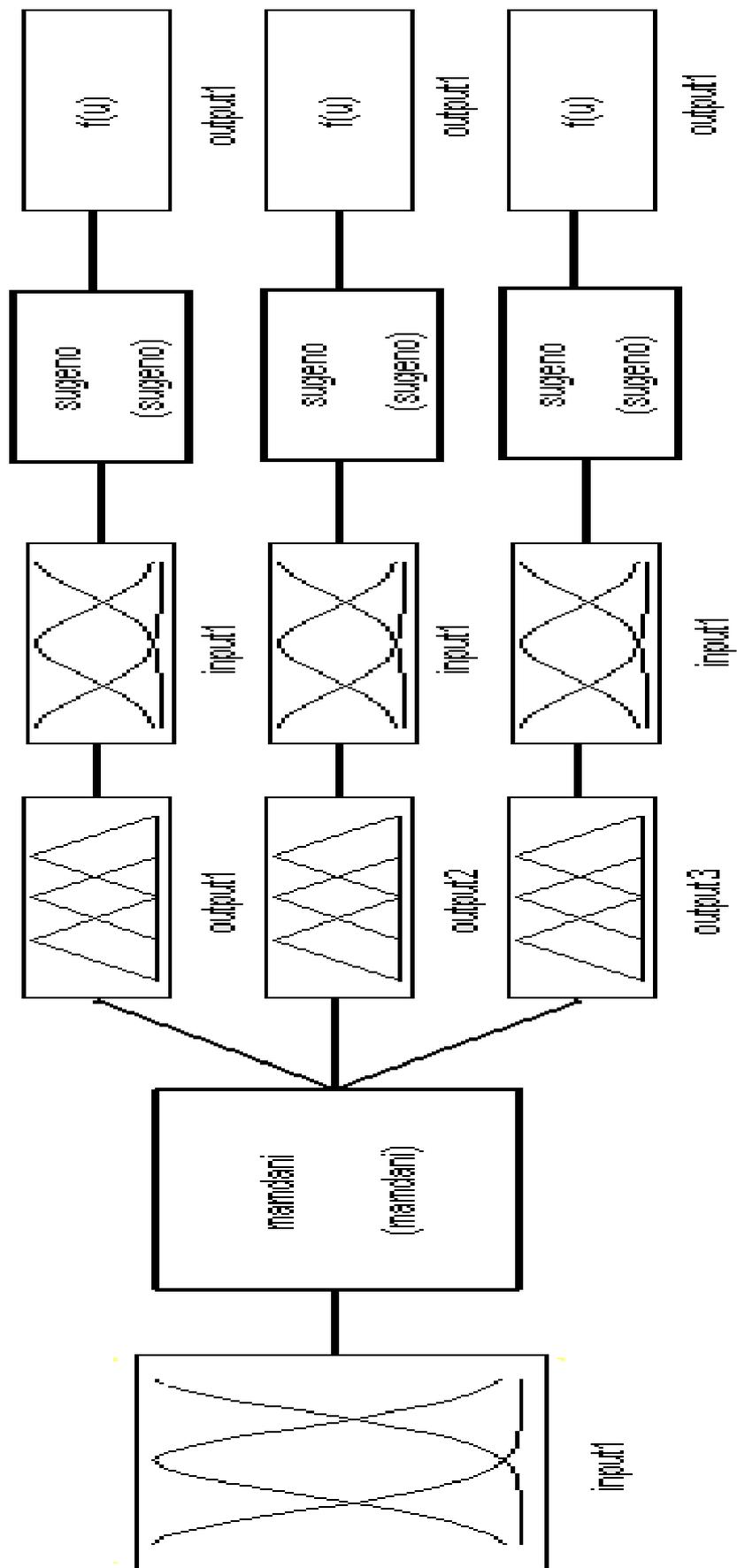


Рисунок 3.9 – Функциональная схема МНЛР

На нечеткое корректирующее звено возлагается задача выработки корректирующего воздействия в диапазоне изменения динамической ошибки системы стабилизации, при синтезе нечеткого регулятора используем алгоритм вывода по Мамдани, как наиболее простой и интуитивный. Несмотря на то, что алгоритм Мамдани рекомендуют применять в других областях, а именно в экспертных системах и системах принятия решений, он может эффективно работать и в нашей нечеткой системе управления, что будет показано ниже [17].

Добавленный в систему управления регулятор состоит из одного входа и трёх выходов, вырабатывающих сигнал коррекции, каждый на собственный канал регулирования. Функциональная схема НЛР представлена на рисунке 3.10

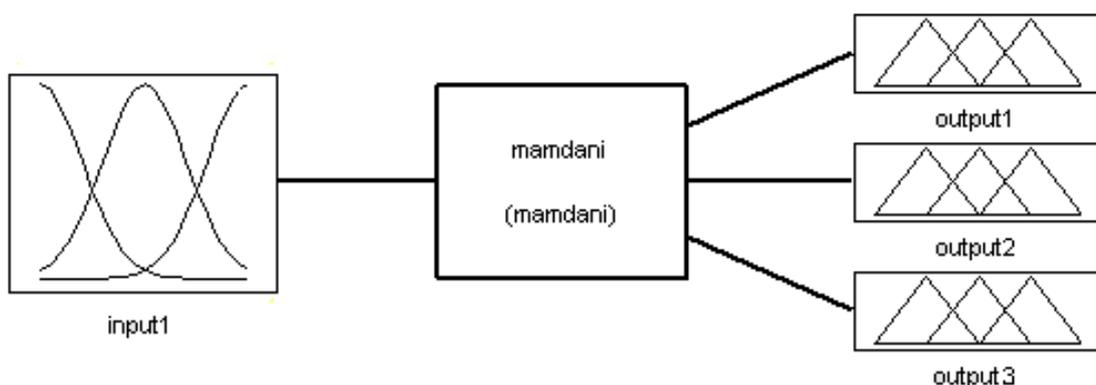


Рисунок 3.10 - Функциональная схема НЛР

Каждый вход и выход описываются определённым набором термов.

Настройка НЛР осуществляется в соответствии со структурной схемой приведённой на рисунке 3.10.

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

Учитывая, что к виду переходной характеристики системы не предъявляются специальные требования, для снижения алгоритмической сложности базы знаний нечёткого контроллера базовое терм-множество входных лингвистических переменных ограничим на уровне четырёх. Некоторый произвол при выборе количества термов обусловлен тем, что при возрастании количества термов возрастает объем базы правил, а существенного выигрыша в точности не наблюдается [17].

Терм множество – T_2 лингвистических переменных – имеет название термов: $T_2 = \{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое».

Количественные характеристики функций принадлежности определим в зависимости от диапазона изменения параметра, для которого строятся функции принадлежности его термов. Диапазоны изменения параметров были получены из результатов моделирования ПИД-регулятора. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-0.7, 1]$. Исходя из того, что данная входная переменная имеет 4 термы, получим следующие функции принадлежности, представленные на рисунке 3.11

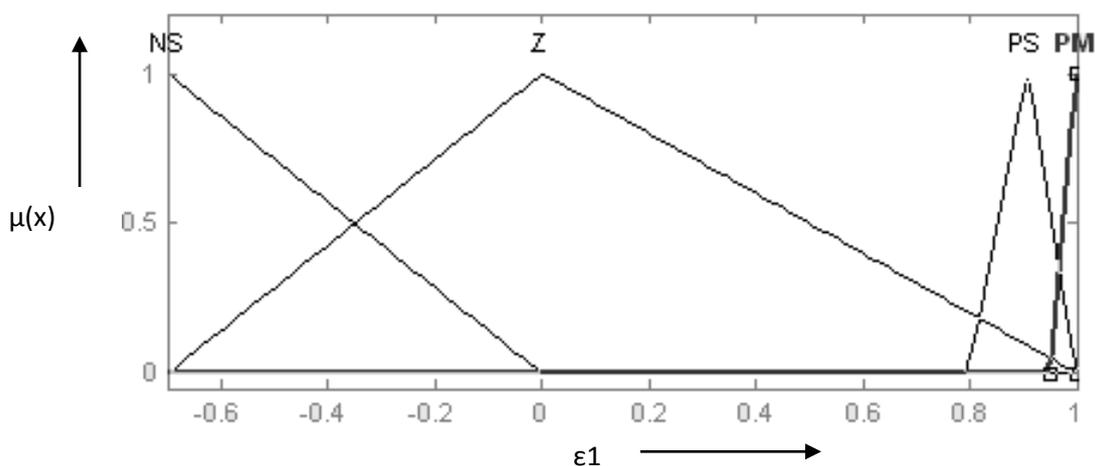


Рисунок 3.11 -Функции принадлежности лингвистической переменной «ошибка1»

Введем выходные лингвистические переменные «коррекция 1» ($y1$), «коррекция 2» ($y2$), «коррекция 3» ($y3$). Для всех внутренних термов, выходных переменных, назначим треугольные функции принадлежности.

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

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

Рассмотрим первый выход НЛР. Терм-множество $T3$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T3 = \{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон управляющего воздействия для этого выхода принят $[-40, 64]$, а функции принадлежности корректирующего сигнала приведены на рисунке 3.12

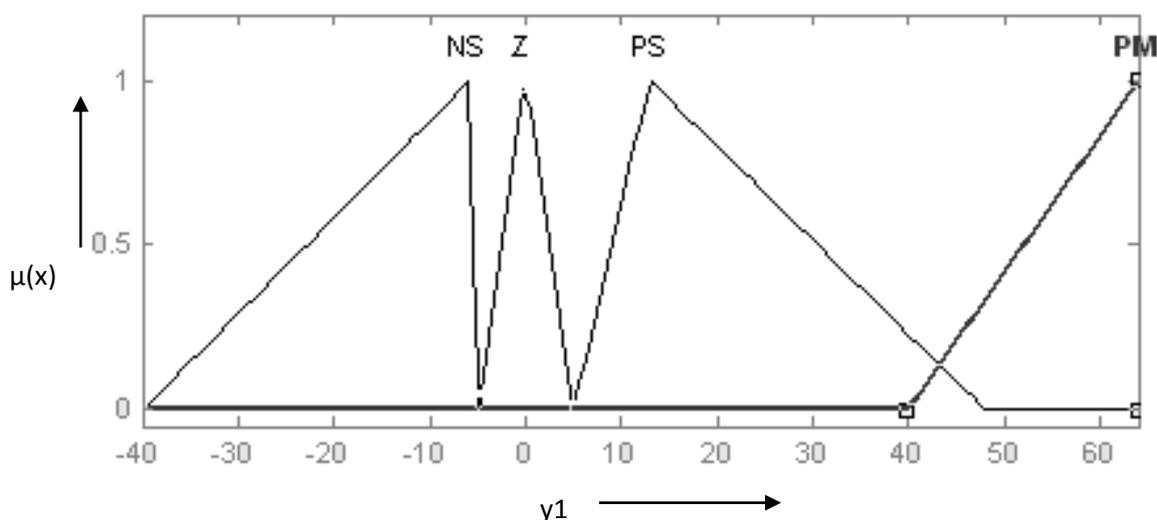


Рисунок 3.12 - Функции принадлежности корректирующего воздействия первого выхода

Второй выход НЛР. Терм-множество $T4$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T4=\{NS, Z, PS, PB\}$, означающие соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон управляющего воздействия $[-0.7, 1]$. Функции принадлежности приведены на рисунке 3.13

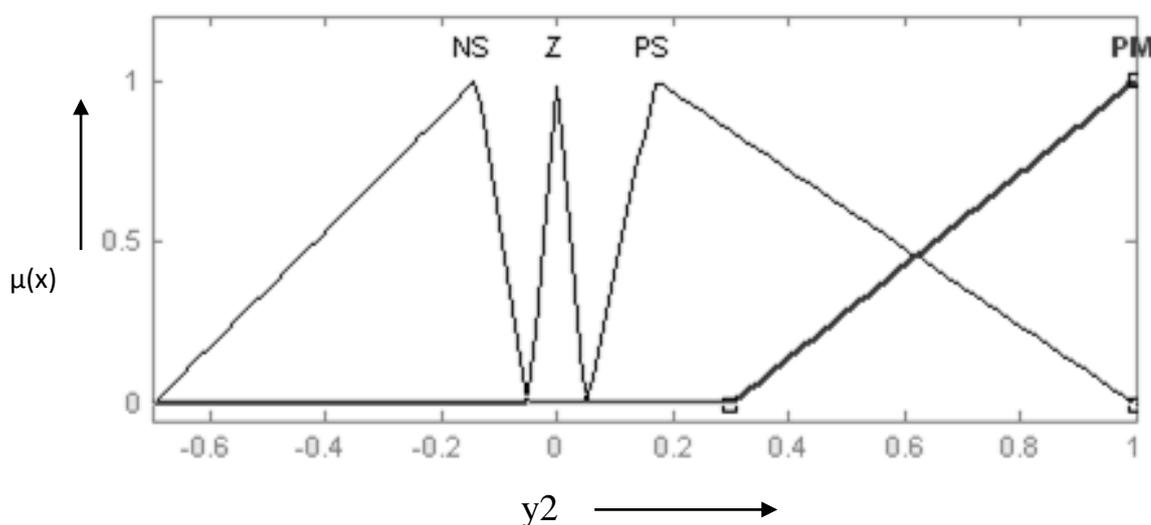


Рисунок 3.13 - Функции принадлежности корректирующего воздействия второго выхода

Третий выход НЛР. Терм-множество $T5$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T5=\{PS, PM, PB, PVB\}$ означающие соответственно: «положительное малое», «положительно среднее», «положительное большое», «положительное очень большое». Диапазон управляющего воздействия $[0.1, 1]$. Функции принадлежности приведены на рисунке 3.14

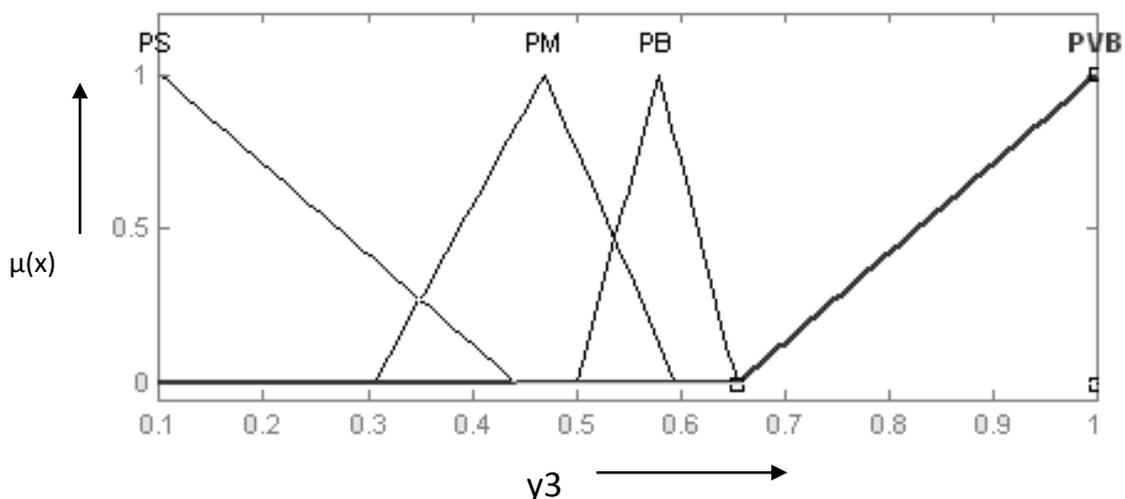


Рисунок 3.14 - Функции принадлежности корректирующего воздействия третьего выхода

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

Таким образом, будет обеспечиваться повышение быстродействия регулирующего воздействия и плавность изменения регулируемой величины [17].

В естественно-языковой форме управление будет иметь следующий вид:

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

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

- 1) Если «ошибка 1» есть *PB*, тогда «коррекция 1» есть *PB*, «коррекция 2» есть *PB* и «коррекция 3» есть *PVB*;
- 2) Если «ошибка 1» есть *PS*, тогда «коррекция 1» есть *PS*, «коррекция 2» есть *PS* и «коррекция 3» есть *PB*;
- 3) Если «ошибка 1» есть *Z*, тогда «коррекция 1» есть *NS*, «коррекция 2» есть *NS* и «коррекция 3» есть *PS*;
- 4) Если «ошибка 1» есть *NS*, тогда «коррекция 1» есть *Z*, «коррекция 2» есть *Z* и «коррекция 3» есть *PM*.

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

$$X = \bigcup_{i=1}^n \text{Supp } A_i \quad (3.5)$$

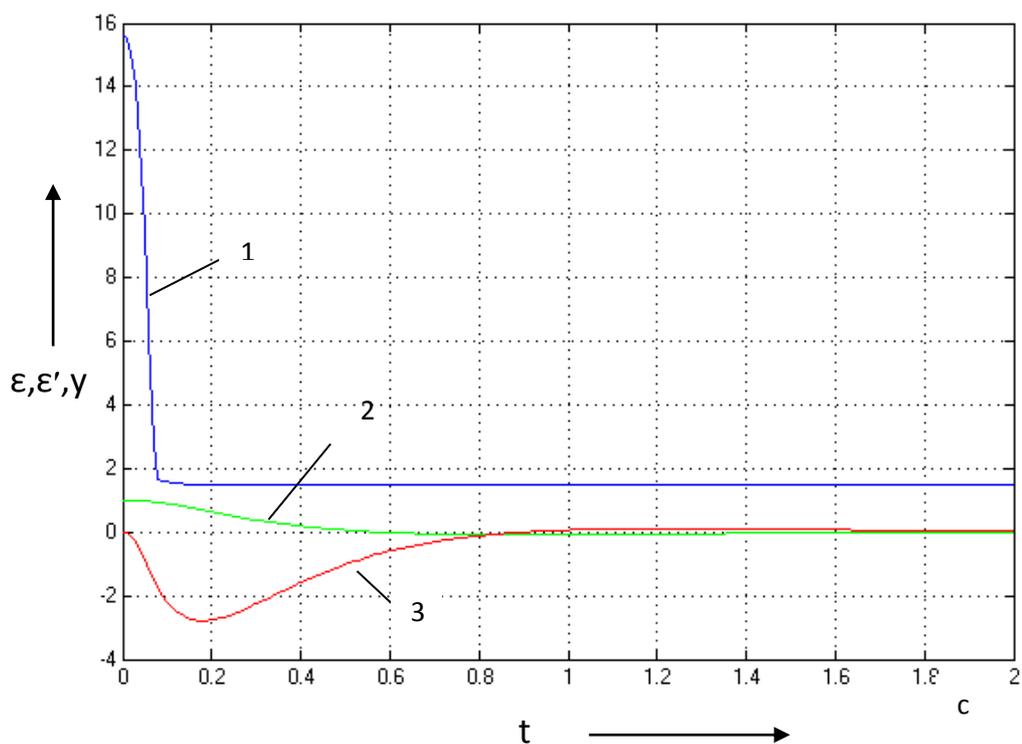
где $\text{Supp } A_i$ - носитель нечеткого множества A_i .

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

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

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

Проверим созданную базу знаний нечеткого регулятора и рассмотрим переходный процесс системы с МНЛР. Графики переходных процессов системы представлены на рисунке 3.15



- 1 Выход регулятора;
- 2 ошибка;
- 3 производная ошибки

Рисунок 3.15 – Графики переходных процессов измеряемых величин в системе с МНЛР:

Из графика видно значительное уменьшение времени переходного процесса в системе с многокаскадным нечётким регулятором, по сравнению с классической системой и системой с НЛР. Длительность переходного процесса уменьшилась в 10 раз по сравнению с классической системой и в 2 раза по сравнению с системой с НЛР. Использование многокаскадности в управлении позволило получить качественный переходный процесс без использования громоздких вычислительных процедур, необходимых для улучшения динамических характеристик как в классическом методе управления так и в нечёткой системе управления [17].

4 Описание и исследование нечетких многокаскадных регуляторов при изменении их внутренней структуры

В общей теории автоматического управления в последнее время получила достаточное развитие теория систем с переменной структурой. В 1956 г. С. В. Емельяновым была начата работа, целью которой явилось расширение возможностей управления за счет использования нетрадиционного подхода к синтезу управляющей части системы. С. В. Емельяновым было сформулировано положение о целесообразности реализации ряда структур управляющей части системы, поскольку в непрерывном процессе управления структура управляемой части переменна и нестационарна. Результатом работы явилось создание принципов построения системы с переменной структурой для управления объектами различных классов, а также методов синтеза и расчета таких систем [6].

Применение принципов построения системы с переменной структурой обеспечивает более высокое (по сравнению с линейными) качество переходных процессов как при полной, так и неполной информации о состоянии объекта. В системах управления с переменной структурой возникает новый подход к организации процесса адаптации, так как в этих системах информация о характеристиках управляемой части может быть получена достаточно просто. Положения, разработанные для одноконтурных систем, правомерны для многомерных систем с переменной структурой в условиях управления объектами с несколькими управляющими воздействиями [9].

Большие дополнительные возможности улучшения процессов регулирования дает нелинейное управление работой объекта путем изменения структуры регулятора в зависимости от размеров и знаков входных величин, поступающих в регулятор от измерительного устройства.

При этом могут использоваться комбинации линейных законов регулирования. Например, если известно, что при одном линейном законе регу-

лирования получается быстрое начальное изменение регулируемой величины, но с большими последующими колебаниями (кривая 1, рисунок 4.1), а при другом линейном законе регулирования — медленное изменение, но плавный подход к новому установившемуся режиму (кривая 2, рисунок 4.1),

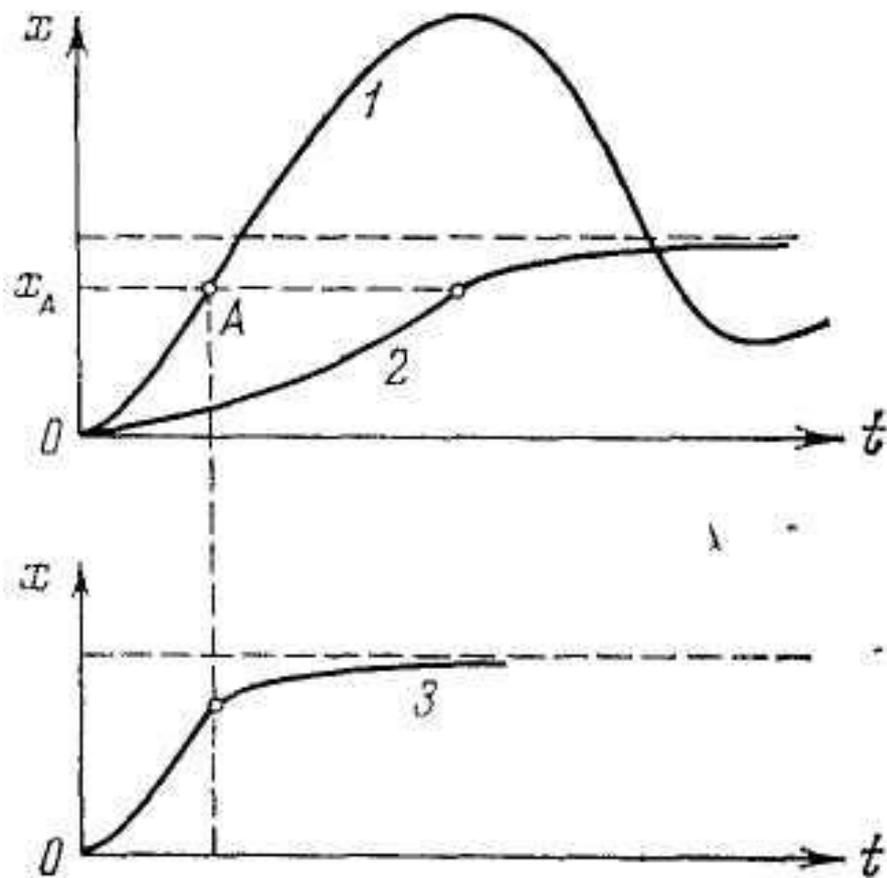


Рисунок 4.1 – Графики процессов переключения систем.

Включив сначала первый закон, переключить затем систему на второй закон в некоторой точке A , когда отклонение x достигнет определенного значения x_A . В результате процесс регулирования изобразится кривой 3 (рисунок 4.1), объединяющей оба качества — быстроту и плавность процесса [22].

Для осуществления этого необходимо иметь в системе переключающее устройство, срабатывающее в данном случае при $x = x_A$ (рисунок 4.2).

Если в такой системе с переменной структурой все звенья линейные, то за счет указанного переключения, происходящего

автоматически в процессе регулирования, система становится нелинейной. Это можно сравнить с тем, как получается нелинейная статическая характеристика из отрезков прямых линий. Но здесь имеет место нелинейная динамическая характеристика, составляемая из последовательности разных линейных дифференциальных уравнений, соответствующих первому и второму законам регулирования [5].

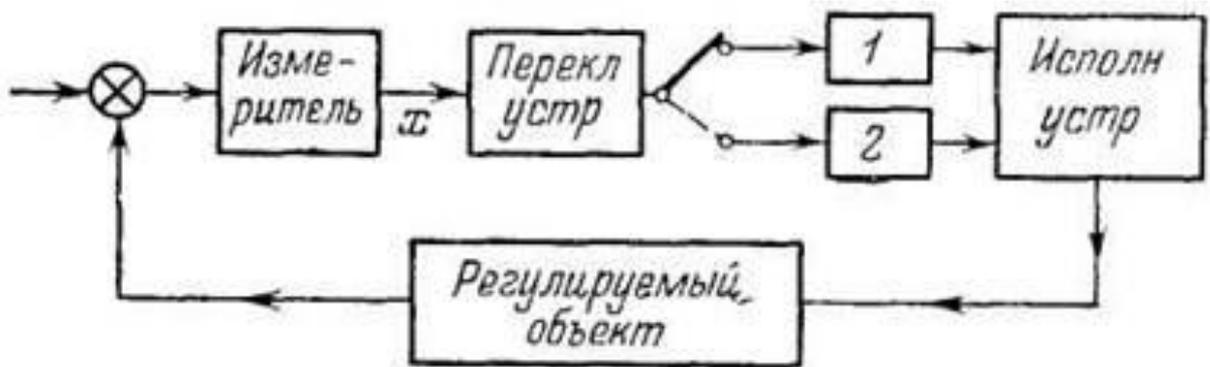


Рисунок 4.2 – Система с переключающим устройством

В общем случае срабатывание переключающего устройства в системе с переменной структурой может происходить от нескольких входных величин. При этом кроме основной нелинейности, возникающей за счет переключения структуры, дополнительно могут иметься какие-либо нелинейные свойства в отдельных других звеньях регулятора или объекта.

Необходимость в адаптивных системах управления возникает в связи с значительным усложнением решаемых задач управления, причем специфическая особенность такого усложнения заключается в отсутствии практической возможности для подробного изучения и описания процессов, протекающих в управляемом объекте. Примерами таких объектов могут служить многокомпонентные технологические процессы в химической промышленности, где не представляется возможным описание всей совокупности химических реакций, термодинамических и других физических процессов, или современные высокоскоростные летательные аппараты, точные априорные данные о характеристиках которых во всех условиях

функционирования не могут быть получены из-за значительных разбросов параметров атмосферы, больших диапазонов изменения скоростей полета, дальностей и высот, а также из-за наличия широкого спектра параметрических и внешних возмущений [14].

Неадаптивные методы управления, как правило, предусматривают наличие достаточного объема априорных сведений о внутренних и внешних условиях работы объекта еще на предварительной стадии разработки системы, которые затем используются при проектировании автоматической системы. Чем полнее априорная информация о характеристиках системы и условиях ее работы, тем обычно выше качество неадаптивного управления. Отсюда видно, что создание адаптивных систем управления осуществляется в принципиально иных условиях, т. е. адаптивные методы должны способствовать достижению высокого качества управления при отсутствии достаточной полноты априорной информации о характеристиках управляемого процесса или в условиях неопределенности [3].

Вполне очевидно, что по мере усложнения задач, возлагаемых на автоматические системы управления, указанная неопределенность растет, т. е. становится все сложнее заранее определять характер изменения динамических свойств системы и управляемого процесса. Поэтому трудности в обеспечении надлежащего качества управления также возрастают по мере уменьшения объема априорных знаний о системе.

Благодаря адаптивным методам управления найдены достаточно эффективные способы преодоления указанных трудностей.

Эффект приспособления к изменяющимся условиям в адаптивных системах достигается за счет того, что часть функций по получению, обработке и анализу недостающей информации об управляемом процессе осуществляется уже не проектировщиком на предварительной стадии, а самой системой в процессе ее нормальной эксплуатации [8].

Такой частичный перенос функций способствует не только более полному использованию рабочей информации (совокупности данных о состоянии системы, получаемой непосредственно в процессе управления) при формировании управляющих воздействий, но и позволяет существенно снизить влияние неопределенности на качество управления, компенсируя в определенной степени недостаток априорного знания проектировщика об управляемом процессе.

Таким образом, к адаптивному управлению приходится обращаться тогда, когда сложность управляемого процесса достигает такого уровня, при котором влияние неопределенности или «неполноты» априорной информации об условиях работы системы становится существенным для обеспечения заданного качества процессов управления.

В промышленности очень важны системы, которые легко реагируют на недетерминированные возмущающие воздействия, то есть адаптивные системы управления. Для проверки этого свойства необходимо поочередно отключать внутренние связи многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора [18].

Для начала отключим пропорциональную составляющую многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора. Смысл пропорциональной составляющей в том, что она стремится устранить непосредственную ошибку в значении стабилизируемой величины, наблюдаемую в данный момент времени. Значение этой составляющей прямопропорционально отклонению измеряемой величины от заданного значения измеряемого параметра. Так если входной сигнал равен заданного значения измеряемого параметра, то пропорциональная составляющая равна нулю [10].

При использовании только пропорционального регулятора значение регулируемой величины на практике никогда не устанавливается на заданном значении. Существует так называемая статическая ошибка, которая равна такому отклонению регулируемой величины, которое обеспечивает

выходной сигнал, стабилизирующий выходную величину именно на этом значении.

По мере увеличения коэффициента пропорциональности (усиления) уменьшается статическая ошибка, однако слишком большой коэффициент усиления может стать причиной автоколебаний, а при дальнейшем увеличении коэффициента система может потерять устойчивость и пойти “в разнос” [20].

Структурная схема изображена на рисунке 4.3.

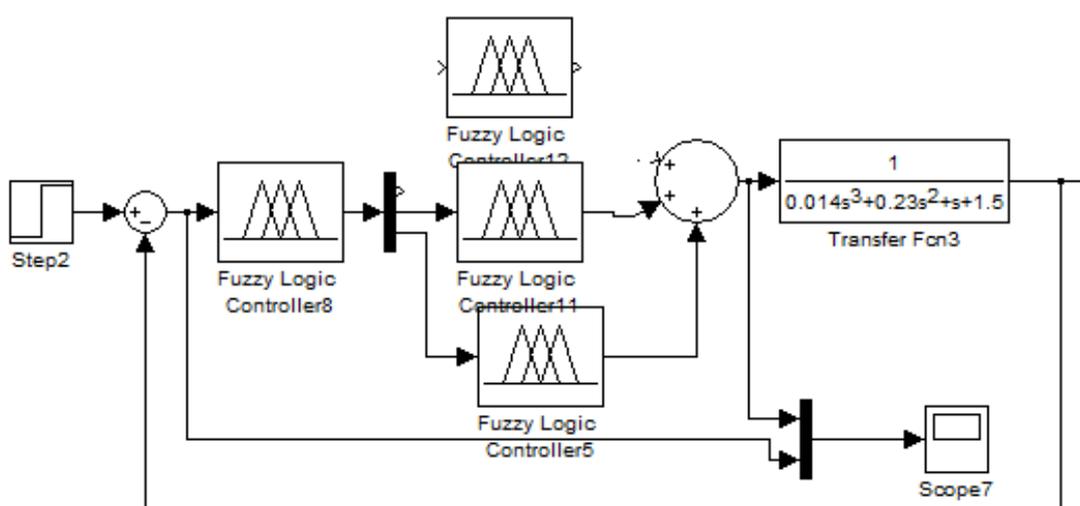
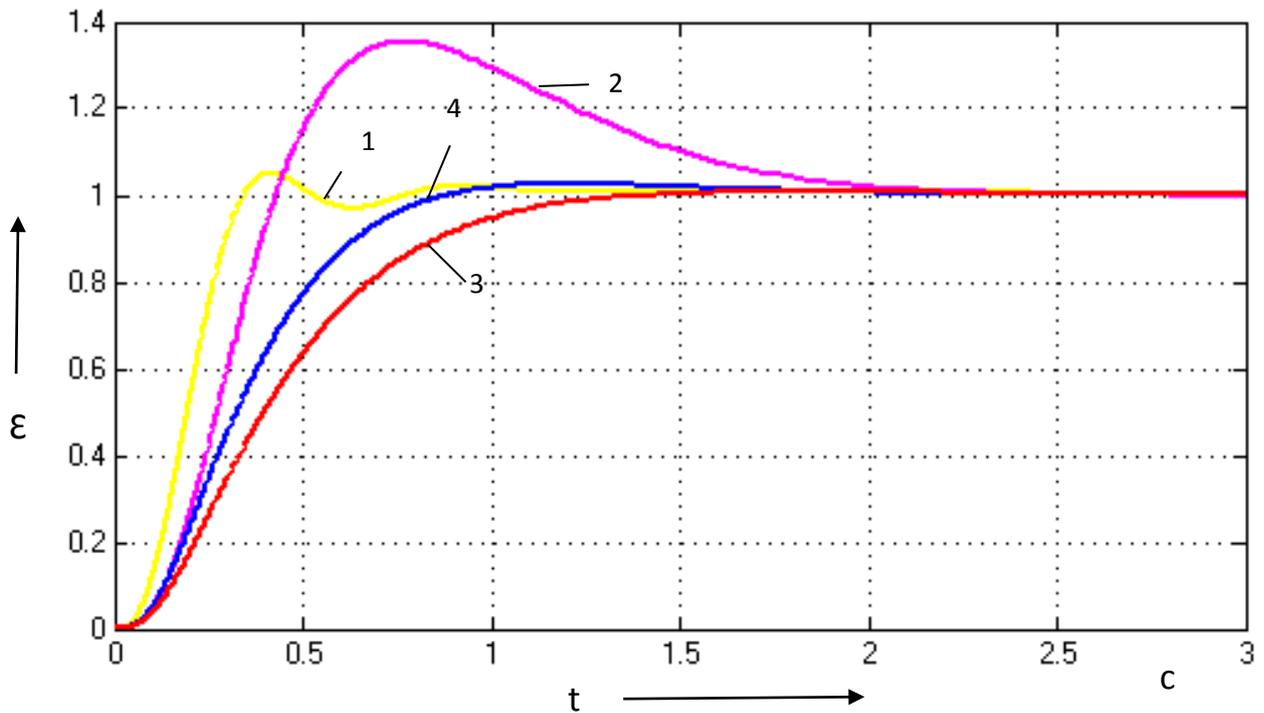


Рисунок 4.3 – Структурная схема с отключенной пропорциональной составляющей многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора

Рассмотрим получившийся переходной процесс и сравним его с переходным процессом многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной пропорциональной составляющей и многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора. Графики переходных процессов представлены на рисунке 4.4.



1 – система с классическим ПИД – регулятором; 2 – система с нечетким ПИД – регулятором; 3 – система с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором; 4 – система с отключенной пропорциональной составляющей.

Рисунок 4.4 – Графики переходных процессов

Из графиков видно, что данная система отработала практически одинаково, имеется очень маленькое перерегулирование, которое входит в 5% зону, время переходного процесса существенно не отличается от времени многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора и равно 1.7 секунд, а время МНЛР равно 1.6 секунд. Следовательно, применимость многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной пропорциональной составляющей оправдано, то есть данная система полностью адаптировалась к новым возмущающим воздействиям [18].

Восстановим отключенную пропорциональную составляющую и отключим интегральную составляющую многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора. Для устранения статической ошибки вводится интегральная составляющая. Она позволяет регулятору «учиться» на предыдущем опыте. Если система не испытывает внешних возмущений, то через некоторое время

регулируемая величина стабилизируется на заданном значении. При стабилизации пропорциональная составляющая будет равна нулю, а выходной сигнал будет полностью обеспечиваться интегральной составляющей. При постоянном значении рассогласования интегральная составляющая представляет линейно увеличивающуюся со временем величину.

Физически интегральная составляющая представляет задержку реакции регулятора на изменение величины рассогласования, внося в систему некоторую инерционность, что может быть полезно для управления объектами с большой чувствительностью.

Структурная схема изображена на рисунке 4.5.

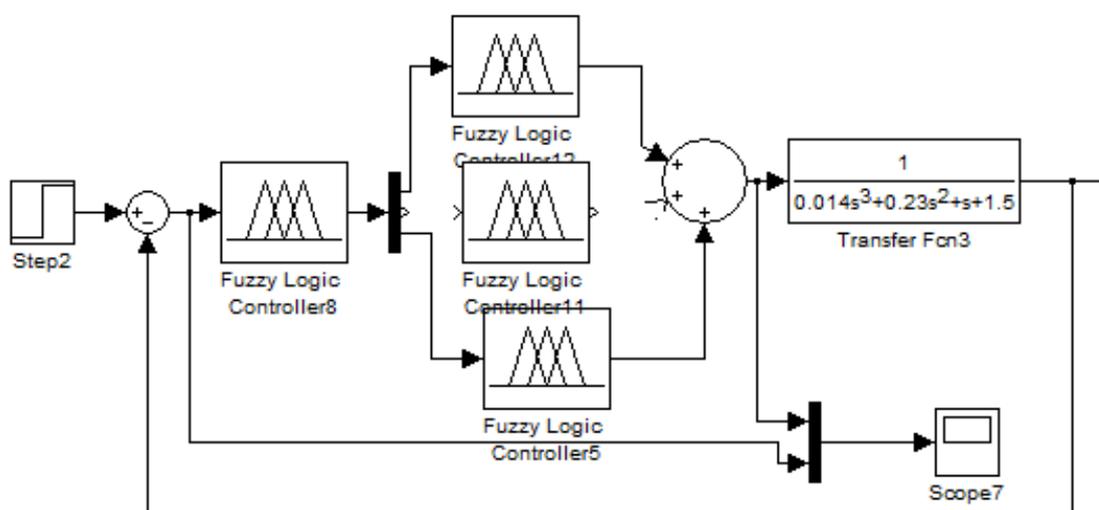
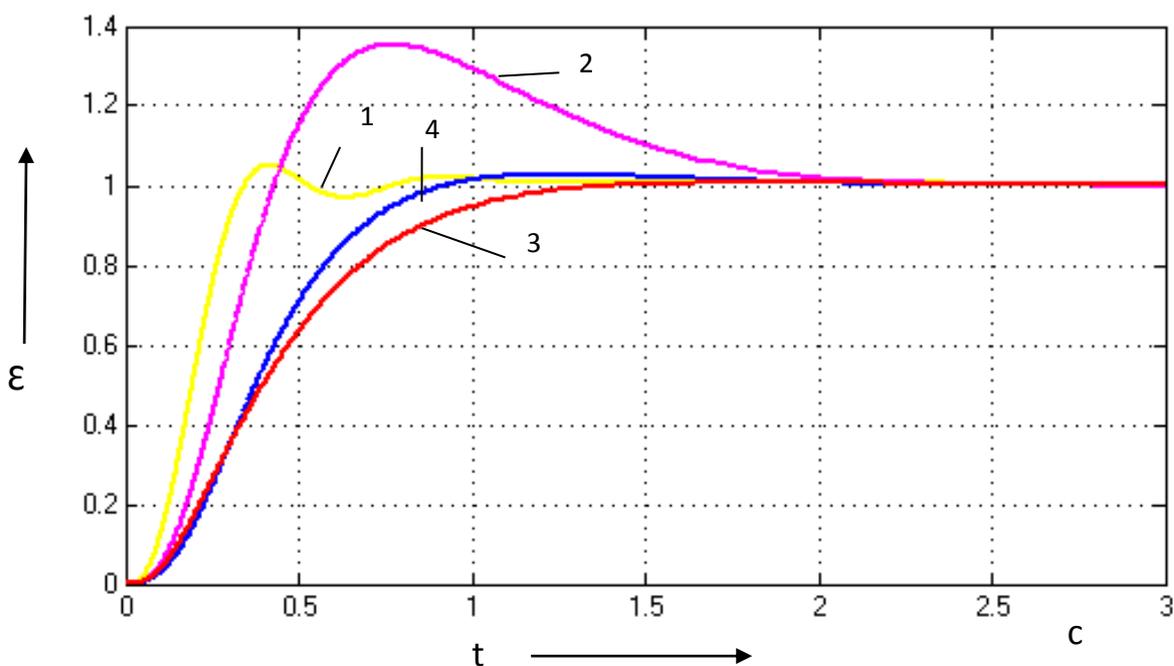


Рисунок 4.5 - Структурная схема с отключенной интегральной составляющей многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора

Рассмотрим получившиеся переходные процессы и сравним переходные процессы многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной интегральной составляющей и многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора. Графики переходных процессов представлены на рисунке 4.6.



1 – система с классическим ПИД – регулятором; 2 – система с нечетким ПИД – регулятором; 3 – система с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором; 4 – система с отключенной интегральной составляющей.

Рисунок 4.6 – Графики переходных процессов

Данная система отработала лучше, так как имеется маленькое перерегулирование, которое входит в 5% зону, время переходного процесса одинаково с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором и составляет 1.6 секунд. У многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной интегральной составляющей скорость изменения возросла, чем у многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора [18].

Восстанавливаем отключенную интегральную составляющую многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора и отключаем дифференциальную составляющую. Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, как бы предугадывая поведение объекта в будущем. Эти отклонения могут быть спровоцированы внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему [12].

Чем быстрее регулируемая величина отклоняется от заданного значения измеряемого параметра, тем сильнее противодействие, создаваемое

дифференциальной составляющей. Когда рассогласование становится постоянной величиной, дифференциальная составляющая перестает оказывать воздействие на сигнал управления.

Структурная схема изображена на рисунке 4.7.

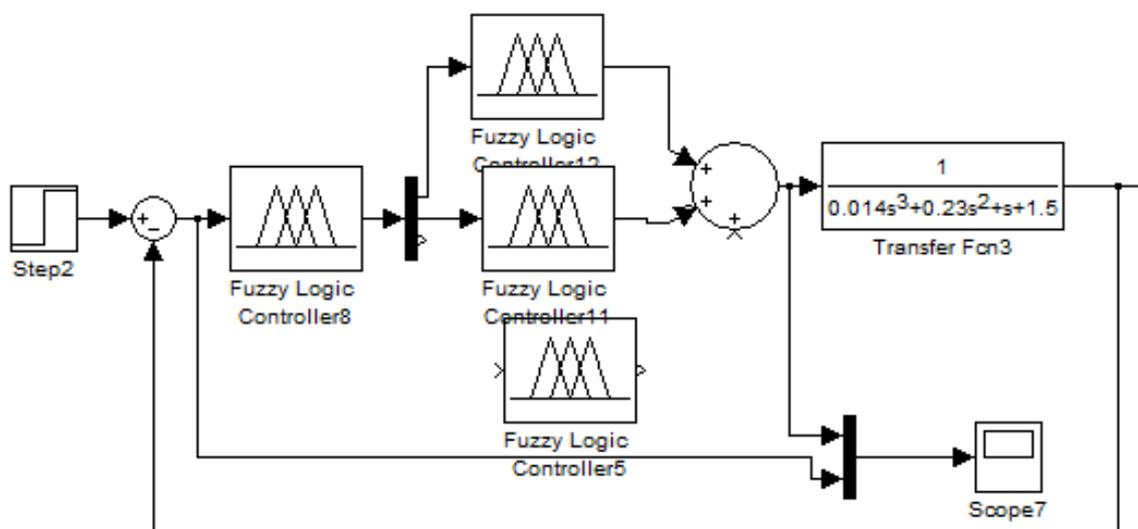
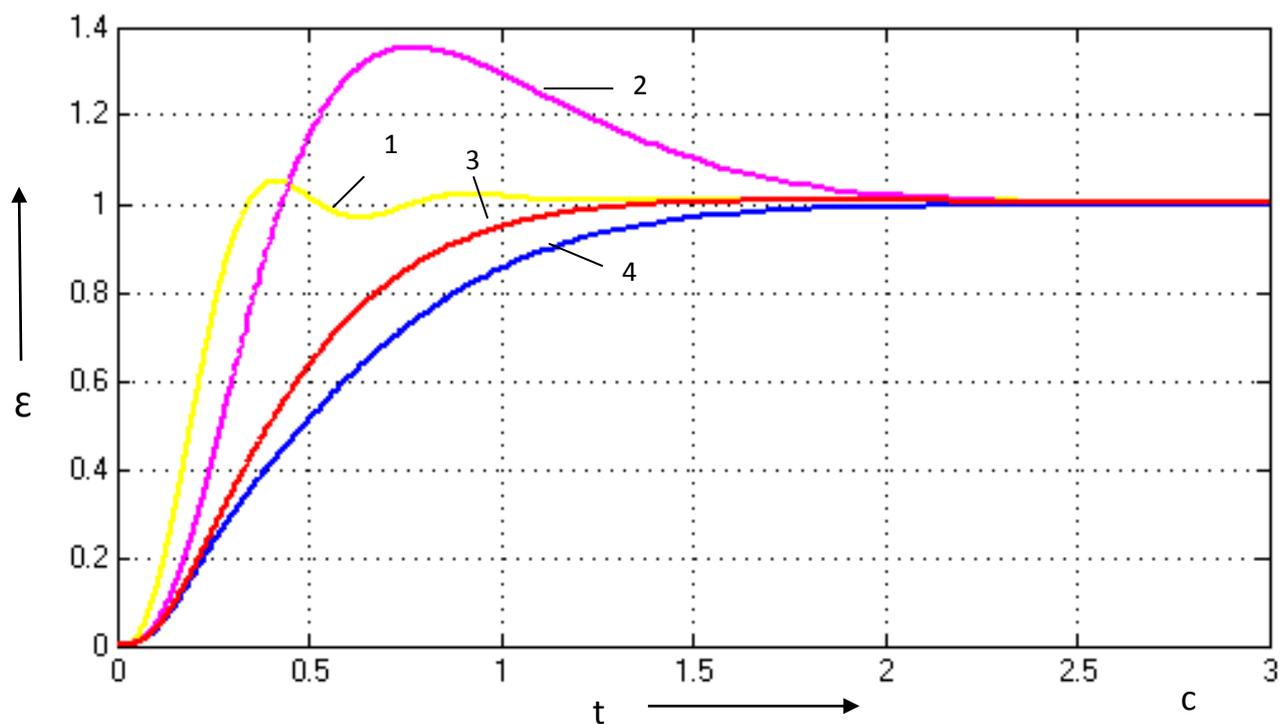


Рисунок 4.7 – Структурная схема многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной дифференциальной составляющей.

Проанализируем получившиеся переходные процессы и сравним переходные процессы многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной дифференциальной составляющей и многокаскадным нечетким ПИД – регулятора. Графики переходных процессов представлены на рисунке 4.7.



1 – система с классическим ПИД – регулятором; 2 – система с нечетким ПИД – регулятором; 3 – система с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором; 4 – система многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной дифференциальной составляющей.

Рисунок 4.7 – Графики переходных процессов.

Из графика видно, что система многокаскадного нечеткого ПИД - регулятора с отключенной дифференциальной составляющей ведет себя хуже, так как время переходного процесса увеличилось по отношению с многокаскадным нечетким ПИД - регулятором, из - за то что скорость снизилась на заданный уровень, но также из - за система ведет себя точнее [18].

Подключаем дифференциальную составляющую многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора и отключаем уже две составляющие, пропорциональную и интегральную составляющие многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора.

Структурная схема изображена на рисунке 4.8.

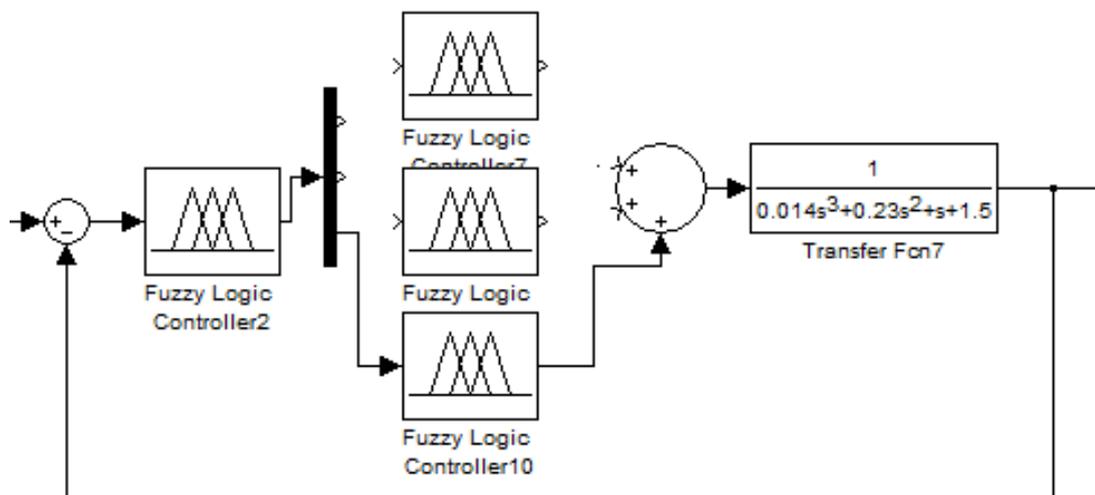
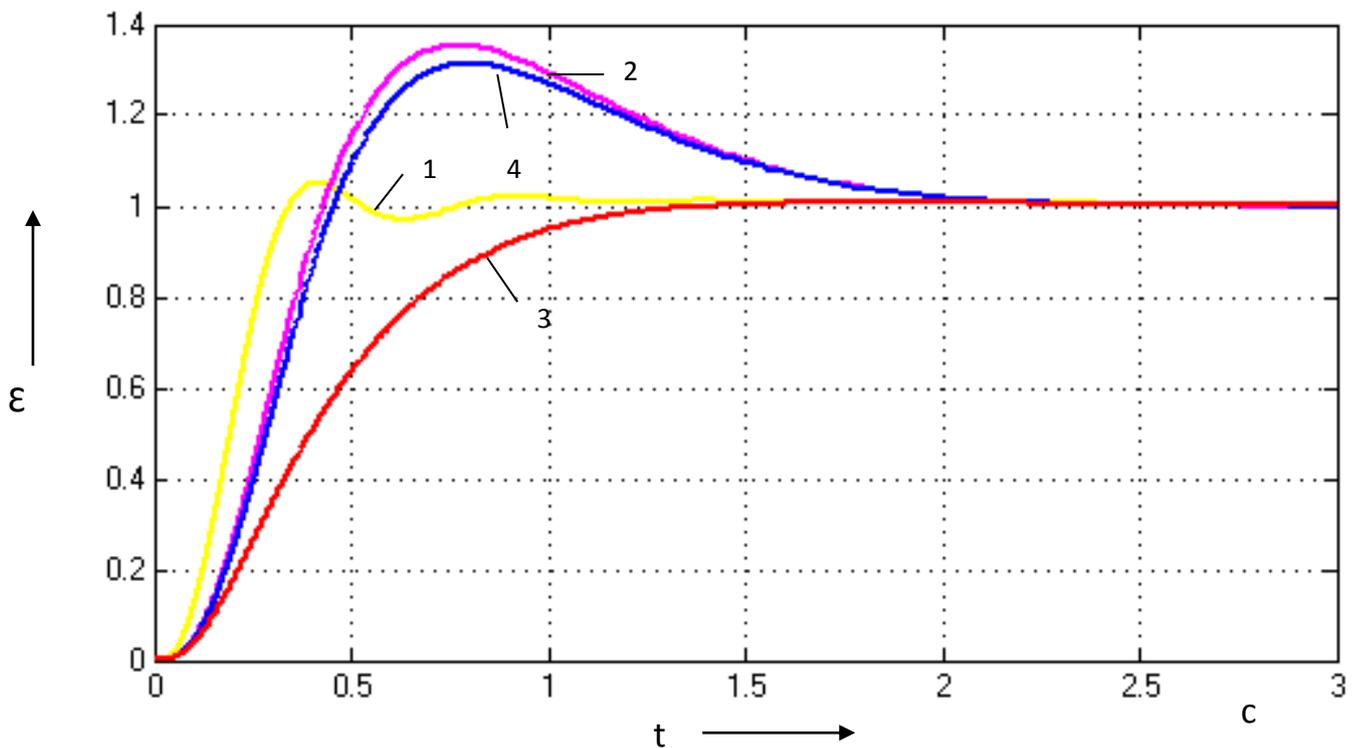


Рисунок 4.8 – Структурная схема многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и интегральной составляющими.

Проанализируем переходные процессы многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и интегральной составляющими и многокаскадным нечетким ПИД – регулятором. Графики переходных процессов изображены на рисунке 4.9.



1 – система с классическим ПИД – регулятором; 2 – система с нечетким ПИД – регулятором; 3 – система с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором; 4 – система многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и интегральной составляющими.

Рисунок 4.9 – Графики переходных процессов.

На графике видно, что система с многокаскадным нечетким ПИД - регулятором с отключенными пропорциональной и интегральной составляющими имеет очень большое перерегулирование и намного медленнее выходит на нужный уровень, так как скорость изменения значений очень большая [20].

Подключаем пропорциональную составляющую в многокаскадный нечеткий ПИД – регулятор и отключаем дифференциальную составляющую.

Структурная схема изображена на рисунке 4.10.

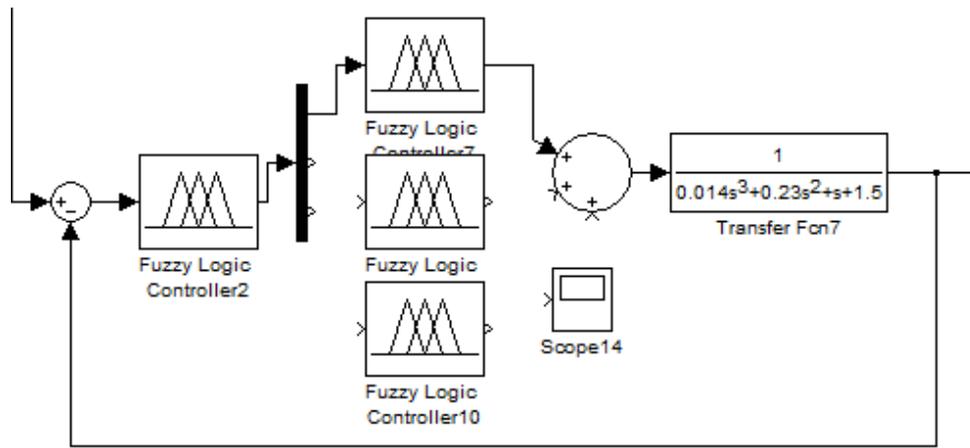
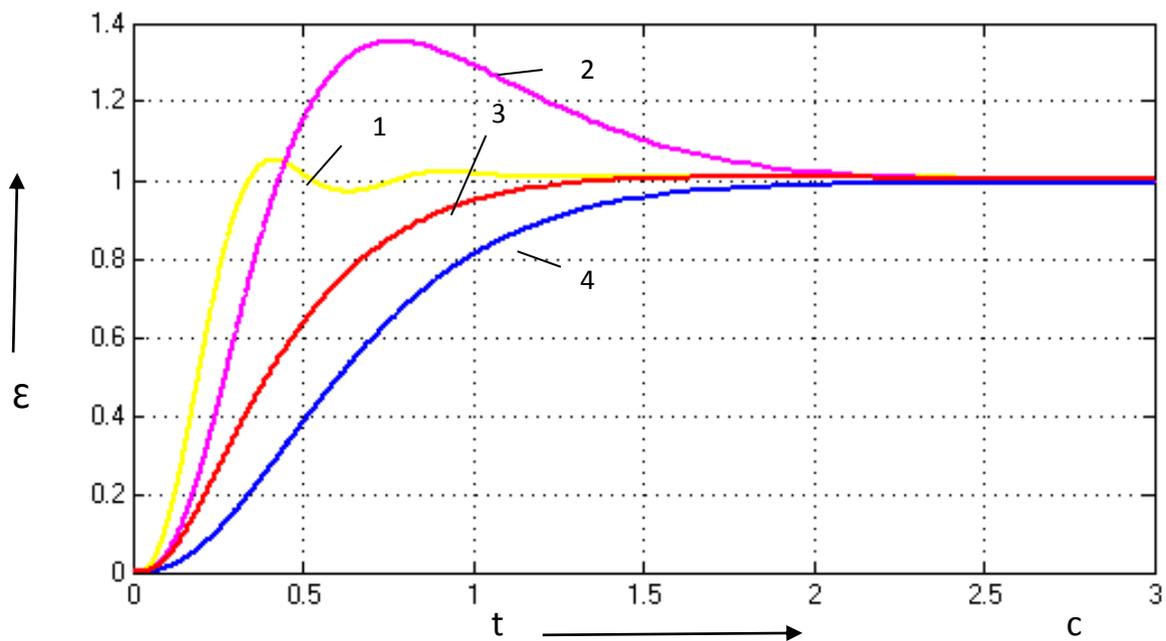


Рисунок 4.10 – Структурная схема многокаскадного нечеткого ПИД - регулятора с отключенной интегральной и дифференциальной составляющих.

Проанализируем переходные процессы многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными интегральной и дифференциальной составляющими и многокаскадным нечетким ПИД – регулятором. Графики переходных процессов изображены на рисунке 4.11.



1 – система с классическим ПИД – регулятором; 2 – система с нечетким ПИД – регулятором; 3 – система с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором; 4 – система с двумя оборванными внутренними связями.

Рисунок 4.11 – Графики переходных процессов.

Из графиков видно, так как работает пропорциональная составляющая, нет перерегулирования, но из за того что интегральная составляющая не обрабатывает ошибку, а дифференциальная составляющая не увеличивает скорость изменения величины значения, то время переходного очень большое.

Мы проверили адаптивность многокаскадного нечеткого ПИД - регулятора путем отключения в нём внутренних связей и убедились в том, что система полностью отработала возмущающие воздействия. Так же к этой системе добавим ещё одну дополнительную внутреннюю связь, чтобы окончательно убедиться в адаптивности многокаскадного нечеткого ПИД - регулятора. Следовательно, добавленная внутренняя связь должна улучшить переходный процесс системы [21].

При синтезе нечёткого регулятора будем применять алгоритм нечёткого логического вывода Сугено. Для метода Сугено характерна эффективность в вычислительном отношении, он хорошо работает с линейными методами (ПИД-управление), а также он хорошо подходит для математического анализа.

Структурная схема изображена на рисунке 4.12.

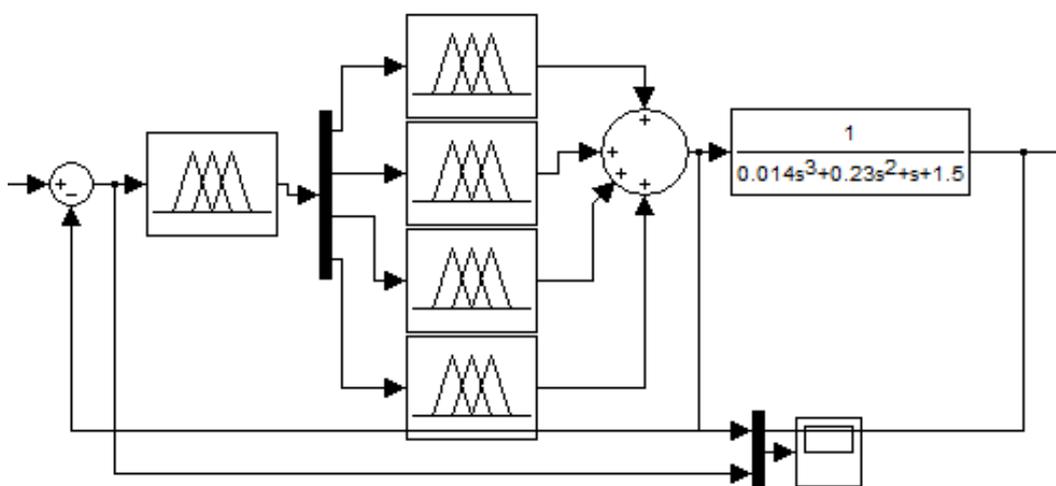


Рисунок 4.12 – Структурная схема многокаскадного нечеткого ПИД - регулятора с добавленной внутренней связью.

В работе диапазоны входных переменных получены по результатам моделирования ПИД-регулятора. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-0.05, 1]$. Вид термов для лингвистической переменной «ошибка» представлен на рисунке 4.13.

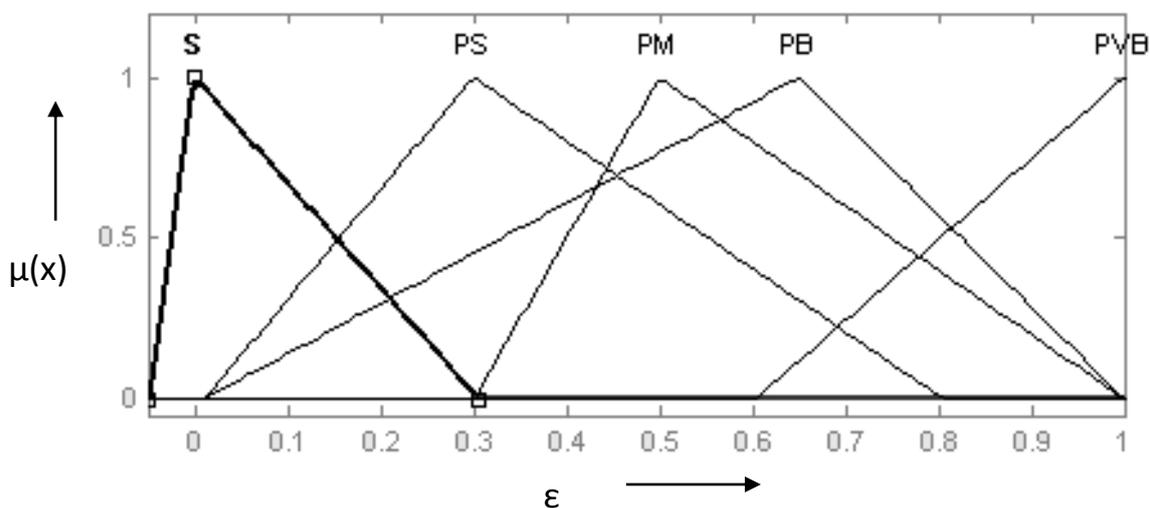


Рисунок 4.13 -Функции принадлежности лингвистической переменной «ошибка»

Терм-множество выходных лингвистических переменных ограничим на уровне трёх. Терм множество – $T1$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T1 = \{NS, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательно малое», «положительное малое», «положительное большое».

Для выхода регулятора диапазон изменения параметров управляющего воздействия принят $[-4, 16]$. Функции принадлежности управляющего воздействия представлены на рисунке 4.14.

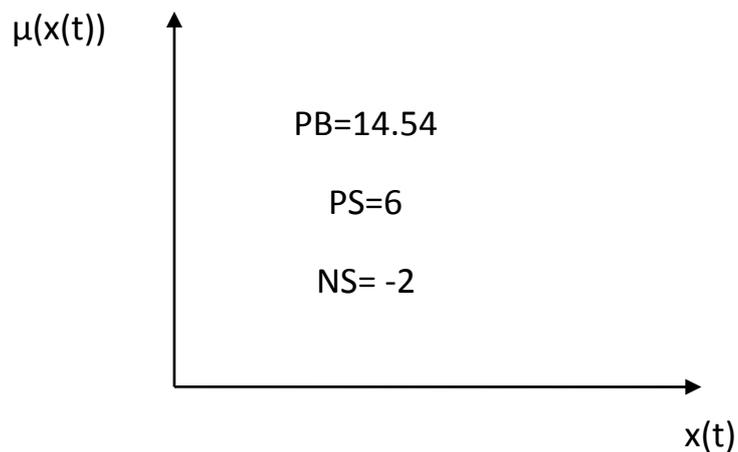


Рисунок 4.14 - Функции принадлежности управляющего воздействия

Содержательным компонентом блока нечеткого вывода является база знаний НЛР. Она строится исходя из цели применения НЛР.

В естественно-языковой форме управление будет иметь следующий вид:

Если сигнал ошибки положительный и возрастает, то управляющий сигнал будет – положительный малый. Если положительный сигнал ошибки будет очень большой, то управляющий сигнал на выходов также будет расти, становясь положительным большим. Если сигнал ошибки будет падать, то выходной сигнал также будет падать [17].

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

- 5) Если «ошибка» есть PB , тогда «управление» есть $PS=6$,
- 6) «Если «ошибка» есть PVB , тогда «управление» есть $PB=14.54$,
- 7) «Если «ошибка» есть PM , тогда «управление» есть $NS=-2$,
- 8) «Если «ошибка» есть PS , тогда «управление» есть $NS=-2$.

В функциональную схему МНЛР также добавляем еще одну связь, используя алгоритм вывода по Мамдани.

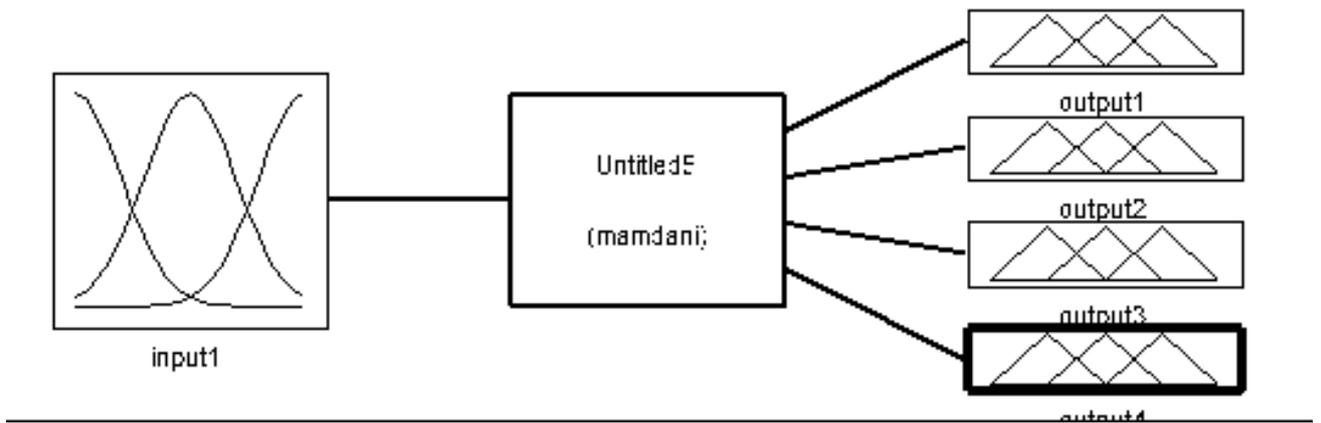


Рисунок 4.15 – Функциональная схема МНЛР.

Каждый вход и выход описываются определённым набором термов. Настройка НЛР осуществляется в соответствии со структурной схемой приведённой на рисунке 1.

Диапазоны изменения параметров были получены из результатов моделирования ПИД-регулятора. Для входа регулятора диапазон изменения принят $[-0.7, 1]$. Исходя из того, что данная входная переменная имеет 4 термы, получим следующие функции принадлежности, представленные на рисунке 4.16.

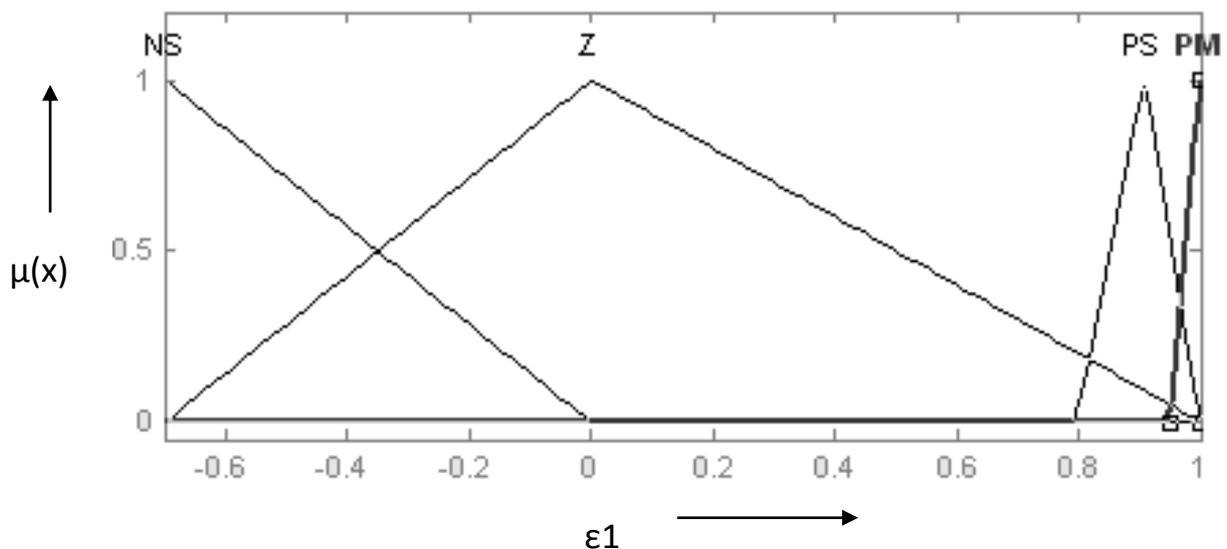


Рисунок 4.16 - Функции принадлежности лингвистической переменной «ошибка1»

Рассмотрим первый выход НЛР. Терм-множество $T1$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T1=\{NS, Z, PS, PB\}$, означающее соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон управляющего воздействия для этого выхода принят $[-40, 64]$, а функции принадлежности корректирующего сигнала приведены на рисунке 4.17.

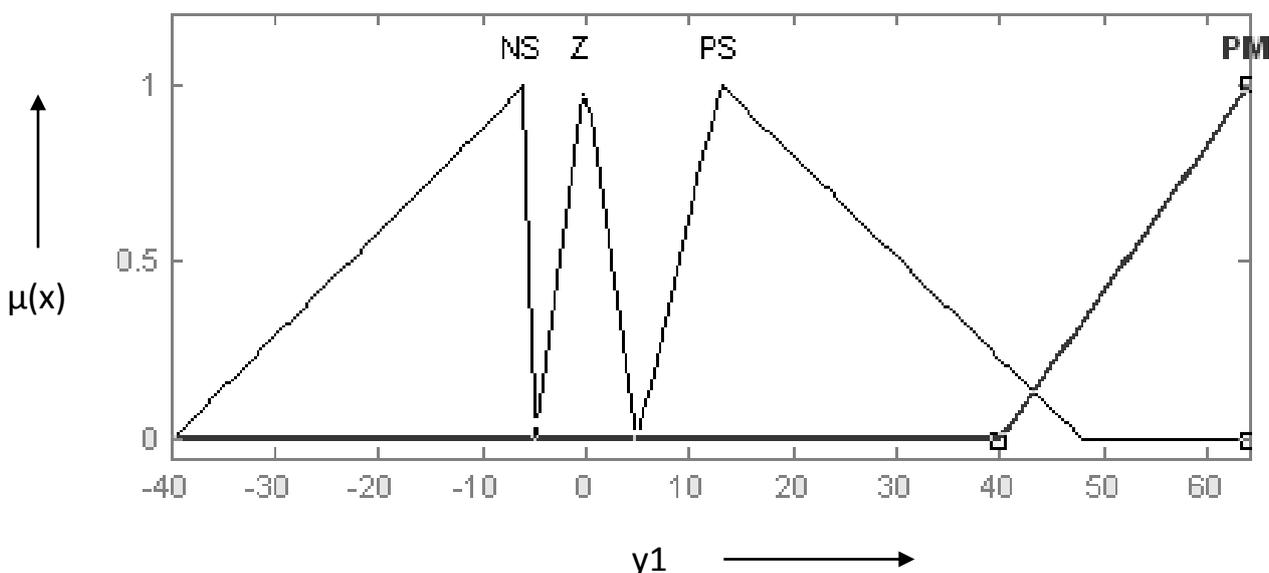


Рисунок 4.17. - Функции принадлежности корректирующего воздействия первого выхода

Второй выход НЛР. Терм-множество $T2$ лингвистических переменных – имеет название термов: $T2=\{NS, Z, PS, PB\}$, означающие соответственно: «отрицательное малое», «нулевое», «положительное малое», «положительное большое». Диапазон управляющего воздействия $[-0.7, 1]$. Функции принадлежности приведены на рисунке 4.18.

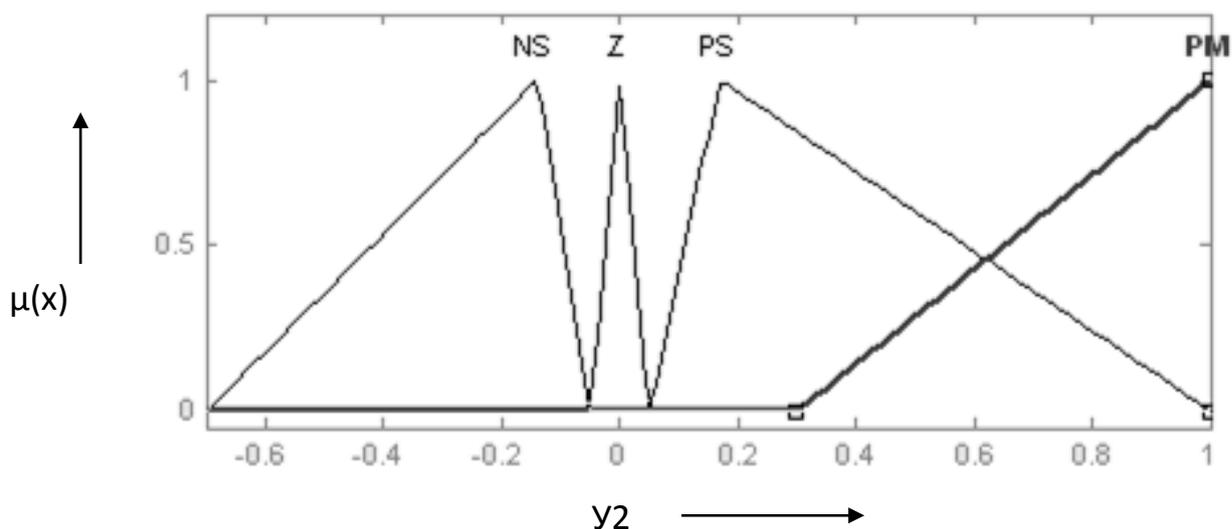


Рисунок 4.18 - Функции принадлежности корректирующего воздействия второго выхода

Третий выход НЛР. Терм-множество T_3 лингвистических переменных – имеет название термов: $T_3 = \{PS, PM, PB, PVB\}$ означающие соответственно: «положительное малое», «положительно среднее», «положительное большое», «положительное очень большое». Диапазон управляющего воздействия $[0.1, 1]$. Функции принадлежности приведены на рисунке 4.19.

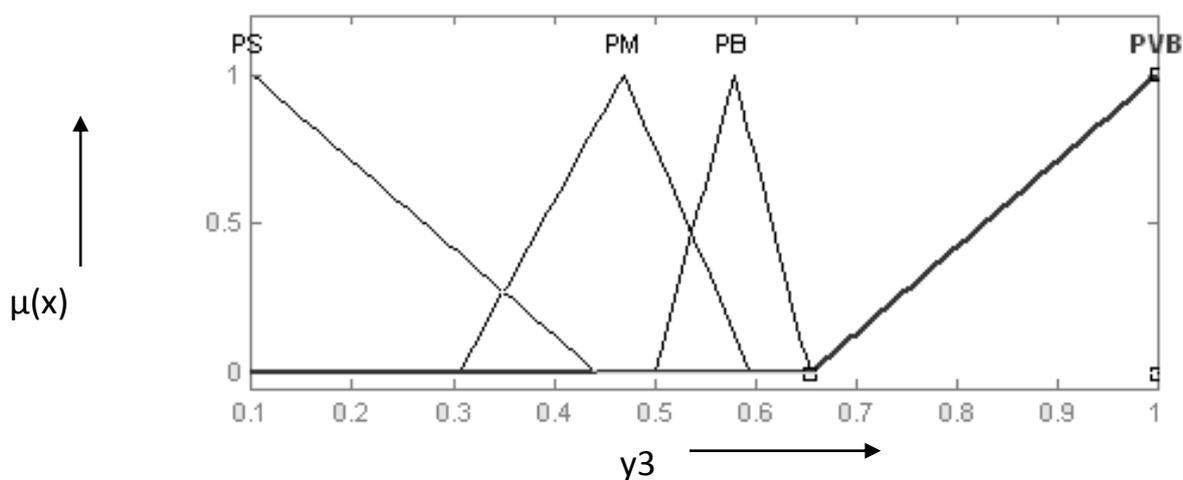


Рисунок 4.19 - Функции принадлежности корректирующего воздействия третьего выхода

Четвертый выход НЛР в диапазоне управляющего воздействия $[0.7, 1]$.
 Функции принадлежности приведены на рисунке 4.20.

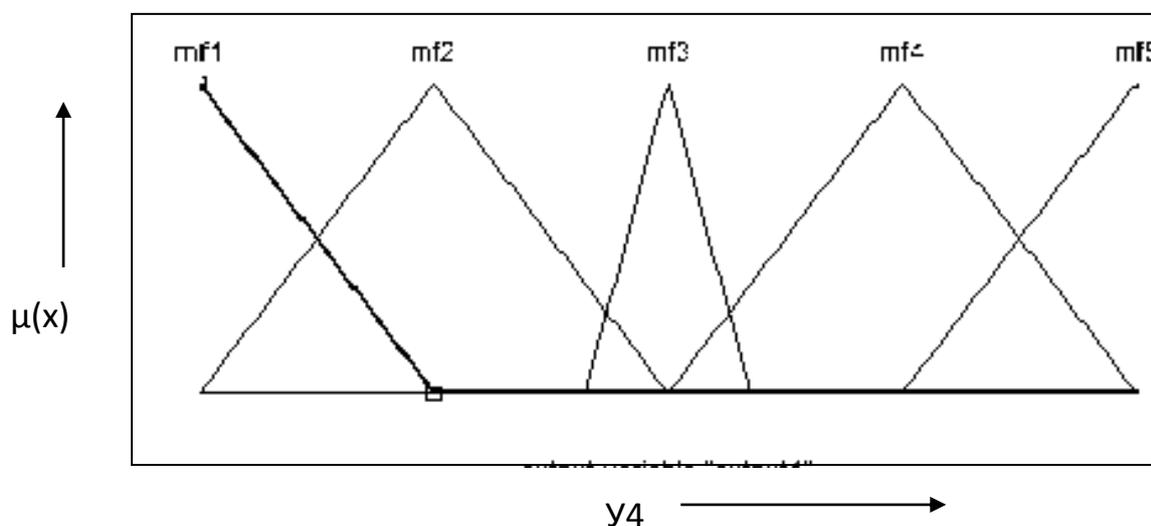
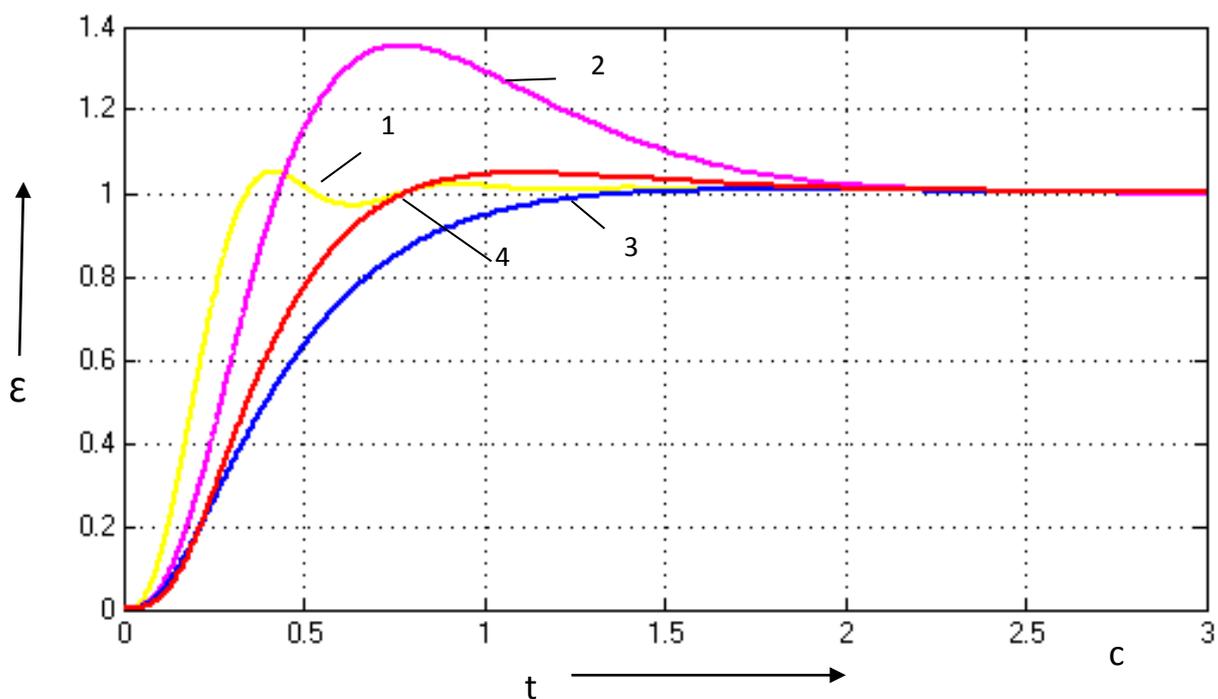


Рисунок 4.20 - Функции принадлежности корректирующего воздействия четвертого выхода

Содержательным компонентом блока нечеткого вывода является база знаний НЛР. Получим множество управляющих правил, связывающих лингвистические значения входных и выходных переменных вида:

- 5) Если «ошибка 1» есть PM, тогда «коррекция 1» есть PM, «коррекция 2» есть PM, «коррекция 3» есть PVB и «коррекция 4» есть mf3
- 6) Если «ошибка 1» есть PS, тогда «коррекция 1» есть PS, «коррекция 2» есть PS, «коррекция 3» есть PB и «коррекция 4» есть mf2
- 7) Если «ошибка 1» есть Z, тогда «коррекция 1» есть NS, «коррекция 2» есть NS, «коррекция 3» есть PS и «коррекция 4» есть mf1
- 8) Если «ошибка 1» есть NS, тогда «коррекция 1» есть Z, «коррекция 2» есть Z, «коррекция 3» есть PM и «коррекция 4» есть mf4

Проверим созданную базу знаний нечеткого регулятора и рассмотрим переходный процесс системы с МНЛР. Графики переходных процессов системы представлены на рисунке 4.21.



1 – система с классическим ПИД – регулятором; 2 – система с нечетким ПИД – регулятором; 3 – система с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором; 4 – система многокаскадного нечеткого ПИД - регулятора с добавленной внутренней связью.

Рисунок 4.21 – Графики переходных процессов

По результатам моделирования можно сделать вывод, что МНЛР и МНЛР с добавленной внутренней связью выходят на нужный уровень практически в один момент времени (время переходного процесса МНЛР равно 1,6 секунд, а МНЛР с добавленной внутренней связью равен 1.7 секунды), но МНЛР с добавленной внутренней связью имеет небольшое перерегулирование, которое входит в 5% зону, это объясняется тем что система стала более сложнее [18].

5 Оценка эффективности работы нечеткого регулятора по быстродействию.

Особый интерес в MATLAB представляет пара функций `tic` и `toc`, позволяющих вычислить время выполнения системой той или иной операции. Если в командной строке набрать приведенную ниже последовательность команд:

```
tic, операция, toc
```

где операция - это команда или набор команд, то будет отображен не только результат выполнения заданной операции, но и приблизительное время ее выполнения (в секундах). При этом функция `tic` запускает секундомер, а функция `toc` выводит вычисленное время. Это время зависит от нескольких различных факторов и может изменяться, поэтому для получения более точных значений времени следует провести несколько измерений, а результаты усреднить [20].

Функции `tic` и `toc` очень полезны, когда нужно выбрать наиболее эффективную реализацию решения одной и той же задачи.

Воспользуемся этой функцией и измерим время отработки нечеткого ПИД – регулятора, нечеткого ПИД – регулятора с отключенными поочередно внутренними связями, многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора, многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными поочередно внутренними связями [18].

Время отработки нечеткого ПИД – регулятора с отключенной пропорциональной составляющей:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

```
tic, UntitledNP, toc
```

Выводится время отработки нечеткого ПИД – регулятора с отключенной пропорциональной составляющей, которое равно 0.006327 секунды.

Время обработки нечеткого ПИД – регулятора с отключенной интегральной составляющей:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledNI, toc`

Выводится время обработки нечеткого ПИД – регулятора с отключенной интегральной составляющей, которое равно 0.00576 секунды.

Время обработки нечеткого ПИД – регулятора с отключенной дифференциальной составляющей:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledND, toc`

Выводится время обработки нечеткого ПИД – регулятора с отключенной дифференциальной составляющей, которое равно 0.000872 секунды.

Время обработки нечеткого ПИД – регулятора :

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledNP + UntitledNI + UntitledND, toc`

Выводится время обработки нечеткого ПИД – регулятора, которое равно 0.001772 секунды.

Время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной пропорциональной составляющей:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledMP, toc`

Выводится время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной пропорциональной составляющей, которое равно 0.000517 секунды.

Время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной интегральной составляющей:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledMI, toc`

Выводится время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной интегральной составляющей, которое равно 0.000497 секунды.

Время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной дифференциальной составляющей:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledMD, toc`

Выводится время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенной составляющей, которое равно 0.000875 секунды.

Время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и интегральной составляющих:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledMP + UntitledMI, toc`

Выводится время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и интегральной составляющих, которое равно 0.0919 секунды.

Время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и дифференциальной составляющих:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledMP + UntitledMD, toc`

Выводится время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными пропорциональной и дифференциальной составляющих, которое равно 0.00165 секунды.

Время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными интегральной и дифференциальной составляющих:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

`tic, UntitledMI + UntitledMD, toc`

Выводится время обработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с отключенными интегральной и дифференциальной составляющих, которое равно 0.00876 секунды.

Время отработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с добавленной внутренней связью:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

tic, UntitledMP + UntitledMI + UntitledMD + Untitled1, toc

Выводится время отработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора с добавленной внутренней связью, которое равно 0.00195 секунды.

Время отработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора:

В интерфейсе Matlab вводим функцию:

tic, UntitledM, toc

Выводится время отработки многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора, которое равно 0.01465 секунды.

После всех выведенных на экран результатов систематизируем их в таблицу, чтобы удобней было проанализировать.

Таблица 1 – Время отработки регуляторов

Нечеткий ПИД - регулятор	0,001772 с
Многокаскадный ПИД - регулятор	0,014651 с
Многокаскадный ПИД – регулятор с добавленной внутренней связью	0,00195 с
Многокаскадный ПИД – регулятор с оборванной пропорциональной составляющей	0.000517 с
Многокаскадный ПИД – регулятор с оборванной интегральной составляющей	0.000497 с
Многокаскадный ПИД – регулятор с оборванной дифференциальной составляющей	0.000875с
Многокаскадный ПИД – регулятор с оборванной пропорциональной и интегральной составляющих	0.091896с
Многокаскадный ПИД – регулятор с оборванной интегральной и дифференциальной составляющих	0.00165с
Многокаскадный ПИД – регулятор с оборванной пропорциональной и дифференциальной составляющих	0.00876с
Нечеткий ПИД – регулятор с оборванной пропорциональной составляющей	0.006327 с
Нечеткий ПИД – регулятор с оборванной интегральной составляющей	0.00576 с
Нечеткий ПИД – регулятор с оборванной дифференциальной составляющей	0.000872с

Из таблицы можно сделать вывод, что время отработки всех регуляторов достаточно мало, однако, в случае обрыва двух связей время отработки регулятора несколько увеличивается и, кроме того, классический ПИД регулятор реализует закон управления несколько медленнее интеллектуальной системы. Таким образом, внешний каскад нечеткого регулятора позволяет спрогнозировать, и как, следствие, скомпенсировать возможные существенные изменения внутри системы регулирования.

Одним из современных формализованных подходов к анализу и синтезу систем управления, базирующихся на математических методах оптимизации, является теория управления динамическими объектами с использованием прогнозирующих моделей.

В настоящее время прогнозирующая модель находится в стадии интенсивного развития, о чём свидетельствует обширная библиография опубликованных за последние годы научных работ, посвященных данной проблематике. Развитие идей управления с прогнозированием происходит в направлении использования нелинейных моделей, обеспечения устойчивости по Ляпунову контролируемых движений, придания робастных свойств замкнутой системе управления, применения современных оптимизационных методов в реальном масштабе времени и др.

Заключение

В данной работе было проведено исследование многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора при изменении его внутренней структуры, а также оценка его эффективности по быстродействию. В качестве объекта управления была рассмотрена система с отрицательной обратной связью и ПИД – регулятором. В классической системе основным недостатком является сравнительно невысокая динамическая точность при действии недетерминированных возмущений и изменениях параметров объекта управления. Для повышения динамической точности целесообразно использовать в системе регулирования вместо ПИД - регулятора нечёткие логические регуляторы. Сравнивая классический ПИД – регулятор и нечеткий выяснилось, что нечеткий ПИД – регулятор доказывает свою эффективность при управлении статическими объектами. Кроме того, необходимо отметить что МНЛР обладает существенными возможностями к адаптации, то есть представленные в работе структурные решения оправданы и для случаев смещения и увеличения информационной составляющей. Интеллектуальные подходы заложенные в многокаскадную структуру регулятора позволяют достаточно гибко перестраивать законы управления. Нечеткая логика обеспечивает эффективные средства отображения неопределенностей и неточностей реальных объектов.

По результатам моделирования наглядно показывают правомерность применения нечеткой многокаскадной системы управления. Так же многокаскадный ПИД – регулятор обладает многокритериальностью, в отличие от классического ПИД – регулятора. Если в теории автоматического управления объект может обладать только одним из двух свойств – это быстродействие, то есть объект настроенный на модульный оптимум, и небольшое перерегулирование, то есть объект настроенный на симметричный оптимум. Тогда как нечеткое управление обладает этими двумя свойствами.

Список использованных источников

- 1 Поспелов, Д. А. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта/Д. А. Поспелова. – М.: Наука., 1986. – 312с.
- 2 Поспелов, Д. А. Логико – лингвистические модели в системах управления / Д. А.Поспелов. – М. : Энергия.,2011. – 254с.
- 3 Бесекерский, В.А.Робастные системы автоматического управления /В. А. Бесекерский, А. В. Небылов – М: Наука.,1983. – 240с.
- 4 Асаи, К. Прикладные нечеткие системы / К. Асаи, С. Иваи, Д. Ватада.- М.: Мир., 2010.- 198с.
- 5 Статические и динамические экспертные системы: Учеб. пособие/ Э.В. Попов, И.Б Фоминых, Е.Б. Кисель, М.Д. Шапот. – М.: финансы и статистика, 1996. – 320 с.
- 6 Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика/ Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 2004. – 288с.
- 7 Блишун, А.Ф.Обоснование операций теории нечётких множеств /А. Ф. Блишун, С. Ю. Знатнов– В кн.: Нетрадиционные модели и системы с нечёткими знаниями.
- 8 Дюбуа, Д. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике / Д. Дюбуа, А. Прад – М: Радио и связь, 1990. – 288 с.
- 9 Искусственный интеллект. – В 3т. : Системы общения и экспертные системы: справочник/ под ред. Э.В. Попова. –М.: Радио и связь, 1990. – 464 с.
- 10 Заде, Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир.,2009. – 324с.
- 11 Васильев, В. И. Интеллектуальные системы управления с использованием нечеткой логики : учеб. Пособие / В. И. Васильев, С. В. Ильясов. – Уфа : ФГБОУ ВО «УГАТУ», 1995. – 200с.

12 Компьютерный практикум по курсу «Теория управления». Simulink – моделирование в среде Matlab / сост. А. Данилов. – М. : Изд – во «МГУИЭ», 2005. – 64с.

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

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

15 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. – 55 – 59.

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

17 Мелихов, А.Н. Ситуационные советующие системы с нечёткой логикой / А. Н. Мелихов, Л. С. Берштейн, С. Я. Коровин – М.: Наука, 2010. – 272с.

18 Соловьев, В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В.А.Соловьев, С.П.Черный – Дальнаука, 2010. – 267с.

19 Соловьев, В. А. Применение нечёткой логики в устройствах регулирования энергетических объектов / В. А. Соловьев, А. Г. Владыко, В. С. Легенкин // Электроэнергетика и энергосберегающие технологии: межвузовский сб. науч. тр. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 1998. – С. 125-133.

20 Черный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока /С. П. Черный, А. А. Гусаров // Учёные записки Комсомольского – на - Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 24-30.

21 Филатова, А.С. Моделирование интеллектуальной системы управления с многокаскадным нечетким ПИД – регулятором / А.С. Филатова, С.П. Черный, Е.Н. Землянская // Ученые записки Комсомольского – на – Амуре государственного технического университета. Энергетика. – 2015. - № 6 – 1 (24). – С. 15-21.

22 Филатова, А.С. К вопросы об адаптивных свойствах многокаскадного нечеткого ПИД – регулятора / А.С.Филатова, С.П.Черный, Д.Ю.Чигрин // материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов, Комсомольск – на – Амуре , 14-15 апреля 2016 г. – Комсомольск – на – Амуре : ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 618 – 620.

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

24 К вопросу синтеза нечётких регуляторов систем электропривода подач. Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами// А.Г. Владыко, Ю.Г.Кабалдин, В.А. Соловьев, С.П. Черный// Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – С. 179-183.

25 Ягера, Р. Нечёткие множества и теория возможностей. Последние достижения / Р.Ягера. - М.: Радио и связь, 1986. – 176с.

26 Нечёткое управление системами автоматизированного электропривода. /В.А. Соловьев, А. Г. Владыко, В.И. Суздорф, С.П. Черный // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы докл. междунар. научно-техн. конф. – Томск. – 2001. – С. 79 –80.

27 Орловский, С.А. Проблемы принятия решений при нечёткой информации. – М.:Наука, 1981. – 206 с.

28 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. – 55 – 59.

29 Соловьев, В.А. Применение мягких вычислений к построению моделей нелинейных систем / В.А. Соловьев, А.Г. Владыко // Нелинейные науки на рубеже тысячелетий: Материалы междунар. Научной конф. – С.Петербург, 1999. - 67с.

30 Макарова, И.М. Теория выбора и принятия решений. / И.М. Макарова. – М.: Наука, 1982. – 327 с.

31 Гудим, А.С. Нечеткие алгоритмы компенсации нелинейностей САУ/ А.С. Гудим, В.А. Соловьев, И.В. Зайченко – АмГУ: Информатика и системы управления , 2009. – 74с.

32 Гурецкий, Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Х. Гурецкий. - М.: Машиностроение, 1974 - 328 с.