

Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ) - отделение автоматизации и робототехники

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы			
<b>Разработка и программная реализация нечеткого псевдолинейного регулятора</b>			
УДК 004.896:681.515:004.415.2			
Студент			
Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Гончарова Наталья Александровна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

По разделу «Английский язык»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ ШБИП	Сидоренко Татьяна Валерьевна	к.п.н., доцент		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Гайворонский Сергей Анатольевич	к.т.н., доцент		

## Планируемые результаты освоения ООП

15.04.04 – Автоматизация технологических процессов и производств  
(Киберфизическая автоматизация технологических процессов и производств)

Код компетенции	Наименование компетенции
<b>Универсальные компетенции</b>	
УК(У)-1	Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий
УК(У)-2	Способен управлять проектом на всех этапах его жизненного цикла
УК(У)-3	Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной цели
УК(У)-4	Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном (-ых) языке (-ах), для академического и профессионального взаимодействия
УК(У)-5	Способен анализировать и учитывать разнообразие культур в процессе межкультурного взаимодействия
УК(У)-6	Способен определять и реализовывать приоритеты собственной
<b>Общепрофессиональные компетенции</b>	
ОПК(У)-1	Способен формулировать цели и задачи исследования, самостоятельно изучать научно-техническую документацию своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-2	Способен определить математическую и техническую сущность задач и провести их качественно-количественный анализ
ОПК(У)-3	Способен на основании статистических методов участвовать в проведении корректирующих и превентивных мероприятий, направленных на улучшение качества, интерпретировать и представлять результаты
ОПК(У)-4	Способен анализировать полученные результаты измерений на основе их физической природы и принимать обоснованные решения в области профессиональной деятельности
<b>Профессиональные компетенции выпускников</b>	
ПК(У)-1	Обладает способностью разрабатывать технические задания на модернизацию и автоматизацию действующих производственных и технологических процессов и производств, технических средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытаний, новые виды продукции, автоматизированные и автоматические технологии ее производства, средства и системы автоматизации, управления процессами, жизненным циклом продукции и ее качеством;
ПК(У)-2	Обладает способностью проводить патентные исследования с целью обеспечения патентной чистоты и патентоспособности новых проектных решений и определения показателей технического уровня проектируемой продукции, автоматизированных и автоматических технологических процессов и производств, средств их технического и аппаратно-программного обеспечения;

ПК(У)-3	Обладает способностью: составлять описание принципов действия и конструкции устройств, проектируемых технических средств и систем автоматизации, управления, контроля, диагностики и испытаний технологических процессов и производств общепромышленного и специального назначения для различных отраслей национального хозяйства, проектировать их архитектурно-программные комплексы;
ПК(У)-4	Обладает способностью разрабатывать эскизные, технические и рабочие проекты автоматизированных и автоматических производств различного технологического и отраслевого назначения, технических средств и систем автоматизации управления, контроля, диагностики и испытаний, систем управления жизненным циклом продукции и ее качеством с использованием современных средств автоматизации проектирования, отечественного и зарубежного опыта разработки
ПК(У)-5	Обладает способностью разрабатывать функциональную, логическую и техническую организацию автоматизированных и автоматических производств, их элементов, технического, алгоритмического и программного обеспечения на базе современных методов, средств и технологий проектирования;

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) - отделение автоматизации и робототехники  
 Период выполнения весенний семестр 2020 /2021 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН**  
**выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	08.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	<i>Основная часть</i>	<i>60</i>
	<i>Финансовый менеджмент</i>	<i>15</i>
	<i>Социальная ответственность</i>	<i>10</i>
	<i>Обязательное приложение на иностранном языке</i>	<i>15</i>

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	к.т.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Гайворонский Сергей Анатольевич	к.т.н., доцент		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки 15.04.04 Автоматизация технологических процессов и производств  
 Отделение школы (НОЦ) - отделение автоматизации и робототехники

**УТВЕРЖДАЮ:**  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Гайворонский С.А.  
 (Подпись)    (дата)    (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич

Тема работы:

Разработка и программная реализация нечеткого псевдолинейного регулятора	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 50-14/с от 19.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

	08.06.2021
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объектом исследования и проектирования является нечеткое псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением. Корректирующее устройство должно быть смоделировано в среде Matlab и программно реализовано на программируемом логическом контроллере Simatic S7-300.
---------------------------------	--

<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Исследованию подлежат существующие корректирующие устройства и принцип их построения, свойства псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением и системы с его применением. Должна быть осуществлена его программная реализация на контроллере Simatic S7-300.
---	---

<b>Перечень графического материала</b>	
--	--

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность, и ресурсосбережение	Гончарова Наталья Александровна
Социальная ответственность	Сечин Андрей Александрович
Раздел ВКР, выполненный на английском языке	Сидоренко Татьяна Валерьевна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8TM91	Веретехин Артем Валерьевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
<b>Уровень образования</b>	Магистратура	<b>Направление/специальность</b>	Автоматизация технологических процессов и производств

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Работа с информацией представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ</i>	<i>Дать характеристику существующих и потенциальных потребителей (покупателей) результатов ВКР, ожидаемых масштабов их использования</i>
2. <i>Разработка устава научно-технического проекта</i>	<i>Разработать проект такого устава в случае, если для реализации результатов ВКР необходимо создание отдельной организации или отдельного структурного подразделения внутри существующей организации</i>
3. <i>Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i>	<i>Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет цены результата ВКР.</i>
4. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	<i>Оценка экономической эффективности использования результатов ВКР, характеристика других видов эффекта</i>

**Перечень графического материала**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. «Портрет» потребителя результатов НТИ</li> <li>2. Сегментирование рынка</li> <li>3. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>4. Диаграмма FAST</li> <li>5. График проведения и бюджет НТИ</li> <li>6. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</li> </ol>
--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН ШБИП	Гончарова Н.А.	К.Э.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>ОАР</b>
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Автоматизация технологических процессов и производств

Тема ВКР:

<b>Разработка и программная реализация нечеткого псевдолинейного регулятора</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<i>Объектом исследования является псевдолинейный регулятор. Область применения: внедрение метода настройки регулятора в промышленных масштабах</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018).</li> <li>2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ.</li> <li>3. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ.</li> <li>4. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ.</li> <li>5. ГОСТ Р 50923-96.</li> <li>6. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ.</li> <li>7. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.</li> <li>8. ГОСТ 21889-76.</li> <li>9. ГОСТ Р ИСО 6385-2016.</li> </ol>
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Анализ выявленных вредных факторов: - повышенный или пониженный уровень влажности воздуха, температуры регламентирован ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ; - недостаточная освещенность рабочей зоны регулируется СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03; - повышенная напряжённость электрического поля регулируется ГОСТ 12.1.019-85; - повышенный уровень шума регламентирован ГОСТ 12.1.003-83 9; Анализ выявленных опасных факторов: - электрический ток (источником является ЭВМ)
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	При выполнении работы влияние

	на атмосферу, литосферу и гидросферу не происходит, т.к. все работы производятся в лабораторном помещении на ЭВМ
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	В рабочем помещении возможно ЧС техногенного характера – пожар (возгорание) регламентировано ГОСТ Р 22.0.02-94.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ООД ШБИП	Сечин Андрей Александрович	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич		

## Реферат

Выпускная квалификационная работа выполнена на 146 с., содержит 75 рисунков, 10 таблиц, 34 источника, 6 приложений.

Ключевые слова: нечеткая логика, псевдолинейное корректирующее устройство, ПИД – регулятор, программный пакет MATLAB, программный пакет STEP7, контроллер SIMATIC S7-300.

Объектом исследования является нечеткое псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением.

Цель работы – провести синтез нечеткого корректирующего устройства с фазовым опережением в программном пакете MATLAB, после чего программно реализовать в пакете STEP7 для контроллера Simatic S7-300.

В рамках выполнения работы было выполнено проведение литературного обзора источников и информации, касающихся основных классов корректирующих устройств, произведен синтез блока нечеткой логики для подстройки параметров псевдолинейного корректирующего устройства и реализована программа в контроллере Simatic S7-300 для практического применения корректирующего устройства в объекте управления второго порядка.

## Обозначения и сокращения

В данной работе используются следующие обозначения и сокращения:

**ПЛК** – программируемый логический контроллер;

**АСУ ТП** – автоматизированная система управления технологическим процессом;

**КУ** – корректирующее устройство;

**ЛКУ** – линейное корректирующее устройство;

**НКУ** – нелинейное корректирующее устройство;

**ПКУ** – псевдолинейное корректирующее устройство;

**ОУ** – объект управления;

**САР** – система автоматического регулирования;

**САУ** – система автоматического управления;

**ПО** – программное обеспечение;

**АЧХ** – амплитудно-частотная характеристика;

**ФЧХ** – фазо – частотная характеристика;

**ПИД-регулятор** – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор.

## Содержание

Введение.....	15
1 Аналитический обзор корректирующих устройств.....	17
1.1 Устройства линейной коррекции .....	17
1.2 Устройства нелинейной коррекции .....	19
1.3 Псевдолинейные корректирующие устройства.....	20
1.3.1 Корректирующее устройство с амплитудным подавлением	21
1.3.2 Двухканальное корректирующее устройство .....	22
1.3.3 Корректирующее устройство с запоминанием экстремума..	22
1.3.4 Корректирующее устройство с фазовым опережением .....	23
2 Нечеткие множества, логика и их теоретические основы. Структура систем автоматического регулирования с нечеткими регуляторами .....	24
2.1 Нечеткое множества, его основные свойства и характеристики	25
2.2 Лингвистические переменные и нечеткие числа.....	27
2.3 Нечеткая логика и ее основные свойства (нечеткие выводы)....	30
2.4 Структуры систем автоматического регулирования с нечеткими регуляторами и математический аппарат их описания.....	33
3 Исследование и синтез псевдолинейного КУ в среде Matlab.....	35
3.1 Исследование свойств корректирующего устройства с фазовым опережением .....	35
3.2 Моделирование в среде MatLab работы ПКУ с фазовым опережением .....	39
4 Программная реализация псевдолинейного корректирующего устройства на контроллере Simatic S7-300.....	62
4.1 Состав контроллера SIMATIC S7-300 .....	62
4.2 Программный пакет Simatic WinCC .....	63
4.3 Программная реализация нечеткого псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением в пакете STEP7 .....	66
4.3.1 Блок передаточной функции КУ .....	69

4.3.2	Блок передаточной функции ОУ .....	73
4.3.3	Блок определения знака сигнала .....	73
4.3.4	Блок фазового КУ .....	74
4.3.5	Блок вычисления интеграла.....	76
4.3.6	Блок ПИД-регулирования.....	78
4.3.7	Блок переключателя .....	79
4.3.8	Блок кусочно-линейной функции .....	79
4.3.9	Блок нечеткой логики.....	80
4.3.10	Блок вычисления интегральной квадратичной ошибки .....	81
4.4	Разработка панели визуализации процесса в Simatic WinCC .....	82
5	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	85
5.1	Организация и планирование работ.....	85
5.1.1	Определение продолжительности этапов работ.....	86
5.2	Составление сметы затрат на разработку проекта .....	89
5.2.1	Материалы и покупные изделия .....	90
5.2.2	Основная заработная плата.....	90
5.2.3	Дополнительная заработная плата.....	91
5.2.4	Расходы на оборудование для выполнения работ.....	92
5.2.5	Расчет амортизационных расходов.....	93
5.2.6	Прочие прямые расходы .....	93
5.2.7	Расчет общей себестоимости разработки.....	94
5.2.8	Прибыль.....	94
5.2.9	НДС .....	94
5.2.10	Цена разработки НИР .....	94
5.3	Оценка экономической эффективности проекта.....	95
6	Социальная ответственность.....	96
6.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	96

6.2	Производственная безопасность .....	98
6.2.1	Отклонение показателей микроклимата .....	99
6.2.2	Превышение уровня шума .....	100
6.2.3	Освещение .....	101
6.2.4	Психические и физические перегрузки .....	102
6.2.5	Электробезопасность .....	103
6.3	Экологическая безопасность .....	104
6.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	105
	Вывод по разделу «Социальная ответственность» .....	106
	Заключение .....	108
	The conclusion .....	110
	Список литературы .....	111
	Приложение А (обязательное) Функциональный блок передаточной функции объекта управления .....	115
	Приложение Б (обязательное) Листинг функционального блока ПИД – регулятора .....	119
	Приложение В (обязательное) Листинг функционального блока переключателя .....	122
	Приложение Г (обязательное) Листинг функционального блока кусочно-линейных функций .....	125
	Приложение Д (обязательное) Листинг функционального блока нечеткой логики .....	129
	Приложение Е (справочное) Analytic review of existing corrective devices .....	139

## Введение

В настоящее время одним из главных вопросов проектирования систем автоматического регулирования (САР) является проектирование структурной схемы, обеспечивающей высокие показатели качества регулирования – точность и быстродействие.

На данный момент в промышленной области распространено ПИД-регулирование. Это объясняется его простотой, относительной дешевизной и эффективностью при управлении в линейных системах. Однако эффективность обеспечивается только в объектах управления со статическими параметрами. Если для системы неизвестно точное описание математической модели или имеются неопределенности, то качество регулирования значительно падает.

В целях повышения качества регулирования в таких системах используются корректирующие устройства, которые обеспечивают изменение характеристик с учетом предъявляемых требований. Корректирующие устройства добавляются в САР с целью обеспечения необходимого запаса устойчивости, повышения точности и улучшения качества переходного процесса в целом.

Можно выделить несколько групп корректирующих устройств: линейные, нелинейные, псевдолинейные. Наибольшее распространение получили линейные корректирующие устройства, но в последнее время применение нелинейных корректирующих устройств, реализующих нелинейные законы управления, набирает все больший размах. Во многих случаях данные устройства позволяют значительно улучшить свойства систем управления, а в некоторых являются единственным способом достичь необходимых свойств системы.

Однако даже такие устройства не всегда удовлетворяют предъявляемым требованиям – при разработке систем управления чаще всего предполагается, что параметры объекта управления, а так же характер воздействия на систему неизменны или изменяются незначительно. В случае если при каких-либо

обстоятельствах произошло значительное изменение данных показателей, процесс управления может значительно отклониться от расчетного, что приводит к ухудшению качества регулирования. Именно поэтому в последнее время наблюдается тренд на замену традиционных регуляторов адаптивными, основанными на методах нечеткой логики. Такие регуляторы являются более сложными в разработке и настройке, но могут обеспечить необходимое качество регулирования в условиях нестационарности объекта управления.

Данная выпускная квалификационная работа посвящена псевдолинейному корректирующему устройству и в частности его нечеткому исполнению. В рамках работы рассмотрено их исследование, синтез и программная реализация в пакете STEP7 для контроллера SIMATIC S7-300.

## **1 Аналитический обзор корректирующих устройств**

Для систем автоматического регулирования и управления, структура которых включает в себя только базовые функциональные элементы, направленные на реализацию определенного закона регулирования является характерным меньшее значение ошибки регулирования. Но в то же время такие системы зачастую не позволяют достичь заданных качественных показателей. Именно в таких случаях целесообразно использовать методы коррекции системы для изменения ее частотных характеристик в целях улучшения качественных показателей [1].

Устройство коррекции может быть представлено в виде корректирующего элемента, имеющего определенную передаточную функцию, добавление которого в качестве дополнительного звена может изменить свойства системы.

Главной целью использования КУ является улучшение качественных показателей процесса управления. В данном случае под этим понимается повышение качественных показателей и точности управления, изменение свойств динамики, что позволяет получить выигрыш в быстродействии и запасе устойчивости.

Можно выделить в качестве основных типов КУ, применяемых в системах автоматического регулирования линейные КУ и нелинейные КУ. В самом распространенном исполнении они являются линейными или нелинейными фильтрами, включенными в прямую цепь (последовательно) или в цепь обратной связи (параллельно), либо комбинированные устройства с одновременным последовательным и параллельным включением. [2].

### **1.1 Устройства линейной коррекции**

На текущий момент довольно распространено использование линейных корректирующих устройств. Они обладают как преимуществами, основное из которых это простота реализации, так и недостатками – ограниченность возможностей коррекции для повышения качественных показателей системы.

При синтезе ЛКУ используется две основных методики. Первая – ввод в систему корректирующих звеньев определенного класса, который выбирается в зависимости от желаемого результата. Перечислим некоторые из подобных звеньев:

- интегрирующее звено первого порядка, повышающее степень астатизма, что ведет к улучшению точности управления;
- пропорционально-дифференцирующее и интегро-дифференцирующее звенья, повышающие запасы устойчивости системы;
- апериодическое звено, являющееся высокочастотным фильтром.

Другой подход заключается в построении и анализе желаемых частотных характеристик. При данном подходе можно заранее определить частотные параметры КУ

Как было сказано выше, ЛКУ отличает простота реализации, вследствие чего они находят широкое применение во многих практических задачах. Но помимо достоинств ЛКУ обладают и своими недостатками, которые ограничивают их применение. Главным из них является жесткая зависимость амплитудной и фазовой частотной характеристик. Таким образом, при синтезе ЛКУ всегда велик риск при приведении одной из характеристик к целевому виду, получить нежелательный вид другой характеристики. Примером является синтез дифференцирующих цепей с фазовым опережением. В этом случае при создании положительного одновременно ослабляется область нижних частот, являющаяся несущей для полезного сигнала. И наоборот: интегрирующие звенья производящие ослабление высокочастотного спектра сигнала, создают отрицательный сдвиг по фазе (запаздывание), что также оказывает негативное влияние на качество переходного процесса [3].

Идеальной ситуацией при применении корректирующих устройств является комбинирование положительных свойств дифференцирующих и интегрирующих цепей и исключение их недостатков. Такая задача может быть решена с помощью нелинейных корректирующих устройств.

## 1.2 Устройства нелинейной коррекции

Необходимые динамические качества системы и компенсация влияния, вызванного ее нелинейностями, могут быть получены при вводе в систему нелинейных корректирующих устройств.

Добавление в структуру системы нелинейных корректирующих устройств позволяет получить практически неизменяемые запасы устойчивости и качественные показатели в нестационарных системах. Такие устройства могут быть представлены как нелинейные четырехполюсники с последовательным и параллельным включением, нелинейные закономерности, нелинейные КУ, переключающие КУ [4].

Так как линейная коррекция является одним из частных случаев нелинейной коррекции, то последняя может рассматриваться как более общее корректирующее средство. Системы с оптимальными параметрами по быстродействию могут быть построены только с применением средств нелинейной коррекции, решающих вопрос компенсации негативного влияния естественных нелинейностей на процесс управления.

Однако стоит учитывать что, методы нелинейной коррекции не являются идеальными и так же имеют ограничивающие применение факторы. Одним из них является узкая направленность относительно внешних воздействий: нелинейный корректор, синтезированный для работы при определенных классах внешнего воздействия, при других воздействиях в лучшем случае может быть малоэффективен, а в худшем и понизить качественные показатели регулирования [5].

Остановимся подробно на каждом классе нелинейных КУ:

1. Четырехполюсные звенья последовательного и параллельного подключения. К этому классу можно отнести нелинейные КУ, псевдолинейные КУ и комбинированные КУ. Псевдолинейные КУ будут подробно рассмотрены ниже. Самыми распространенными схемами синтеза нелинейных КУ являются либо добавление корректирующего устройство в прямую цепь системы, либо в

цепь обратной связи. Комбинированные КУ получаются путем объединения нелинейных и псевдолинейных КУ.

2. Нелинейные законы управления - группа корректирующих устройств, в которую входят следующие законы:

- нелинейные функциональные законы управления обеспечивают компенсацию воздействия нелинейностей повышение устойчивости и качества работы систем автоматического управления и записываются в виде функциональных зависимостей от абсолютного значения и производных входного сигнала;

- законы логического управления при помощи которых можно изменять как структуру системы в целом, так и отдельные элементы и их параметры. Логические блоки являются основной формой записи данных законов;

- оптимизирующие законы позволяют на заданном уровне поддерживать максимум или минимум в течение всего процесса регулирования. Форма реализации – переключающие блоки и блоки умножения;

- параметрические законы при помощи которых можно реализовать процесс управления на базе отклонений от закона и программы, заданной заранее.

3. В САУ с самонастройкой применяются нелинейные корректирующие устройства с использованием элементов неизменяемой части САУ [6].

### **1.3 Псевдолинейные корректирующие устройства**

Псевдолинейные КУ – устройства, в которых зависимость эквивалентных амплитудных и фазовых характеристик определяется только частотой входного сигнала. Независимость амплитудной и фазовой характеристик также является одним из характерных признаков, из которого вытекает одно из главных достоинств псевдолинейных устройств –

возможность независимой корректировки амплитудных и фазовых характеристик, что невозможно сделать линейными средствами, что обеспечивает большую свободу действия для эксперта, проводящего синтез частотных характеристик САУ [7].

Линейные фильтры, вносящие фазовые сдвиг (положительный или отрицательный) и математические блоки основных операций являются главными элементами ПКУ. ПКУ могут включать в себя двухканальные и трехканальные нелинейные фильтры, с обособленными каналами для амплитуды и фазы. Произведение канальных сигналов является выходом системы.

Ниже представлены псевдолинейные КУ, наиболее применяемые в системах автоматического управления:

- КУ с амплитудным подавлением;
- КУ с фазовым опережением;
- Амплитудно-фазовое КУ с отдельными каналами;
- КУ с возможностью запоминания экстремума.

Далее будет рассмотрено каждое из представленных выше корректирующих устройств.

### 1.3.1 Корректирующее устройство с амплитудным подавлением

При работе данного КУ при возрастании частоты наблюдается амплитудное подавление и постоянное значение фазового сигнала. Структурная схема ПКУ представлена на рисунке 1.

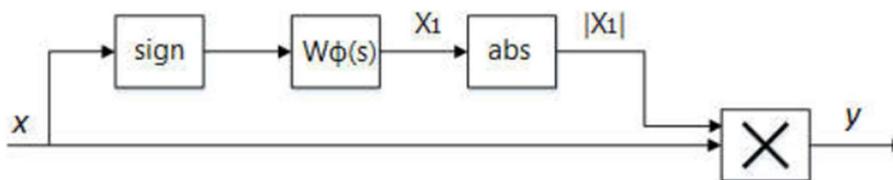


Рисунок 1 – Структура ПКУ с амплитудным подавлением

### 1.3.2 Двухканальное корректирующее устройство

В двухканальном корректирующем устройстве происходит совмещение КУ с фазовым опережением и амплитудно-подавляющего КУ, работающих в параллельных каналах. Структурная схема ПКУ представлена на рисунке 2.

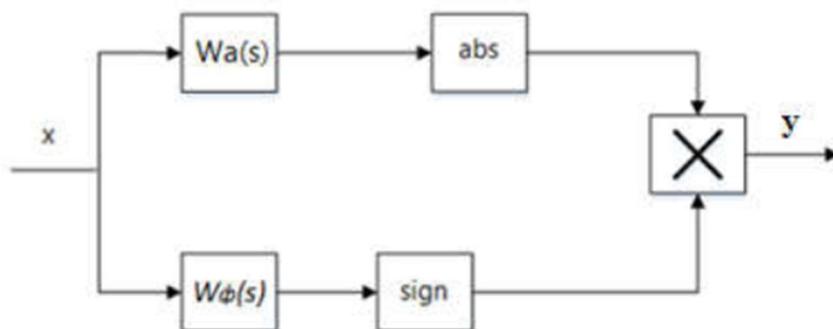


Рисунок 2 – Структура двухканального ПКУ

### 1.3.3 Корректирующее устройство с запоминанием экстремума

Представим состав данного КУ:

- блок масштабирования (МСШ) – при прохождении сигнала через данный блок происходит его усиление;
- блок пикового детектора (ПД) – при прохождении сигнала через данный блок происходит запоминание его экстремума;
- нуль орган (НО) – при равенстве входного сигнала нулю обеспечивает сброс пикового детектора;
- sign – блок, определяющий знак входного сигнала;
- abs – блок вычисления модуля от входного сигнала.

Структурная схема представлена на рисунке 3.

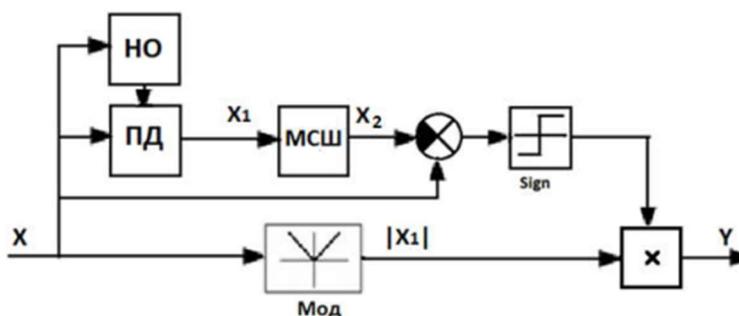


Рисунок 3 – Структурная схема ПКУ с запоминанием экстремума

### 1.3.4 Корректирующее устройство с фазовым опережением

Корректирующее устройство с фазовым опережением обеспечивает получения фазового опережения без влияния на амплитуду сигнала. Схема данного корректирующего устройства представлена на рисунке 4.

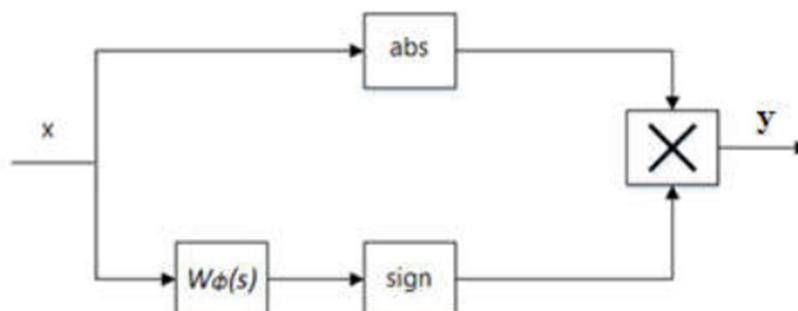


Рисунок 4 – Структурная схема ПКУ с фазовым опережением

Характерная особенность псевдолинейного КУ с фазовым опережением – взаимная независимость частотных характеристик корректирующего устройства и амплитуды входного сигнала. Принцип работы можно понять на примере структурной схемы и заключается он в следующем: в оба канала поступает сигнал, подающийся на вход в КУ. Сигнал в верхнем канале проходит преобразования через блоки усиления (для данной структурной схемы коэффициент усиления равен 1) и модуля сигнала. Сигнал в нижнем канале преобразуется посредством интегродифференцирующего звена и блока определения знака сигнала. Выходом является умножение сигнала верхнего и нижнего канала [8].

Передаточная функция интегро-дифференцирующего звена примет вид:

$$W_{\phi}(s) = \frac{Ts + 1}{T_1s + 1}, \quad (1)$$

где  $T, T_1$  – постоянные времени.

## **2 Нечеткие множества, логика и их теоретические основы. Структура систем автоматического регулирования с нечеткими регуляторами**

Математическая теория нечетких множеств и нечеткая логика – обобщения классической формальной логики и теории множеств. Понятия были впервые применены американским ученым Лотфи Заде в 1965 г. Одной из основных предпосылок к появлению данной теории стало использования человеком приближенных и нечетких тезисов при описании различных объектов, систем и процессов.

С рождения теории нечетких множеств и до получения признания по всему миру прошло не одно десятилетие, однако можно выделить три основных периода становления нечетких систем.

Характерными признаками и тенденциями первого периода является развитие теории нечетких множеств. Второй период ознаменован первыми практическими успехами в области нечеткого регулирования и управления техническими системами. Так же началось изучение вопросов по построению экспертных систем и нечетких контроллеров, в основе которых лежала бы нечеткая логика.

Начало третьего периода во второй половине 80-х годов, который продолжается по сей день, связано с разработкой первых программных пакетов для проектирования аппарата нечеткой логики, а также с первыми успехами ее использования в прикладных задачах.

Триумф и развитие по всему миру нечеткая логика получила именно на третьем периоде, после доказательства теоремы FAT (Fuzzy Approximation Theorem) Бартоломеем Коско. В настоящее время данная технология также переживает период активного развития и исследования, что связано с развитием вычислительной мощности современных технических устройств.

Применительно к данной исследовательской работе аппарат управления на нечеткой логике основан на комплексе правил, представляющих собой определенные предпосылки, описывающие работу регулятора в зависимости от

входных воздействий. Правила разрабатываются на основе исследовательской оценки объекта и системы управления и базы знаний, полученной и составленной «экспертом» на основе данного исследования.

## 2.1 Нечеткое множества, его основные свойства и характеристики

Множество - группа элементов, связанных неким общим признаком. Ключевой особенностью является то, что можно однозначно определить принадлежность элемента множеству.

Тем не менее, опыт прикладного применения показывает, что такой принцип в большинстве малоприменим к реальным системам, так как неоправданно идеализирует их математическое описание и не является достаточно гибким, чтобы описывать присущие всем реальным системам элементы неопределенности.

Основной предпосылкой, на которой базируется определение нечеткого множества является тот факт, что любой элемент лишь в определенной степени принадлежит этому множеству. Эта степень обычно определяется значением некоторого числа из диапазона  $[0,1]$ , крайние границы которого являются абсолютными характеристиками принадлежности множеству.

Пусть  $E$  – универсальное множество,  $x$  – элемент  $E$ , а  $R$  – некоторое свойство. Обычное (четкое) подмножество  $A$  универсального множества  $E$ , элементы которого удовлетворяют свойству  $R$ , определяется как множество упорядоченных пар:

$$A = \{\mu_A(x)/x\}, \quad (2)$$

где  $\mu_A(x)$  - характеристическая функция, принимающая значение 1 или 0.

Если сравнивать между собой нечеткое и обычные множества, то их ключевое различие будет заключаться в том, что для элементов  $x$  из  $E$  невозможно дать определенный ответ относительно принадлежности свойству  $R$ . Поэтому определение нечеткого подмножества  $A$  универсального множества  $E$  представляется как множество сгруппированных пар:

$$A = \{\mu_A(x)/x\}, \quad (3)$$

где  $\mu_A(x)$ - характеристическая функция принадлежности (или просто функция принадлежности), которая принимает значения в определенном упорядоченном множестве  $M$ .

Функции принадлежности позволяют определить для элемента  $x$  степень принадлежности к подмножеству  $A$ . Множество  $M$  - множество принадлежностей. Нечеткое множество  $M$  может быть рассмотрено как четкое в случаях, когда элементами множества  $M$  являются только значения 0 и 1.

Примеры записи нечеткого множества:  $E = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ,  $M = [0;1]$ ,  $A$  – нечеткое множество для которого  $\mu_A(x_1) = 0.3$ ,  $\mu_A(x_2) = 0$ ,  $\mu_A(x_3) = 1$ ,  $\mu_A(x_4) = 0.5$ ,  $\mu_A(x_5) = 0.9$ .

Тогда  $A$  можно представить в виде:  $A = \{0.3/x_1; 0/x_2; 1/x_3; 0.5/x_4; 0.9/x_5\}$ .

Рассмотрим пример простейшего нечеткого множества.

Пусть  $E = \{\text{ЗАПОРОЖЕЦ, ЖИГУЛИ, МЕРСЕДЕС, ...}\}$  – множество марок автомобилей, а  $E = \{0, \infty\}$  - универсальное множество «Стоимость», тогда на  $E$  мы можем определить нечеткие множества типа «Для бедных», «Для среднего класса», «Престижные», с функциями принадлежности вида рисунке 5.

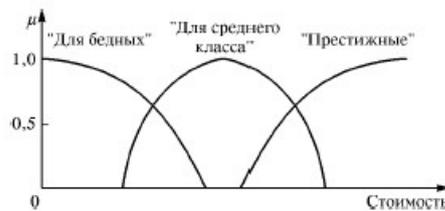


Рисунок 5 – Примеры функций принадлежности

Зная состав функций принадлежности и значение цен на автомобили из  $E$  на текущий момент, можно будет определить на  $E$  нечеткие множества с этими же названиями.

Так, например, нечеткое множество «Для бедных», заданное на универсальном множестве  $E = \{\text{ЗАПОРОЖЕЦ, ЖИГУЛИ, МЕРСЕДЕС, ...}\}$ , выглядит так, как показано на рисунке 6.

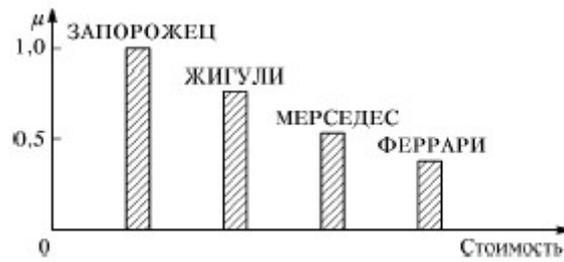


Рисунок 6 – Пример задания нечеткого множества

Аналогичным образом можно определить и нечеткие множества по другим признакам автомобилей (например множества «Скорость», «Вместительность», «Комфортабельность» и т.д.).

## 2.2 Лингвистические переменные и нечеткие числа

Научные исследования и опыт, полученные за последнее время наглядно продемонстрировали несостоятельность общепринятых способов анализа систем и моделирования на ЭВМ, фундаментом которых является точная обработка численных данных. Данный факт связан с тем, что такой подход не имеет достаточных ресурсов, чтобы описывать реальные технологические процессы ввиду их сложности, и подталкивает к мысли о том, что для качественного анализа поведения технологических процессов необходим переход от устоявшихся требования к точности измерений и детерминированности в пользу нового подхода.

Данный тренд также вызван появлением новых классов задач управления, одним из которых является класс, связанный с выбором оператором решений в контуре «человек – ЭВМ». Решение задачи взаимодействия в таких системах не представляется возможным без применения близких к естественному языков, которые способны описать нечеткие понятия, в близком и доступном для человека представлении. В связи с этим имеет целесообразность использования впервые введенного Л. Заде понятия лингвистической переменной, позволяющего с необходимой точностью передать словесную характеристику предметной области в случаях отсутствия ее детермированной характеристики. При этом необходимо

учитывать, что зачастую лингвистическое описание не проигрывает в информативности описанию детерминированному.

Лингвистической переменной (ЛП) называется набор  $(\beta, T, X, G, M)$ , где:

- $\beta$  - имя лингвистической переменной;
- $T$  – множество значений лингвистической переменной (терм-множество), которые представляют нечетких переменных, областью определения каждой из которых является множество  $X$ . Множество  $T$  называется базовое терм-множество лингвистической переменной;

- $G$  – синтаксическая процедура, которая позволяет проводить операции над элементами терм-множества  $T$ , в том числе, генерировать новые термы (значения). Множество  $T \cup G(T)$ , где  $G(T)$  – множество сгенерированных термов, называется расширенным терм-множеством лингвистической переменной;

- $M$  – семантическая процедура, которая позволяет преобразовать каждое новое значение лингвистической переменной, образуемое процедурой  $G$ , в нечеткую переменную, то есть сформировать соответствующее нечеткое множество.

Примером является определение экспертом веса выпускаемых изделий через понятия «Малый вес», «Средний вес» и «Большой вес», при этом минимальный вес равен 1 кг, а максимальный - 5 кг.

Формализация такого описания может быть проведена с помощью следующей лингвистической переменной  $(\beta; T; X; G; M)$ , где:

- $\beta$  - вес изделия;
- $T = \{\text{«Малый вес»}, \text{«Средний вес»}, \text{«Большой вес»}\}$ ;
- $X = [1; 5]$ ;
- $G$  – процедура образования новых термов с помощью связок «и», «или» и модификаторов типа «очень», «не», «слегка» и т. П. Например: «Малый или средний вес», «Очень малая толщина» и т. Д.;

- $M$  – процедура задания на  $X = [1; 5]$  нечетких подмножеств  $A_1$ =«Малый вес»,  $A_2$ = «Средний вес»,  $A_3$ =«Большой вес», а также нечетких множеств для термов из  $G(T)$  в соответствии с правилами трансляции нечетких связок и модификаторов «и», «или», «не», «очень», «слегка» и других операций над нечеткими множествами вида:  $A \cup B$ ,  $A \cap B$ ,  $\bar{A}$ ,  $CONA = A^2$ ,  $DILA = A^{0.5}$  и т.п.

Терм-множество и расширенное терм-множество в условиях примера можно характеризовать функциями принадлежности, приведенными на рисунках 7 и 8.

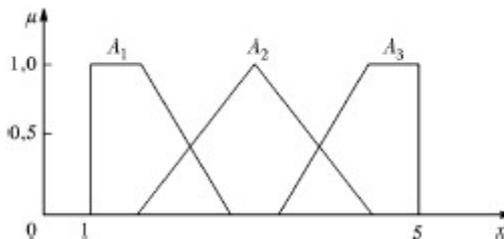


Рисунок 7 – Функции принадлежности нечетких множеств:  $A_1$ =«Малый вес»,  $A_2$ =«Средний вес»,  $A_3$ =«Большой вес»

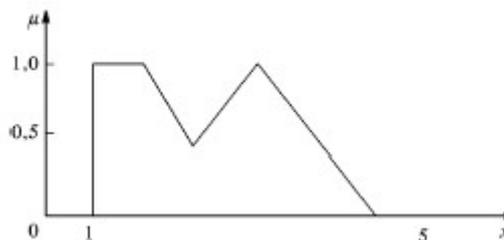


Рисунок 8 – Функции принадлежности нечеткого множества

$$A_1 \cup A_2 = \text{«Малый или средний вес»}$$

Рассмотрим более подробно определение и основные типы нечетких чисел.

Нечеткое число определяется как нечеткое множество  $A$  на множестве действительных чисел  $R$  с функцией принадлежности  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ , где  $x$  – действительное число, то есть  $x \in R$ .

Нечеткие числа (L-R)-типа – нечеткие числа, форма которых задается в специальном виде и строгом соответствии определенным правилам. Данный

класс нечетких чисел позволяет максимально упростить алгебраические операции при работе с ними.

Функции принадлежности нечетких чисел (L-R)-типа задаются с помощью невозрастающих на множестве неотрицательных действительных чисел функций действительного переменного  $L(x)$  и  $R(x)$ , удовлетворяющих условиям:

$$L(\leftrightarrow x) = L(x), R(\leftrightarrow x) = R(x), \quad (4)$$

$$L(0) = R(0). \quad (5)$$

К классу (L-R)-функций относятся функции, графики которых имеют вид, приведенный на рисунке 9.

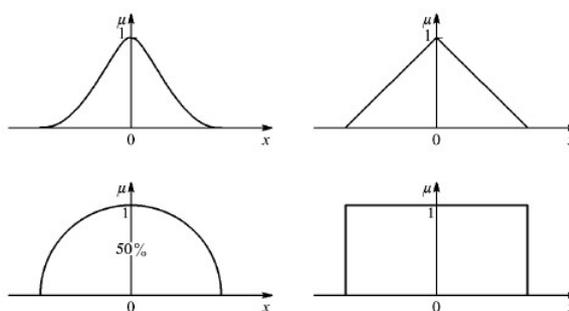


Рисунок 9 – Возможный вид (L-R)-функций

Примеры графиков функций принадлежности нечетких чисел (L-R)-типа приведены на рисунке 10.

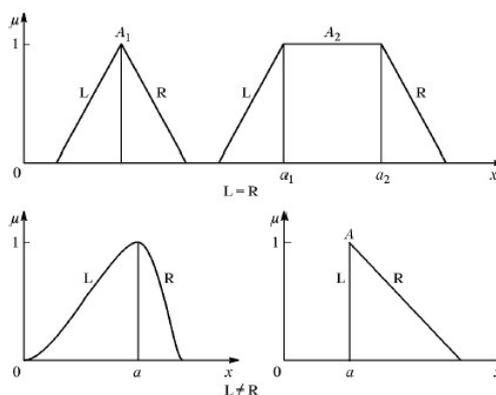


Рисунок 10 – Функции принадлежности нечетких чисел (L-R)-типа

### 2.3 Нечеткая логика и ее основные свойства (нечеткие выводы)

Согласно одному из определений логикой является аналитическая деятельность о методах и законах мышления. Первоочередной задачей такого

анализа является не содержательная часть доводов в каком-либо размышлении, а их характер и форма. Предметной областью логики является лишь вопрос о следствии каких-либо заключений из заданных предпосылок.

Одной из основных целей логики является систематизация и накопление базы знаний о правильных способах и методиках рассуждений. Механизмы логики позволяют работать с композицией высказываний (например, из простых составлять сложные и т.д.).

Фундаментом аппарата нечеткой логики, применяющегося в реальных системах управления является информационная база, которая составляется на основе экспертных исследований специалистов определенной области и представляется в виде предикатов:

П1: если  $x$  есть  $A_1$ , тогда  $y$  есть  $B_1$ ,

П2: если  $x$  есть  $A_2$ , тогда  $y$  есть  $B_2$ ,

.....

П $n$ : если  $x$  есть  $A_n$ , тогда  $y$  есть  $B_n$ ,

где  $x$  – переменная входа (имя для известных значений данных);

$y$  – выходная переменная (имя для значения данных, которое будет вычислено);

$A, B$  – функции принадлежности, определенные соответственно на  $x$  и  $y$ .

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

$$R = A \rightarrow B, \tag{6}$$

где « $\rightarrow$ » называют нечеткой импликацией.

Отношение  $R$  можно рассматривать как нечеткое подмножество прямого произведения  $X * Y$  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:

$$B' = A \circ R = A' \circ (A \rightarrow B), \tag{7}$$

где « $\circ$ » введенная выше операция свертки.

Операции композиции и импликации имеют разные варианты реализации в нечеткой алгебре, которые будут обеспечивать также и разный конечный результат, но если не вводить конкретику, то можно выделить четыре основных этапа логического вывода [16],[18]:

- нечеткость (введение нечеткости, фазификация, fuzzication). На основании входных четких переменных и по заранее сформированным функциям принадлежности вычисляется степень истинности всех предпосылок по всем правилам;

- логический вывод. Степени истинности с предыдущего этапа проецируются на каждое правило, что позволяет сформировать нечеткое множество, которое соответствует каждой предпосылке по каждому правилу. Наиболее распространенными правилами логического вывода обычно являются операции  $\min$  (минимум) – обрезание функции принадлежности по высоте, которая является степенью истинности предпосылки по данному правилу или  $\text{prod}$  (умножение) – масштабирование функции принадлежности вывода при помощи вычисленной степени истинности предпосылки правила;

- композиция. Нечеткие множества с предыдущего этапа объединяются и образуют единое нечеткое множество по каждой выходной переменной. Наиболее часто для подобного объединения используются операции  $\max$  (максимум) – формирование вывода нечеткого подмножества как поточечного максимума по всем нечетким подмножествам или  $\text{sum}$  (сумма) - формирование вывода нечеткого подмножества как поточечной суммы по всем нечетким подмножествам;

- дефаззификация - получение четкой переменной на основе нечеткого множества за счет методов приведения к четкости (алгоритмы Мамдани, Цукамото, Сугено).

## 2.4 Структуры систем автоматического регулирования с нечеткими регуляторами и математический аппарат их описания

Структура нечеткого регулятора представлена на рисунке 11.

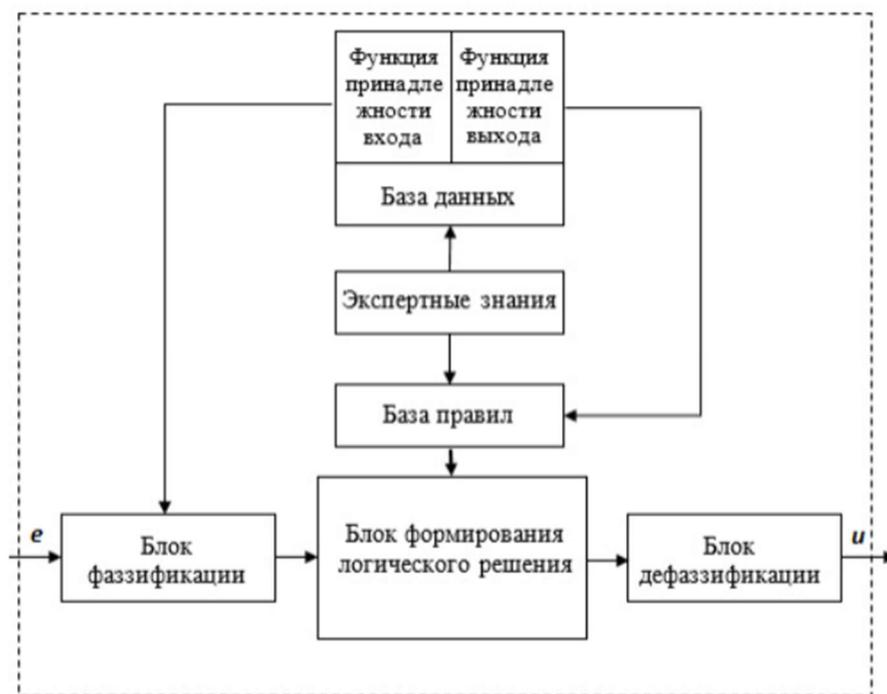


Рисунок 11 – Структурная схема нечеткого регулятора

Одной из основных задач исследователя при проектировании нечеткого регулятора – составление базы правил, где каждое предложение соответствует следующей структуре:

Если < предпосылка > ТО < вывод >.

Эксперт составляет базу знаний на основе эмпирических исследований, определяющих состав функций принадлежности для предпосылок  $\mu(e)$  и выводов  $\mu(u)$ . Таким образом, происходит синтез лингвистических правил, переменных и термов.

Следующий этап синтеза регулятора – фаззификация, в которой конкретные входные значения переводятся в термы. На данном этапе составляется соответствие между всеми входными значениями регулятора и значениями функций принадлежности.

После того как термы определены на основе существующей базы знаний можно выбирать значения, которые соответствуют входному воздействию.

Логическое решение формируется во время этапов агрегирования, активирования и аккумуляирования.

Этап агрегирования подразумевает определение степени истинности по всем правилам системы нечеткого ввода. Значения истинности по всем из подусловий системы нечеткого вывода  $B = \{b_i\}$  принимаются известными. Затем проводится анализ каждого правила нечеткой системы. Если нечеткое высказывание соответствует правилу:

ПРАВИЛО < # >: ЕСЛИ <<b1 есть a >>,

или

ПРАВИЛО < # >: ЕСЛИ << b1 есть V a >>,

где  $V$  соответствует высказыванию «Очень», «Менее» и т.д., то степень его истинности равна соответствующему значению  $b_i$ .

Процесс агрегирования считается завершенным, если все значения  $b_k$  определены для всех правил системы  $P$ . Множество решений обозначается через  $B - \{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ .

Следующий этап – активизация заключения, состоит в определении истинности для всех подзаключений правил. Представляет собой ту же суть, что и агрегация, но для подзаключений.

Последний этап – аккумуляция – заключается в нахождении итоговых значений функций принадлежности для всех выходных лингвистических переменных множества. На данном этапе происходит разграничение подзаключений одинаковых переменных, которые принадлежат разным правилам системы. По каждому из правил осуществляется вычисление значения функции принадлежности, после которого выполняется этап дефаззификации с переходом от полученных значений лингвистических переменных к конкретным значениям для каждой из выходных лингвистических переменных. Работу нечеткого регулятора можно считать завершенной, в том случае когда по всем выходным лингвистическим переменным определено конкретное значение для управляющего регулирующего воздействия.

### 3 Исследование и синтез псевдолинейного КУ в среде Matlab

#### 3.1 Исследование свойств корректирующего устройства с фазовым опережением

В рамках работы корректирующим устройством системы автоматического управления было выбрано псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением. Как было сказано ранее, главной особенностью данного звена является независимость частотных характеристик от величины амплитуды сигнала на входе, что позволяет отнести его к классу псевдолинейных [3].

Смена сигнатуры коэффициента усиления происходит в момент, который задается на характеристике точкой  $C_1$ , в свою очередь связанной с углом фазового опережения  $\alpha$  соотношением:

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \sin \alpha . \quad (8)$$

Точка  $C_2$  связана с амплитудой входного сигнала  $x = A \sin \omega t$ , откуда следует, что  $OC_2 = A$ . При возрастании угла фазового опережения происходит сближение точек  $C_1$  и  $C_2$ , а полное слияние происходит на частоте  $\frac{\pi}{2}$ . При дальнейшем возрастании  $\alpha$  от  $\frac{\pi}{2}$  до  $\pi$ , положение точки  $C_1$  начинает определяться соотношением:

$$\frac{OC_1}{OC_2} = \cos \alpha . \quad (9)$$

Характеристика нелинейности при постоянных параметрах линейного фильтра фазового канала зависит от частоты  $\omega$ .

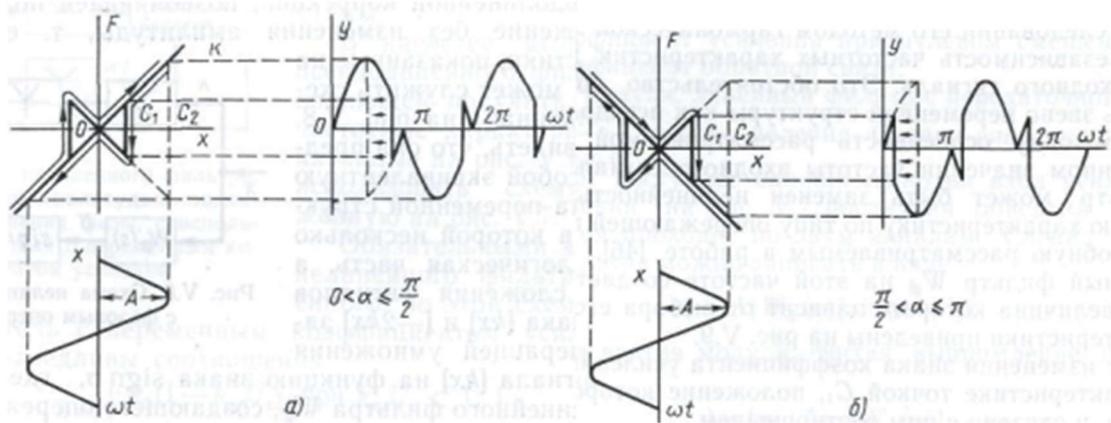


Рисунок 12 – Нелинейные характеристики: а – при фазовом опережении до 90°;  
 б – при фазовом опережении от 90° до 180°

Рассмотрим эквивалентную амплитудно-фазовую характеристику корректирующего устройства, полученную через гармоническую линеаризацию:

$$J(A, \omega) = a(A, \omega) + jb(A, \omega), \quad (10)$$

где  $a(A, \omega)$ ,  $b(A, \omega)$  – коэффициенты гармонической линеаризации, в общем случае зависящие от амплитуды и частоты входного сигнала.

Данное выражение может быть представлено в виде:

$$J(A, \omega) = q(A, \omega)e^{j\mu(A, \omega)}, \quad (11)$$

где  $q(A, \omega)$  – эквивалентная амплитудная характеристика нелинейного звена:

$$q(A, \omega) = \sqrt{[a(A, \omega)]^2 + [b(A, \omega)]^2}. \quad (12)$$

$\mu(A, \omega)$  – эквивалентная фазовая характеристика нелинейного звена может быть представлена в виде:

$$\mu(A, \omega) = \arctg \frac{b(A, \omega)}{a(A, \omega)}. \quad (13)$$

Коэффициенты гармонической линеаризации корректирующего устройства определяются по формулам:

$$a = \frac{2}{\pi * A} \int_0^\pi F(A \sin(\omega t)) * \sin(\omega t) d(\omega t). \quad (14)$$

$$b = \frac{2}{\pi * A} \int_0^\pi F(A \sin(\omega t)) * \cos(\omega t) d(\omega t). \quad (15)$$

Если в схеме используется линейный фильтр с передаточной функцией:

$$W_{\Phi}(s) = \frac{T_1}{T} * \frac{Ts + 1}{T_1s + 1}. \quad (16)$$

то создаваемое им опережение  $\alpha$  будет определяться выражением:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{\omega T(1 - \nu)}{1 + \omega^2 T^2 \nu}, \quad (17)$$

где через  $\nu$  обозначено отношение  $T_1/T$ .

Тогда коэффициенты  $a$  и  $b$  будут равны:

$$a = \frac{k}{\pi} (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha), \quad (18)$$

$$b = \frac{k}{\pi} (1 - \cos 2\alpha). \quad (19)$$

Амплитудно-частотная характеристика системы равна:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}, \quad (20)$$

а фазово-частотная характеристика системы:

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} W(j\omega) = \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}, \quad (21)$$

В программном пакете MathCad было произведено построение АЧХ и ФЧХ псевдолинейного корректирующего устройства при различных значениях параметра  $T$  передаточной функции линейного фильтра. Характеристики представлены на рисунках 13 и 14.

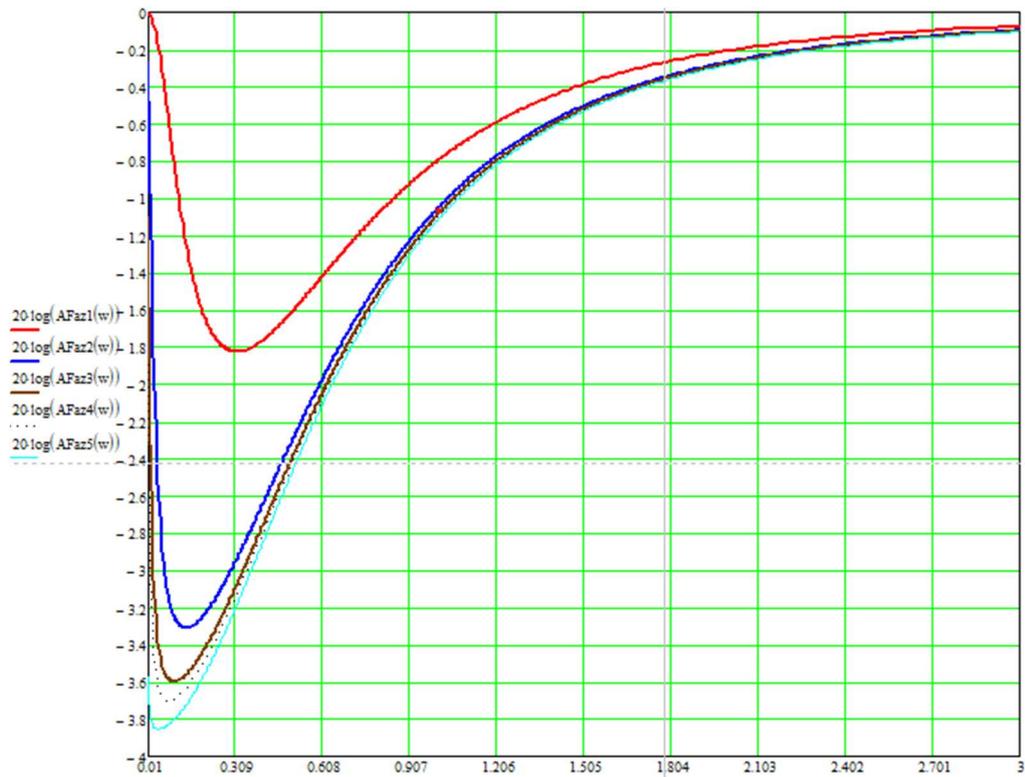


Рисунок 13 – Семейство АЧХ псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением

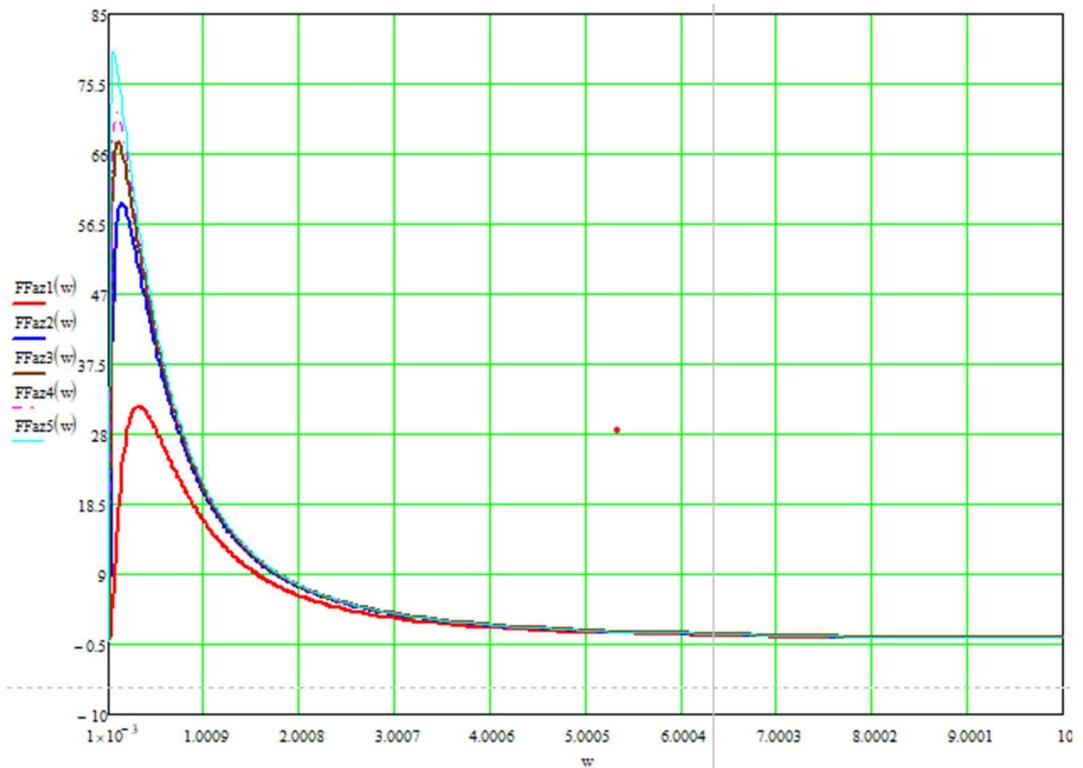


Рисунок 14 – Семейство ФЧХ псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением

### 3.2 Моделирование в среде MatLab работы ПКУ с фазовым опережением

Для исследования был выбран объект управления второго порядка. Передаточная функция данного объекта представлена на рисунке 15.

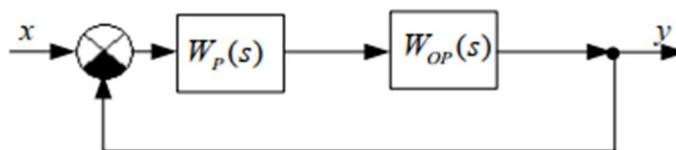


Рисунок 15 – Система с ОУ второго порядка

Передаточная функция объекта управления:

$$W_{OP}(s) = \frac{K_0}{T_1^2 s^2 + T_2 s + 1} \quad (22)$$

где  $K_0$  – статический коэффициент передачи ОУ;  
 $T_2, T_1$  – постоянные времени.

Параметры данного объекта управления были взяты значения:  $K_0 = 8$ ;  $T_1 = 10$ ;  $T_2 = 6$ .

Далее была произведена ручная настройка ПИД-регулятора. При наличии базовых теоретических знаний о работе данного регулятора в целом и каждой из его составляющих можно постепенно добиться оптимальной настройки при которой достигается необходимое качество регулирования. Как правило первой настраивается пропорциональная составляющая которая позволяет вывести процесс регулирования на необходимую уставку. Однако следует учитывать, что она не обеспечивает полного устранения статической ошибки. Именно поэтому следующей настраивается интегральная составляющая, которая позволяет регулятору со временем учесть статическую ошибку и полностью исключить. В последнюю очередь настраивается дифференциальная составляющая, которая оказывает противодействие дальнейшим отклонением от целевого значения. Процесс настройки может быть значительно упрощен при условии знания экспертом основных правил,

которые были получены путем аналитики и эмпирических исследований ПИД-регулятора. Приведем их ниже:

- увеличение коэффициента пропорциональности увеличивает быстродействие и снижает запасы устойчивости;
- с понижением интегральной составляющей ошибка регулирования в течение времени также уменьшается быстрее;
- уменьшение величины постоянной интегрирования уменьшает запасы устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей повышает запасы устойчивости и быстродействие.

Представленные правила могут быть применены как для обычных, так и для нечетких ПИД-регуляторов.

Итоговые параметры ПИД-регулятора приняты равными:  $K_p = 15$ ;  $K_i = 0.2$ ;  $K_d = 1$ .

В Matlab Simulink была собрана схема, моделирующая работу ПКУ. Схема состоит из двух частей: САР с объектом второго порядка без применения корректирующего устройства, САР с объектом второго порядка и КУ. Схема представлена на рисунке 16.

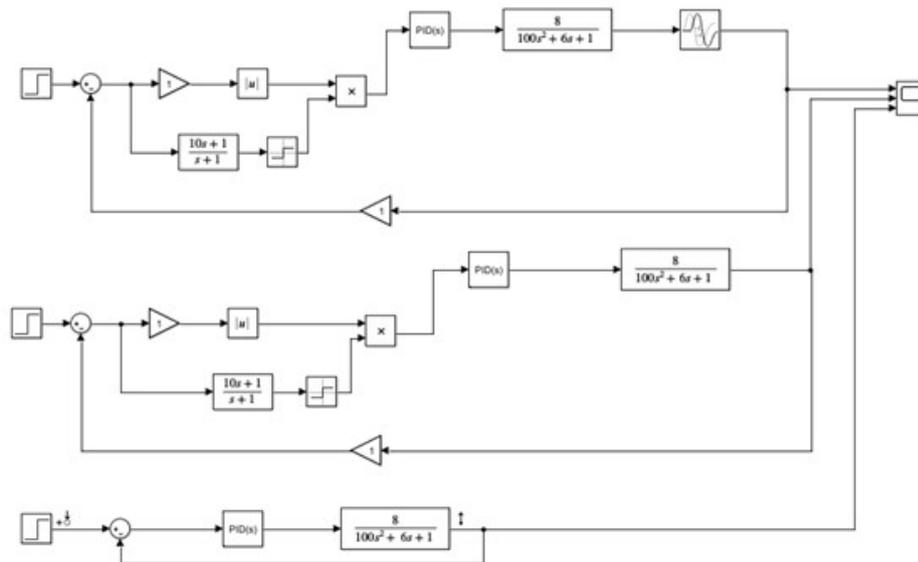


Рисунок 16 – Моделирование работы САР в Matlab Simulink

Переходная характеристика и показатели качества системы без применения корректирующего устройства представлена на рисунке 17. Частотные характеристики отображены на рисунке 18.

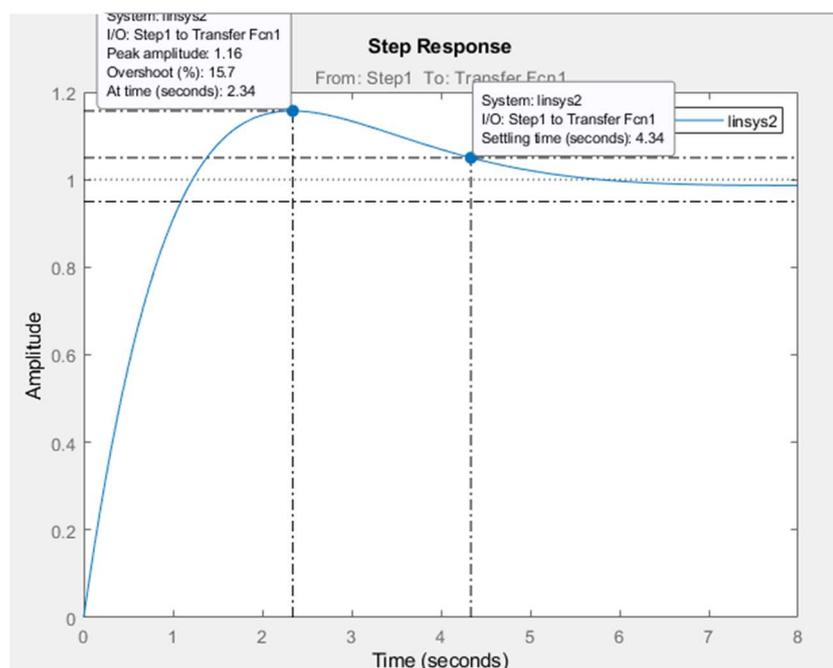


Рисунок 17 – Переходный процесс САР без КУ

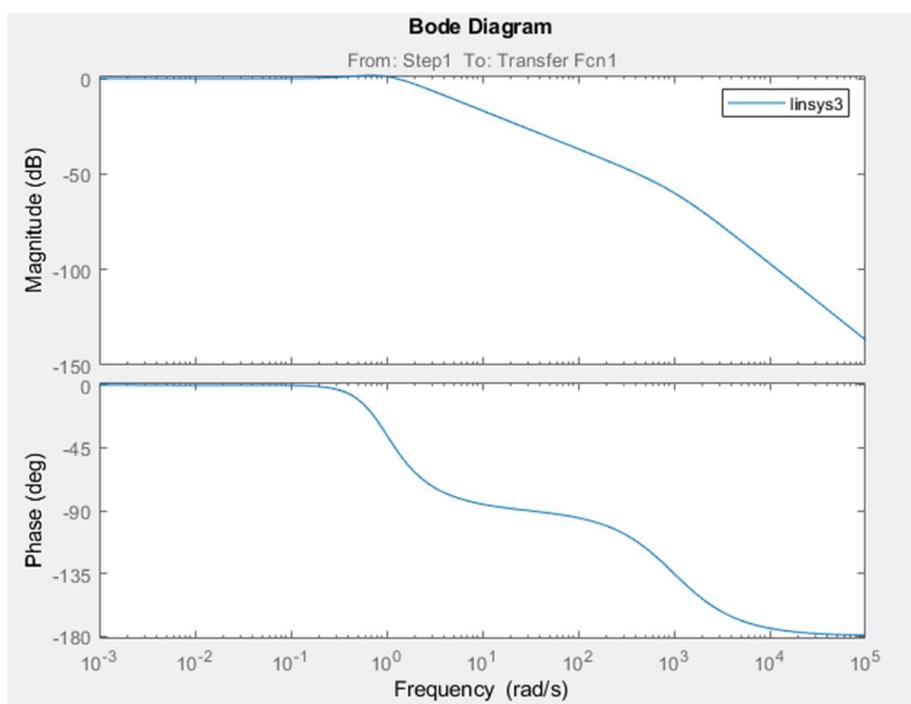


Рисунок 18 – АЧХ и ФЧХ САР без КУ

Сравнительная графическая характеристика переходных процессов в САР без КУ и САР с КУ приведена на рисунке 19.

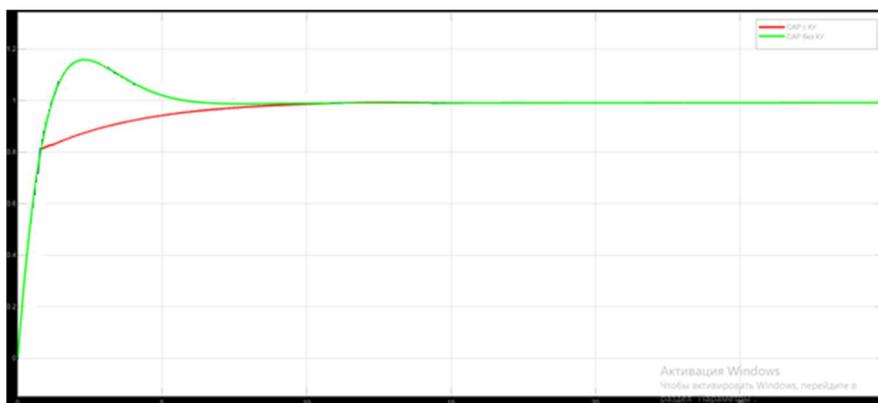


Рисунок 19 – Переходные характеристики САР при различных конфигурациях

Из рисунка 19 видно, что при применении корректирующего устройства значительно повышается качество переходного процесса: происходит уменьшение перерегулирования и времени переходного процесса.

Далее был произведен анализ влияния вида передаточной функции интегро-дифференцирующего звена КУ с фазовым опережением на качество переходного процесса. При неизменном коэффициенте  $T_I = 1$ , было проведено изменение коэффициента  $T$ . Проведение данного исследования целесообразно потому что при реализации нечеткого корректирующего устройства в качестве подстраиваемого параметра было решено выбрать именно этот коэффициент. График переходных процессов САР с запаздыванием и КУ с фазовым опережением при различных значениях параметра  $T$  представлен на рисунке 20.

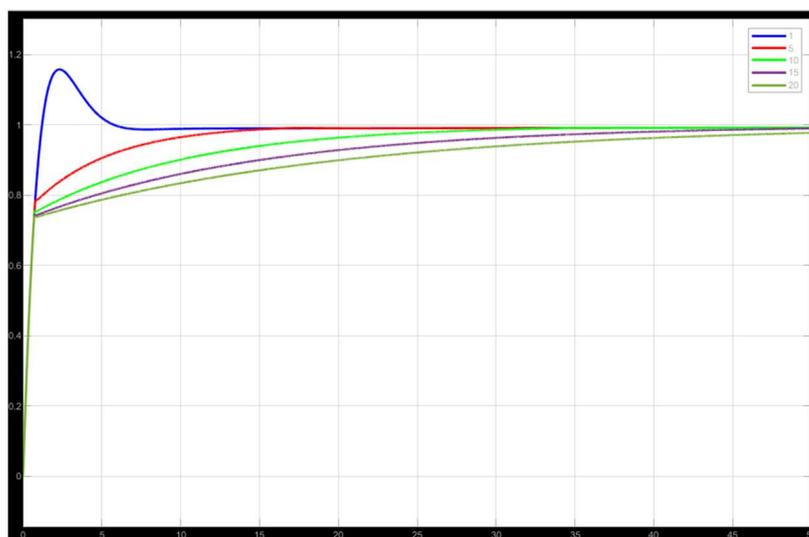


Рисунок 20 – Графики переходных процессов при различных значениях  $T$   
(1,5,10,15,20)

Можно сделать вывод, что чем больше коэффициент  $T$ , тем меньше значение перерегулирования, однако с его ростом постепенно достигается нулевое перерегулирование, в то время как время переходного процесса продолжает увеличиваться, поэтому нужно подбирать его так, чтобы достигалось оптимальное соотношение данных величин.

Далее было решено приступить к разработке нечетких регулирующих устройств – нечеткого ПИД-регулятора и нечеткого псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением. Для их синтеза необходимо знать диапазон, в котором должны изменяться подстроечные параметры данных устройств. Для этого необходимо исследовать поведение системы при изменении параметров объекта управления. Суть исследования заключается в том, чтобы вывести систему на границу устойчивости путем изменения временной постоянной  $T_I$  объекта управления. После этого скорректировать параметры корректирующего устройства и ПИД-регулятора. Диапазон «Изначальные параметры – конечные параметры» и будет являться начальной целевой областью выхода регулятора. Была произведена подстройка коэффициентов ПИД-регулятора, при котором бы перерегулирование равнялось нулю. Данные коэффициенты равны:  $K_p = 11$ ,  $K_i = 0.08$ ,  $K_d = 18$

Далее производилось изменение коэффициента  $T_I$  в диапазоне от 1 до 50. Результаты исследования представлены на рисунках 21 – 29.

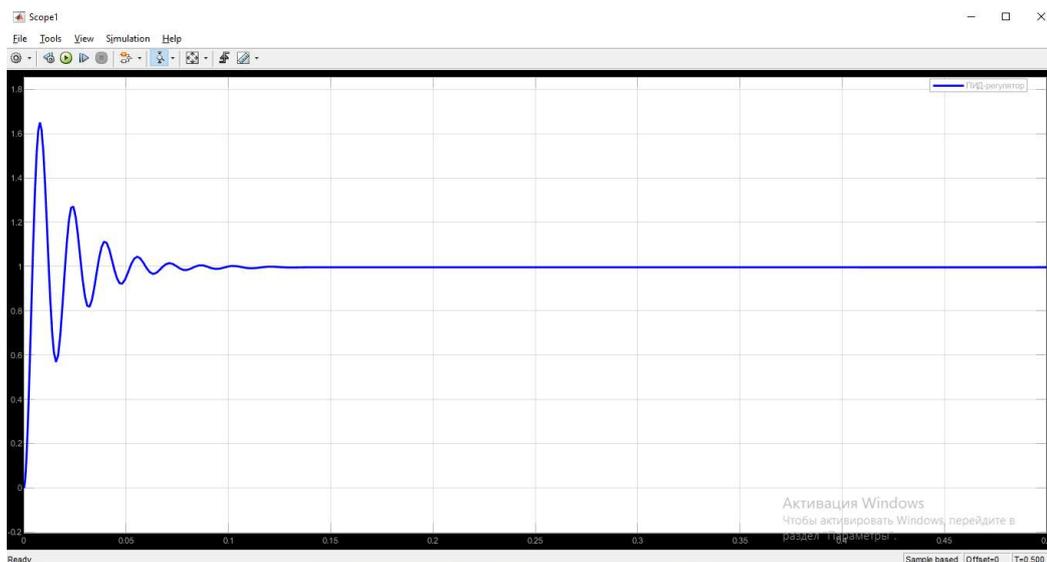


Рисунок 21 – Выход системы при  $T_I = 1$

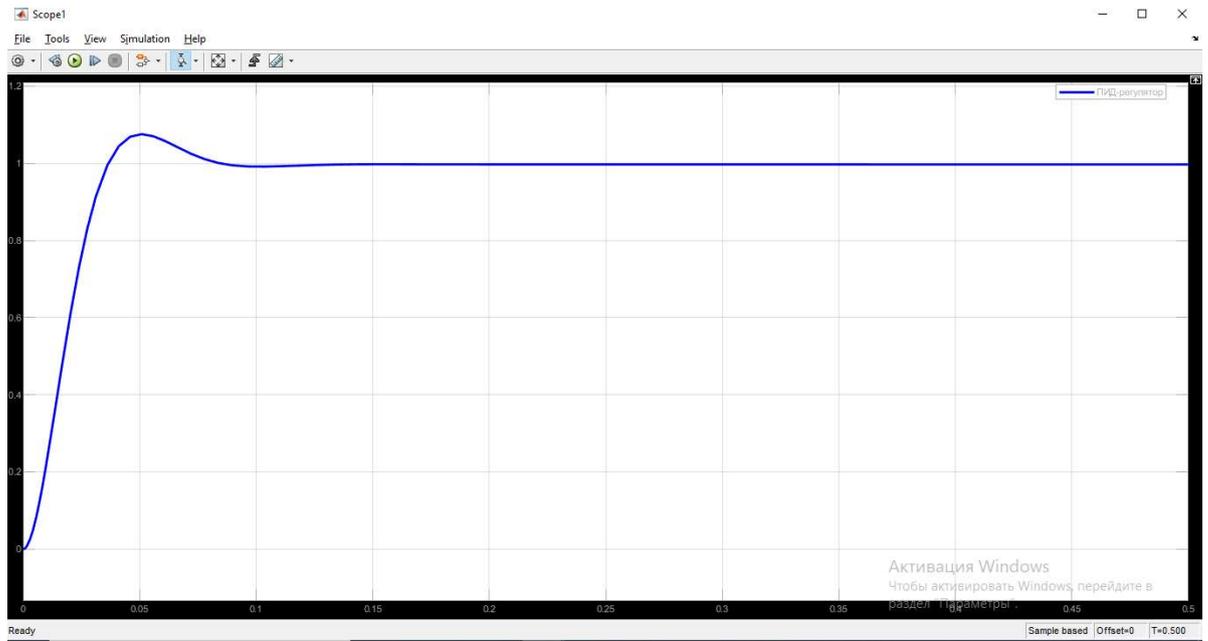


Рисунок 22 – Выход системы при  $T_l = 5$

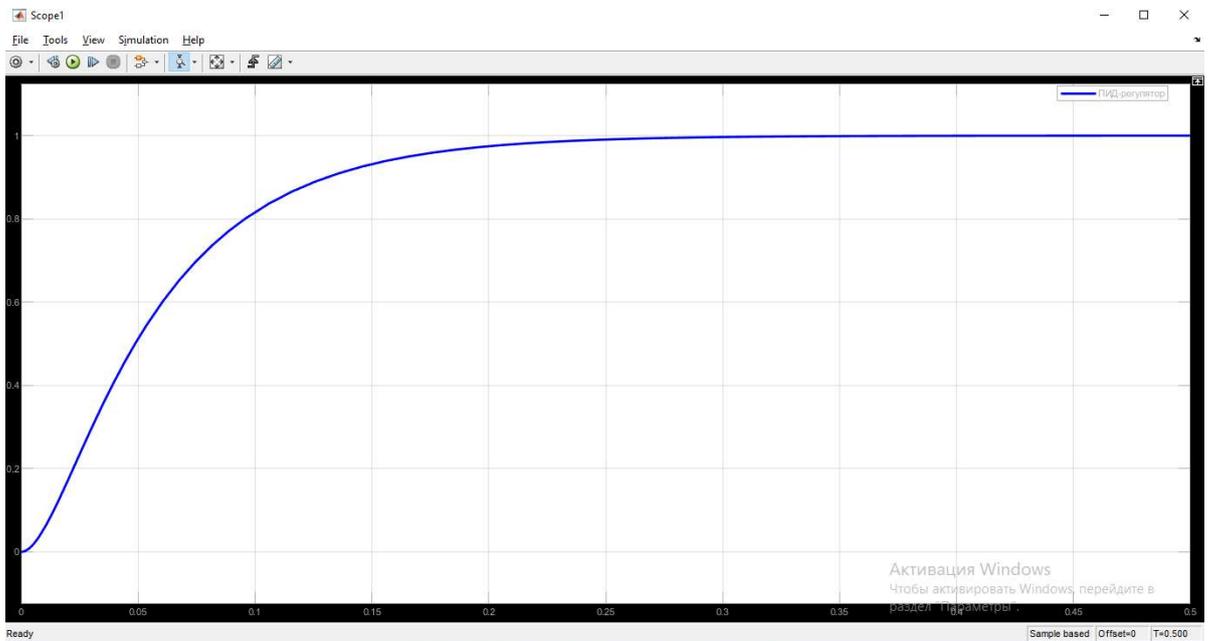


Рисунок 23 – Выход системы при  $T_l = 10$  (базовое значение)

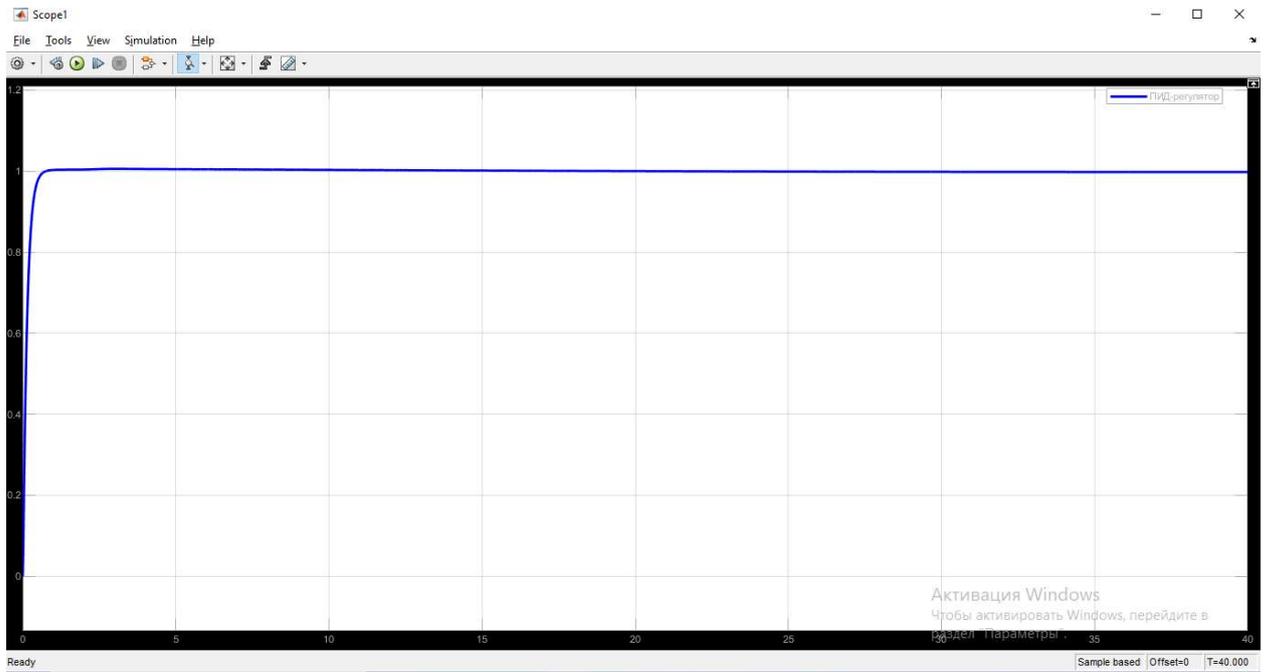


Рисунок 24 – Выход системы при  $T_l = 15$

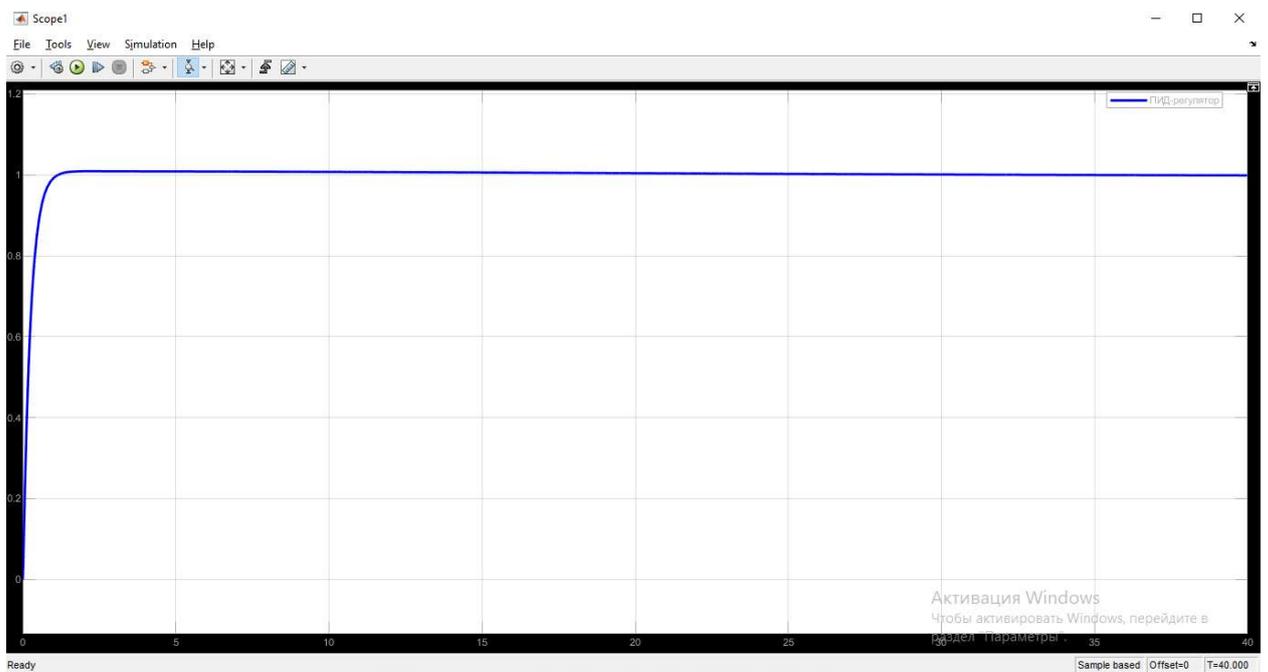


Рисунок 25 – Выход системы при  $T_l = 20$

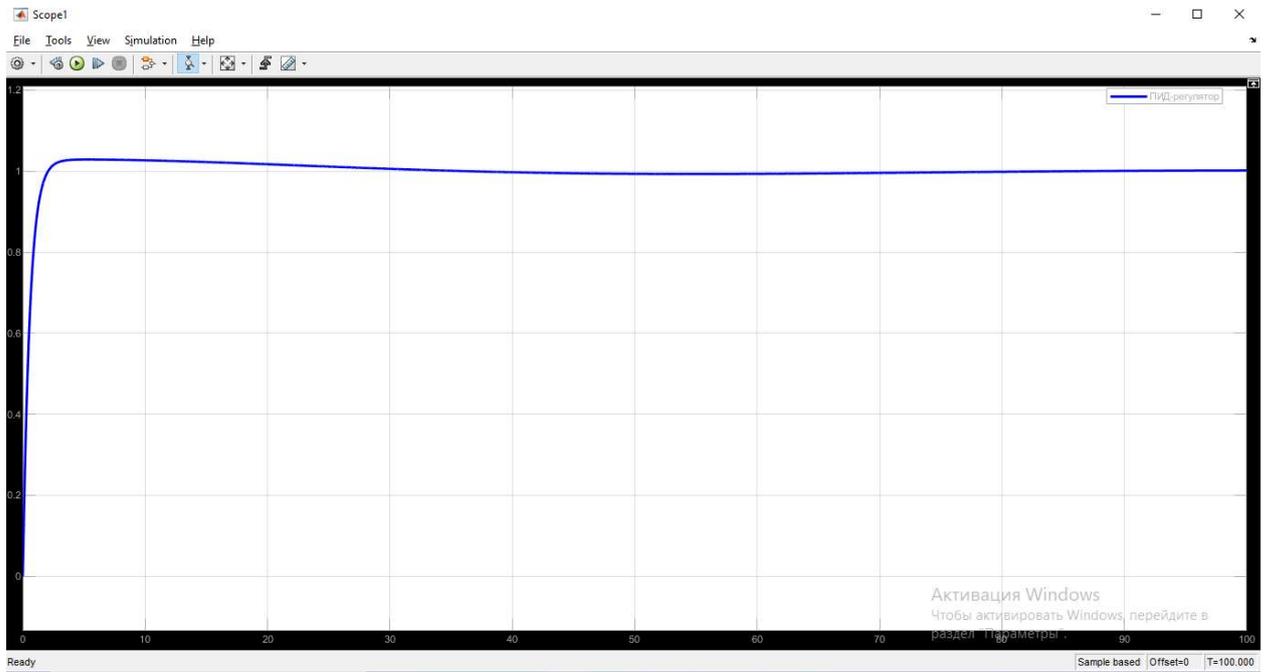


Рисунок 26 – Выход системы при  $T_l = 30$

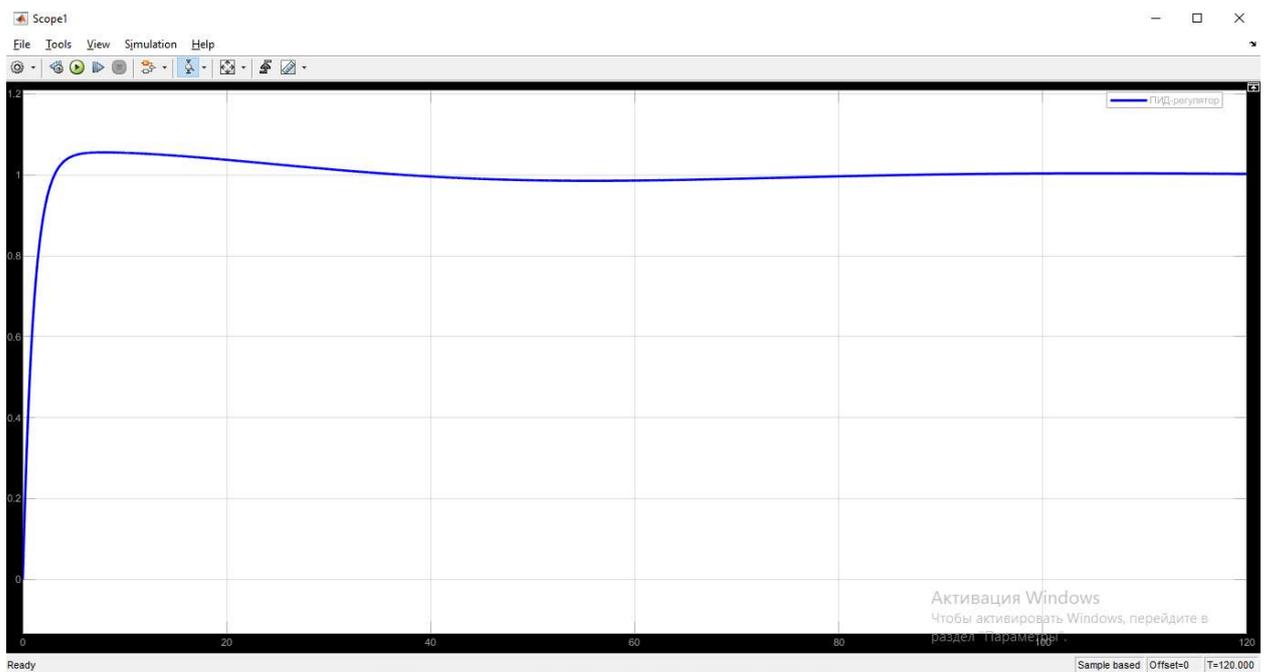


Рисунок 27 – Выход системы при  $T_l = 40$

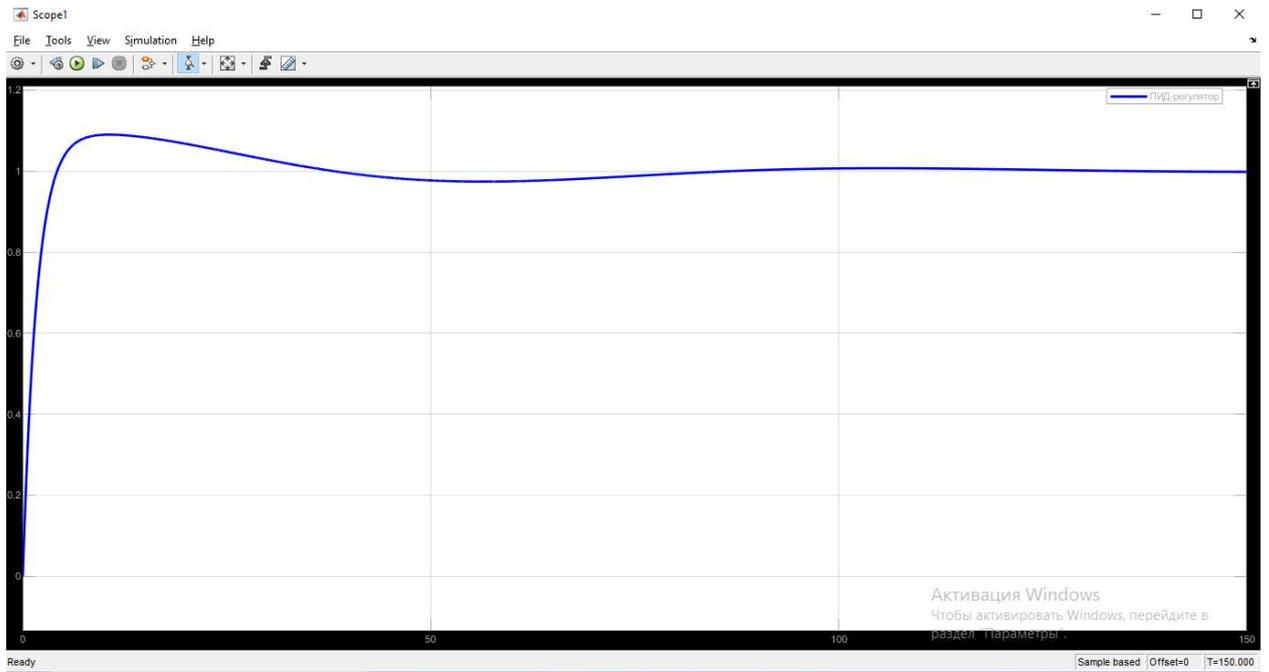


Рисунок 28 – Выход системы при  $T_I = 50$

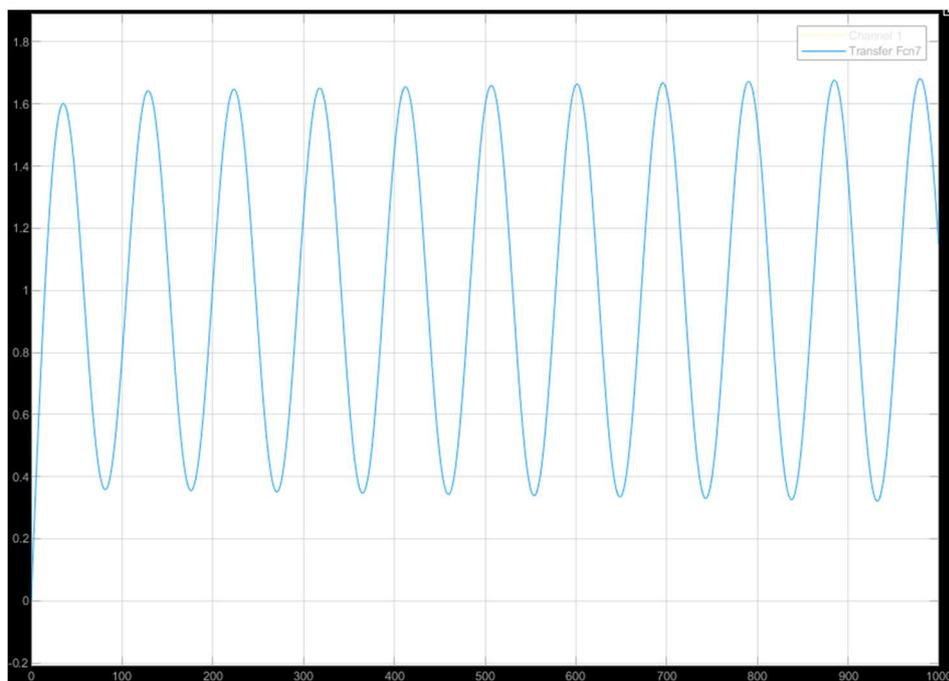


Рисунок 29 – Выход системы при  $T_I = 142,1267$

Система достигает неустойчивости при  $T_I = 142,1267$ . Для стабилизации процесса регулирования возможны два варианта: в случаях, когда используется только ПИД-регулятор это дополнительная подстройка коэффициентов ПИД-регулятора, в случаях использования ПКУ это подстройка коэффициента  $T$  передаточной функции фазового звена корректирующего устройства. Были выполнены оба варианта. Подстроенные коэффициенты ПИД-регулятора равны:  $K_p = 300$ ,  $K_i = 2$ ,  $K_d = 250$ . Подстроенный коэффициент  $T$  корректирующего устройства равен 142. Результаты моделирования для системы с перенастроенным ПИД-регулятором представлены на рисунке 30, для системы с КУ на рисунке 31. В обоих случаях удалось добиться выхода системы на заданную уставку регулирования. Стоит, однако, заметить, что в рамках данной работы оперирование производилось только коэффициентом  $T$  корректирующего устройства, однако как было сказано ранее его увеличение одновременно с улучшением качества регулирования ведет также к повышению времени регулирования, поэтому чтобы добиться приемлемых временных показателей в реальных системах должна также производиться и подстройка коэффициента усиления корректирующего устройства. В рамках выполнения работы данная задача не бралась во внимание.

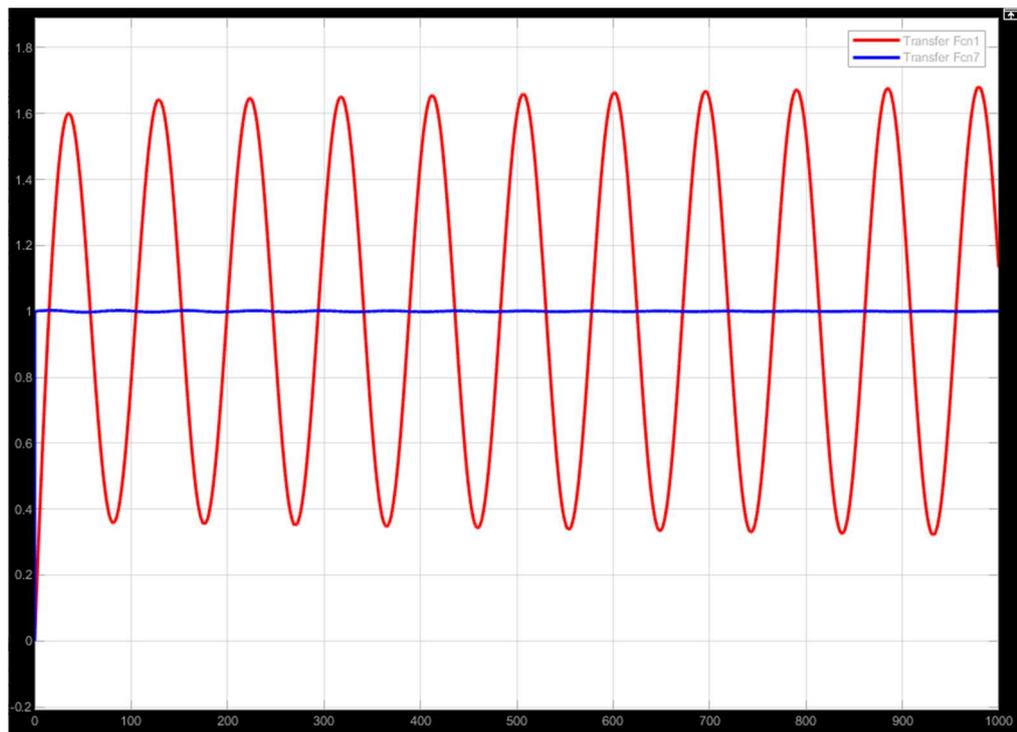


Рисунок 30 – Выход системы при скорректированных настройках ПИД-регулятора

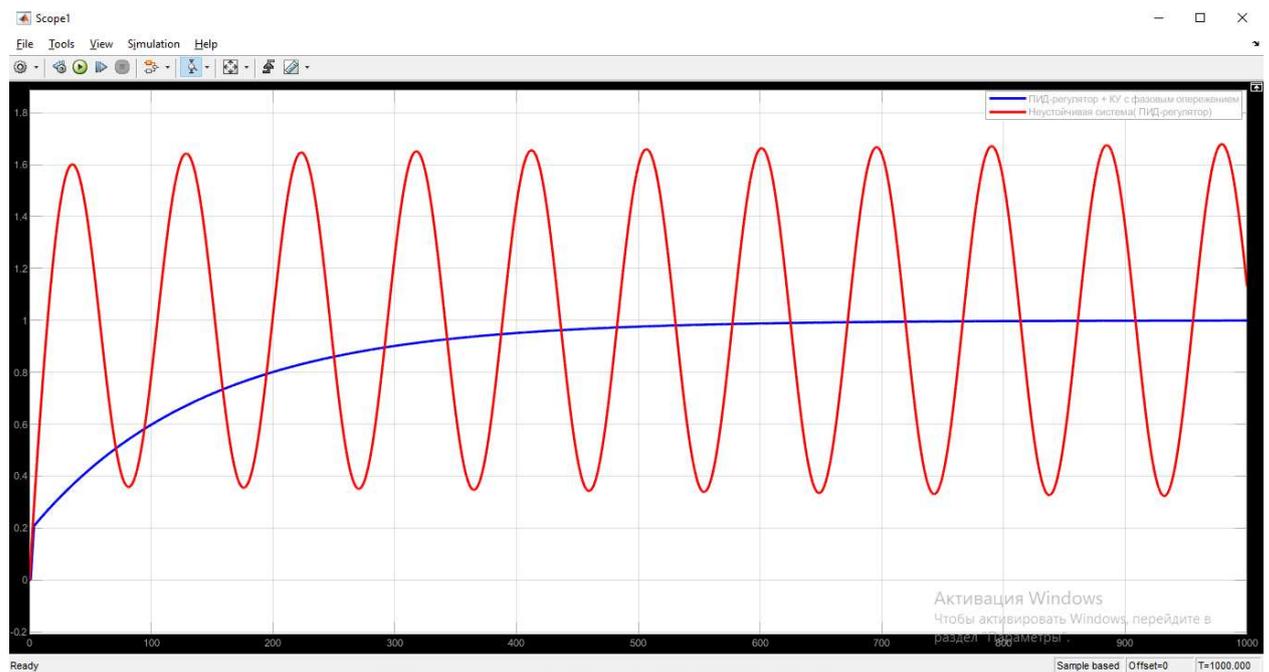


Рисунок 31 – Выход системы при добавлении псевдолинейного КУ с фазовым опережением

Следующим этапом стала доработка исходных схем Matlab Simulink и внедрение в них блоков нечеткой логики. Входными воздействиями для нечеткого блока ПИД-регулятора являются ошибка регулирования, а также интеграл и производная от нее. Выходными параметрами являются параметры ПИД-регулятора  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ . Схема управления Matlab Simulink представлена на рисунках 32 - 33.

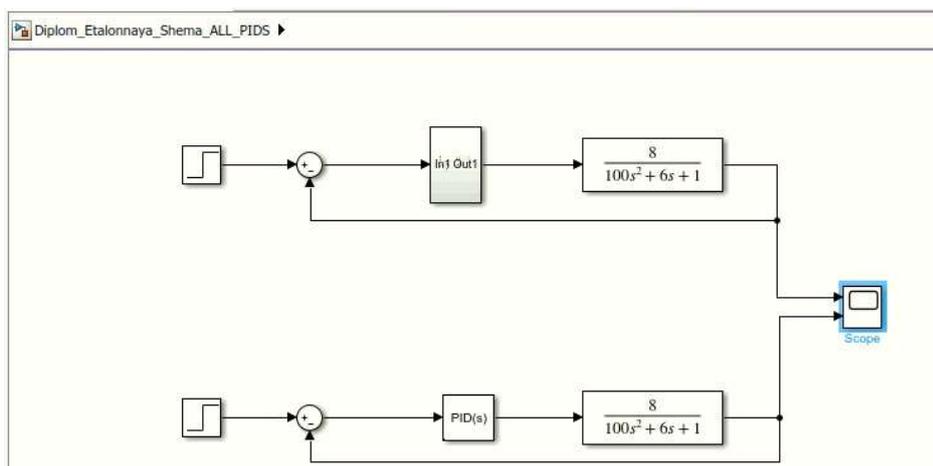


Рисунок 32 - Simulink – схема для ПИД-регулирования

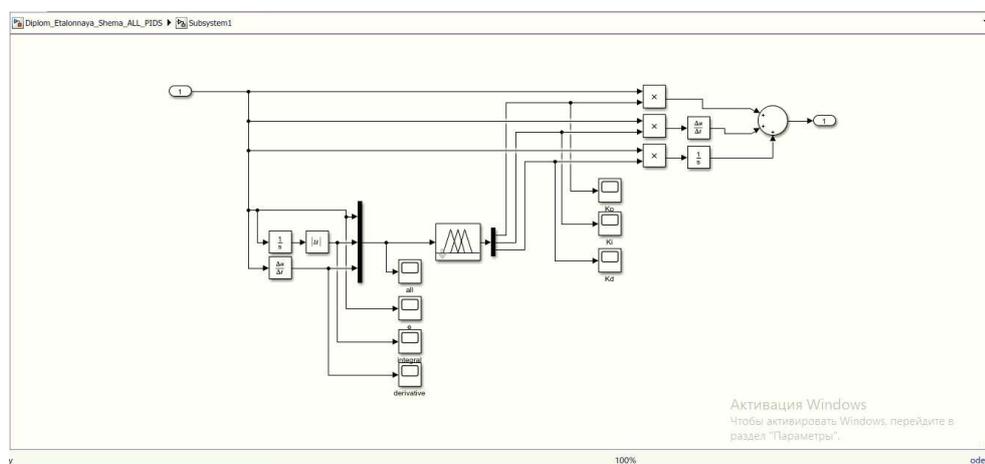


Рисунок 33 - Simulink – схема для ПИД-регулирования, контур нечеткого управления

Структура нечеткого регулятора разрабатывалась в пакете Matlab Fuzzy Logic Toolbox. При помощи данной утилиты можно с помощью графического интерфейса проводить разработку нечетких систем. С ее помощью были разработаны наборы функций принадлежности по входным и выходным переменным, а также база правил. Они представлены на рисунках 34 – 41.

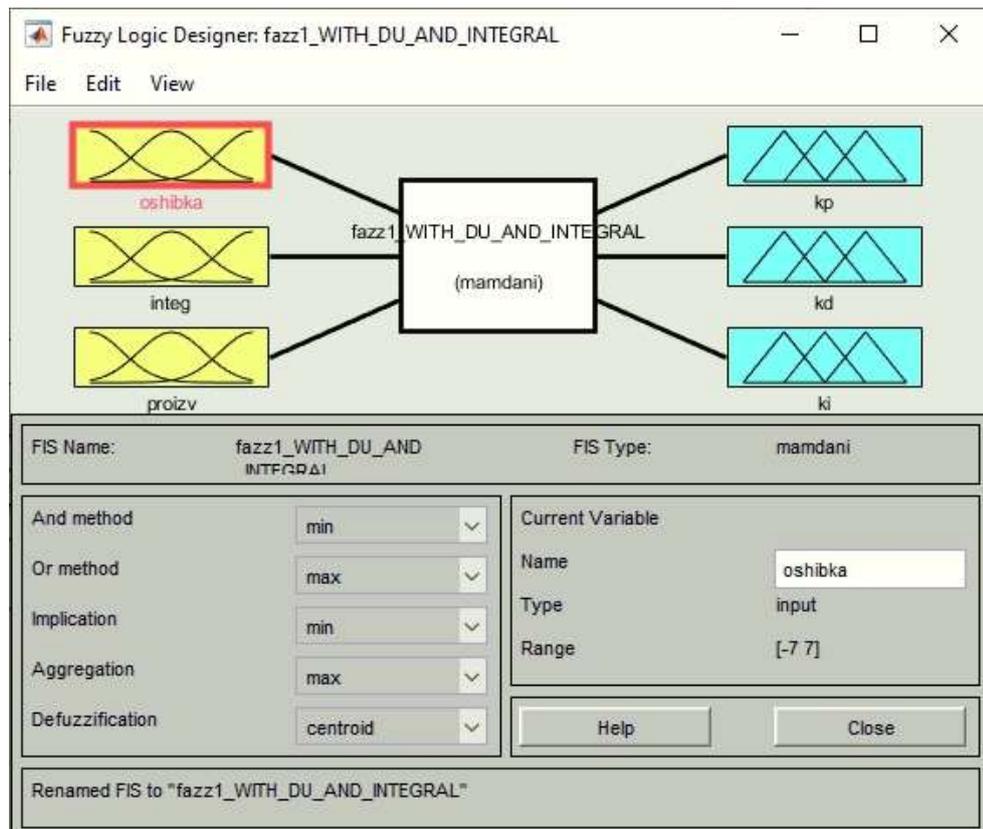


Рисунок 34 - Общий вид нечеткого ПИД-регулятора

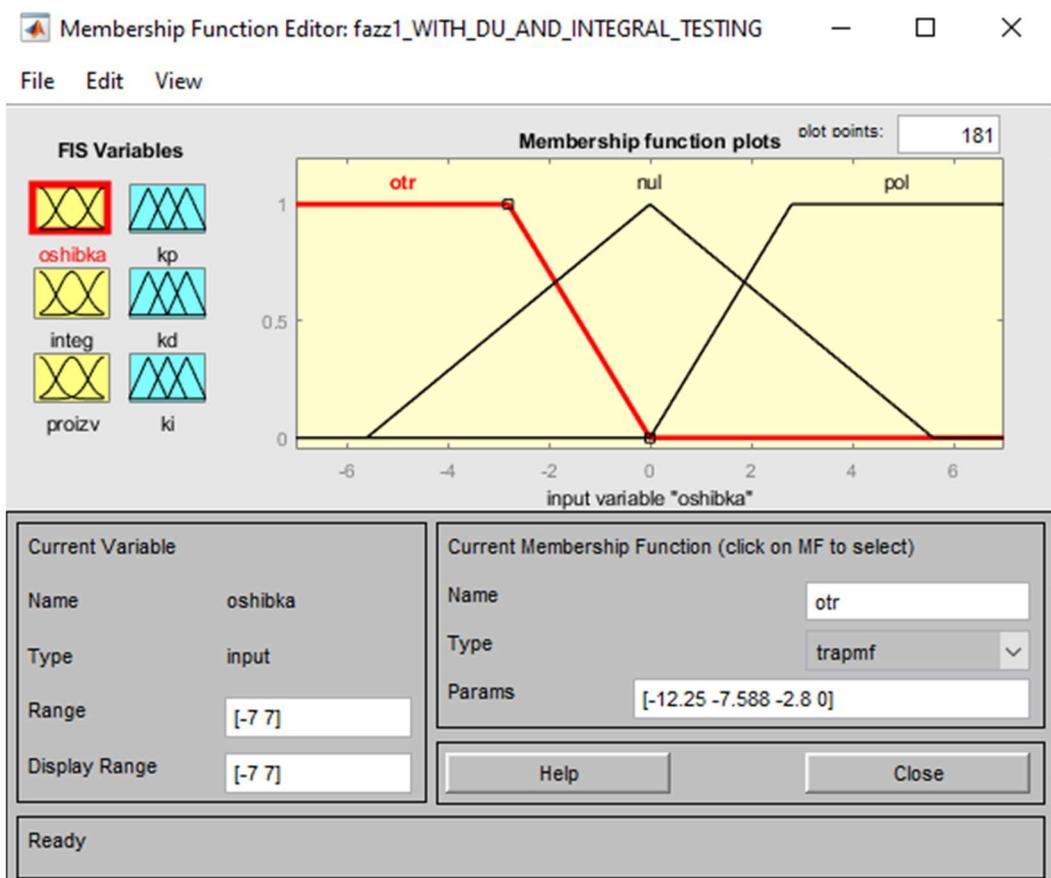


Рисунок 35 - Функция принадлежности ошибки

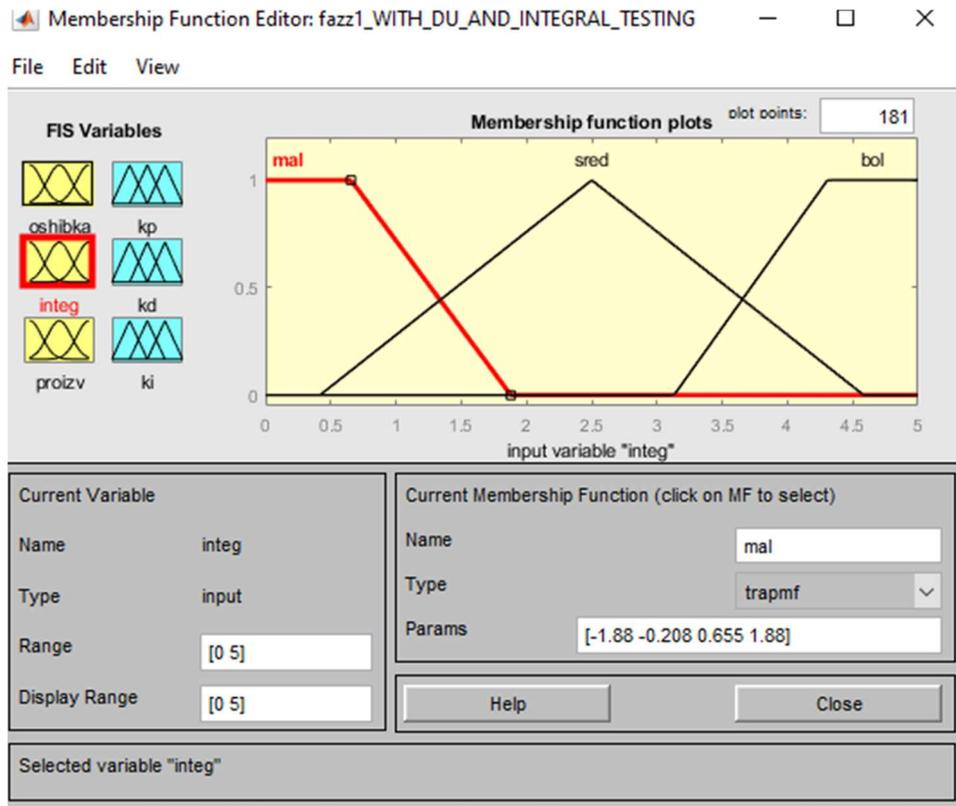


Рисунок 36 - Функция принадлежности интеграла ошибки

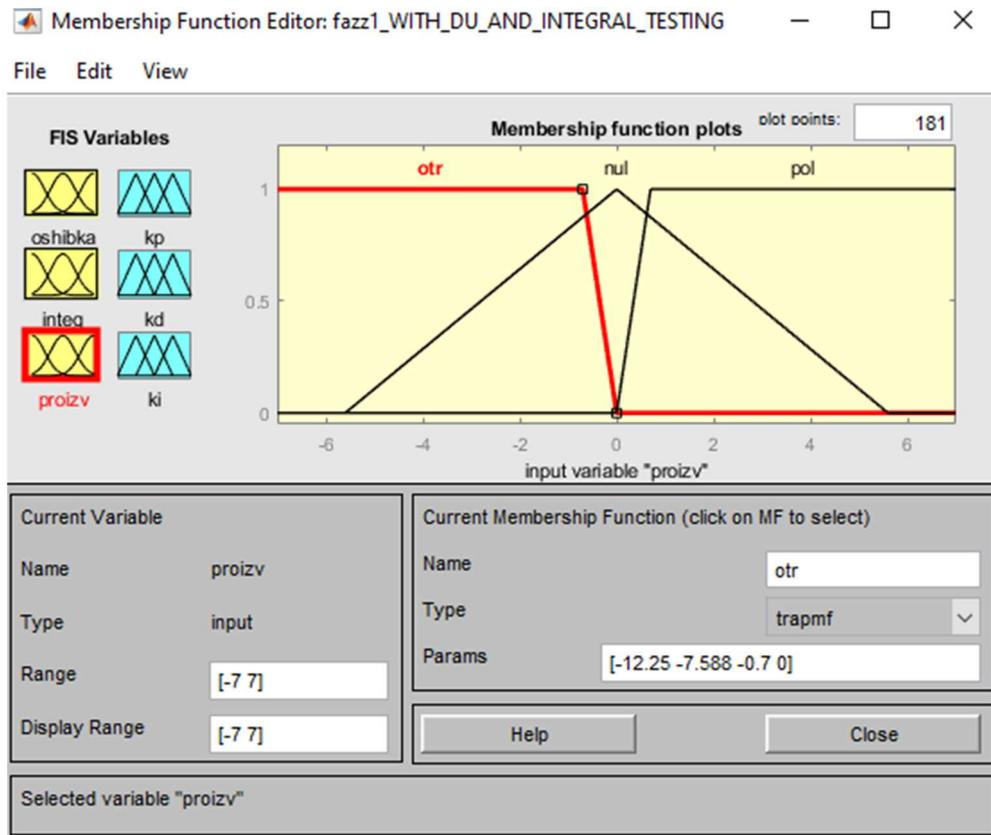


Рисунок 37 - Функция принадлежности производной ошибки

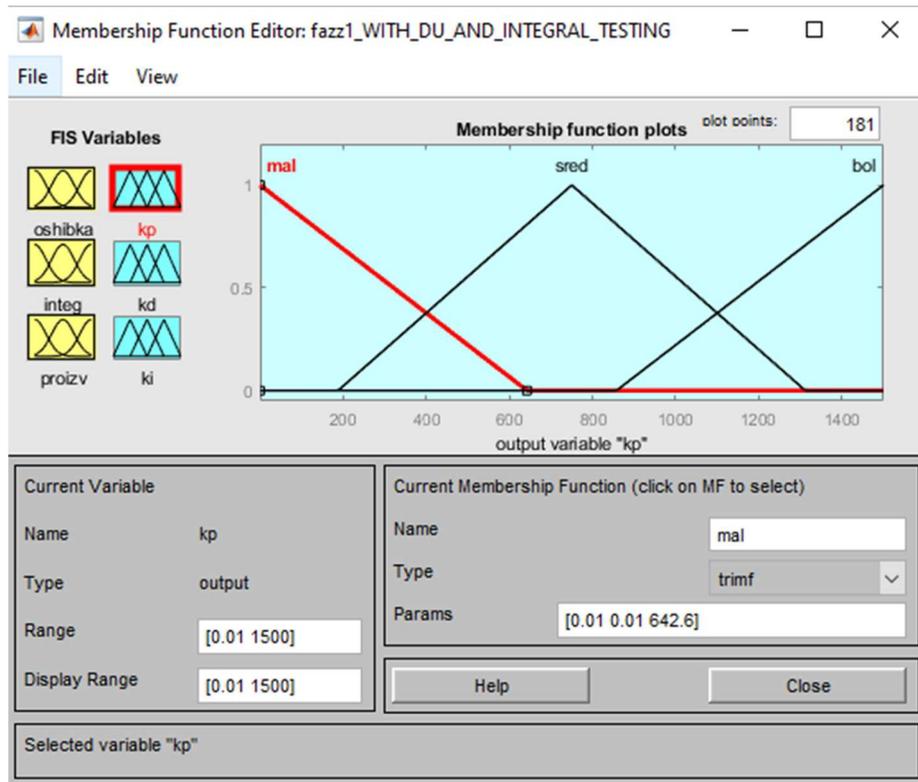


Рисунок 38 - Функция принадлежности Кр

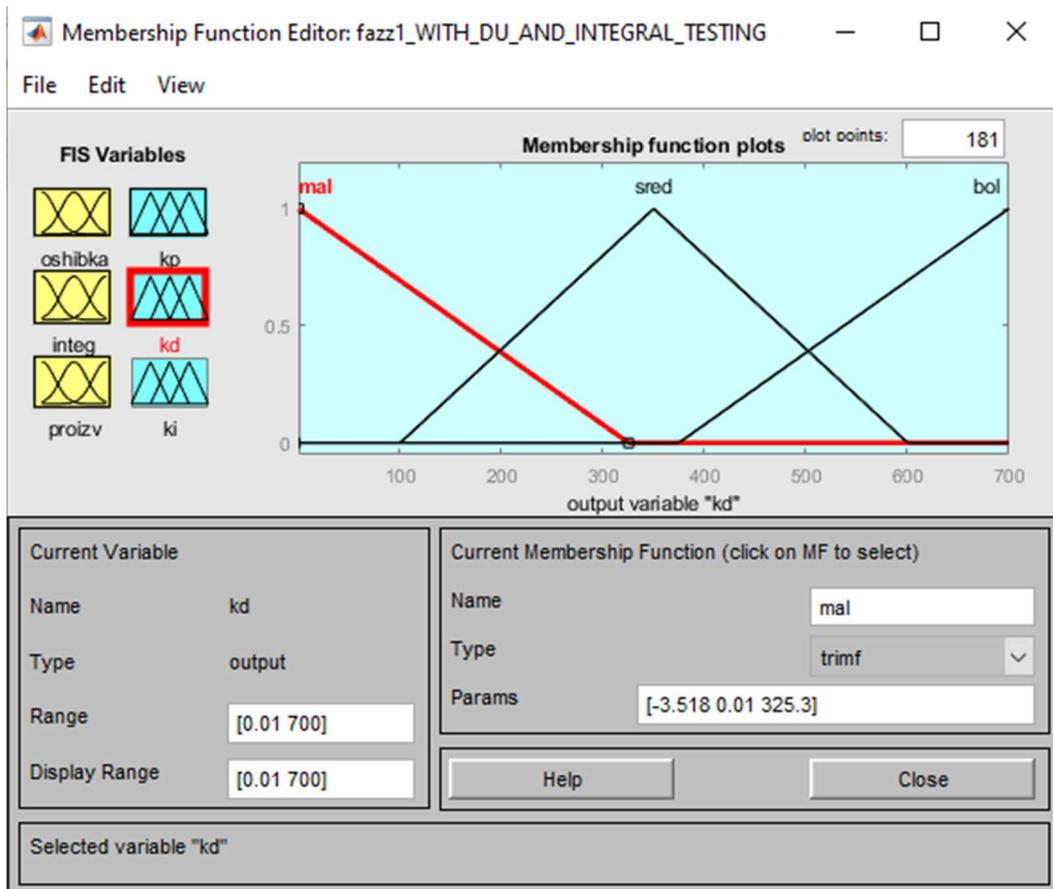


Рисунок 39 - Функция принадлежности Кd

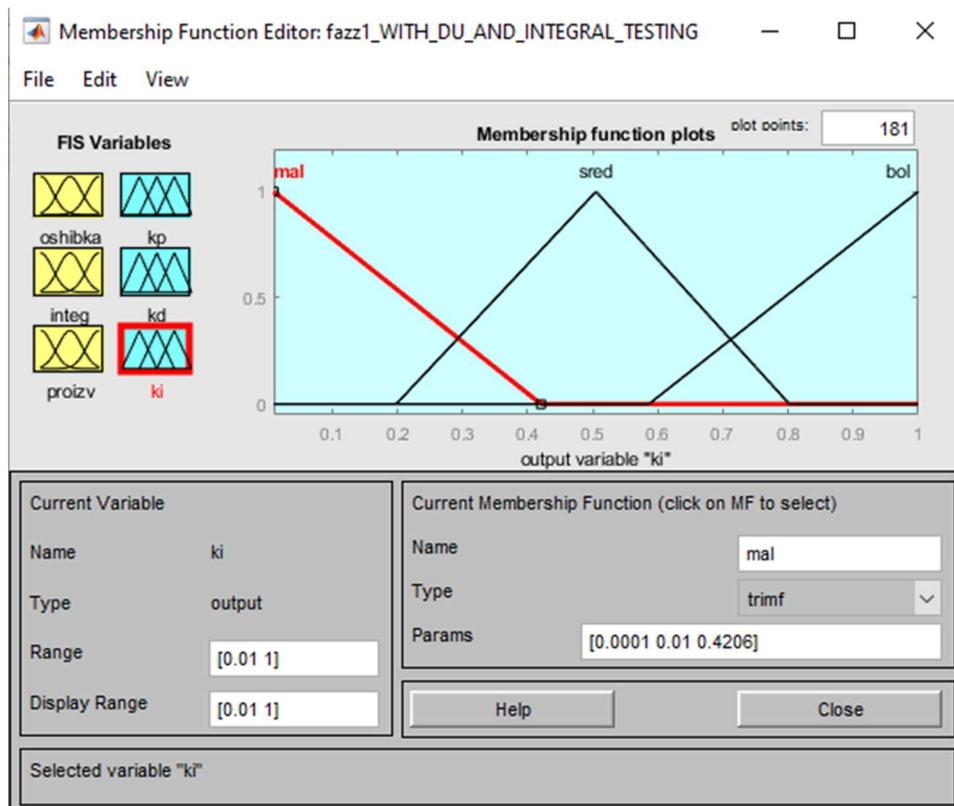


Рисунок 40 - Функция принадлежности Ки

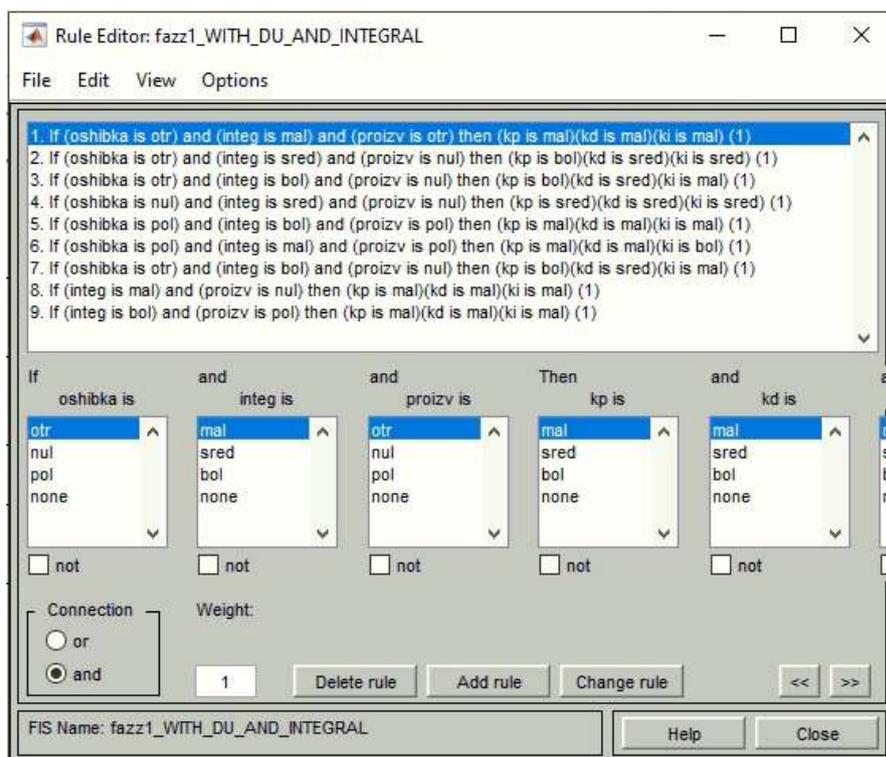


Рисунок 41 - База правил

Результаты регулирования при базовых параметрах ОУ представлены на рисунке 42.



Рисунок 42 - Результаты ПИД-регулирования при базовой передаточной функции

Далее была проверена работа нечеткого ПИД-регулятора при ОУ, выведенном на границу устойчивости. Схема Matlab Simulink представлена на рисунке 43, результаты регулирования представлены на рисунке 44.

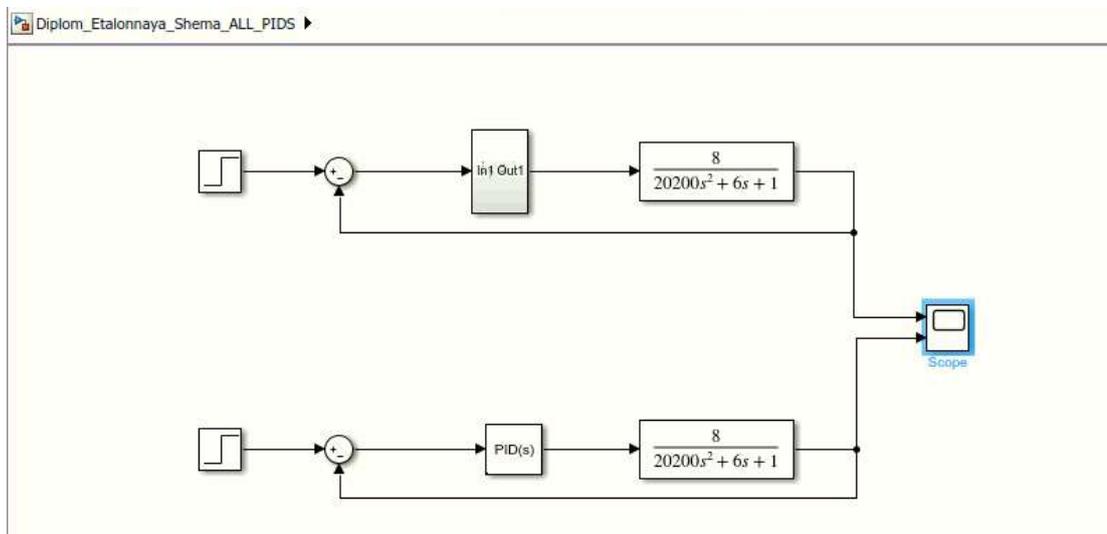


Рисунок 43 - Передаточная функция при которой ОУ выходит на границу устойчивости

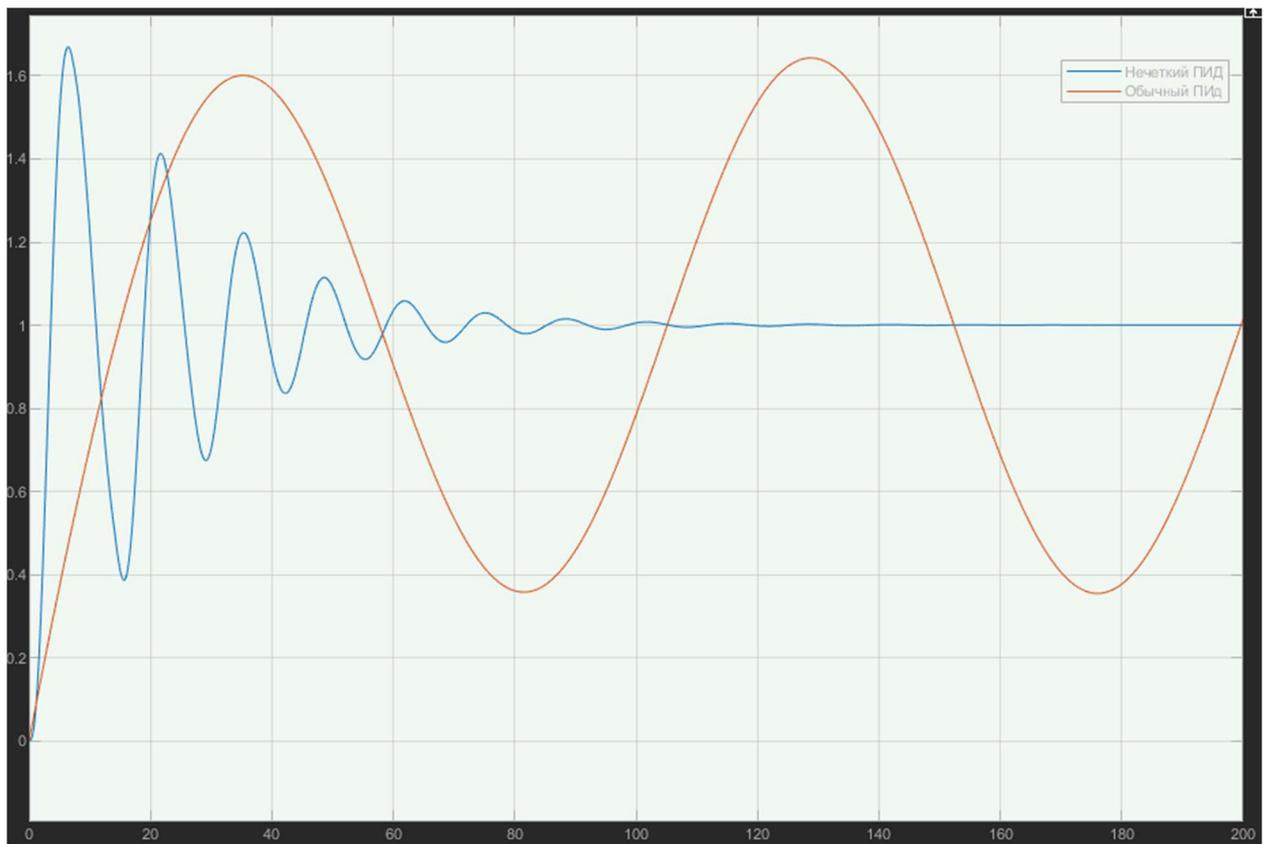


Рисунок 44 - Результаты ПИД-регулирования

Как видно из рисунка 42 нечеткий регулятор имеет незначительный проигрыш в скорости регулирования, однако, при непостоянных параметрах ОУ подстраивается к изменениям характеристик системы и позволяет вывести систему на целевое значение, чего не может сделать обычный ПИД – регулятор, что продемонстрировано на рисунке 44.

Далее был синтез нечеткого КУ с фазовым опережением. Входным воздействием для нечеткого блока КУ является интегральная ошибка регулирования. Выходным параметром является коэффициент передаточной функции КУ  $T$ . Схема управления Matlab Simulink представлена на рисунках 45 - 46.

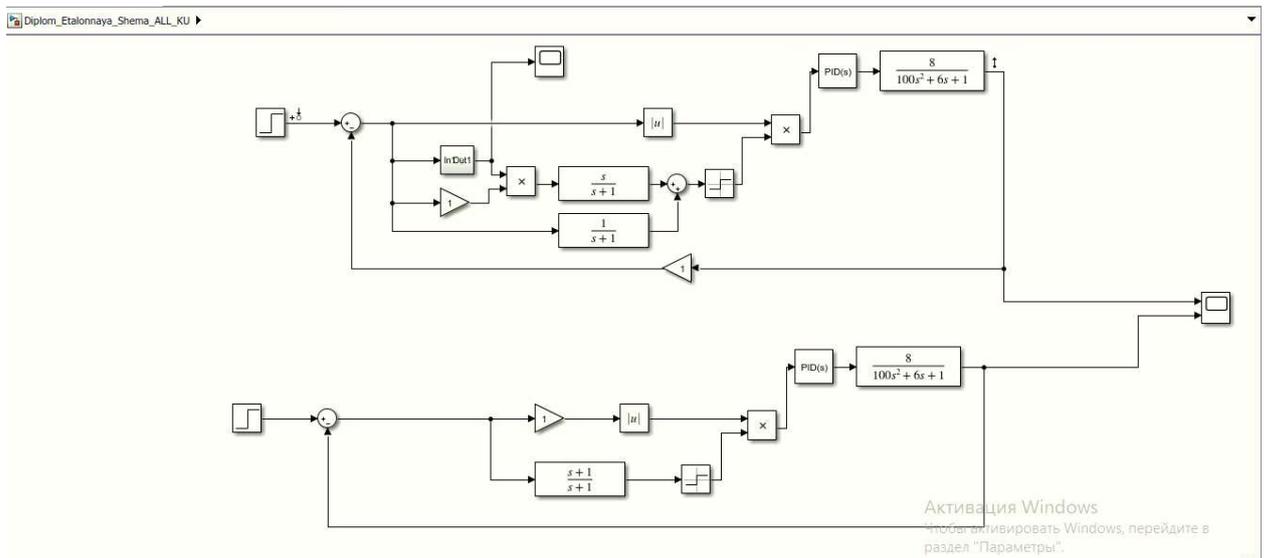


Рисунок 45 - Simulink-схема

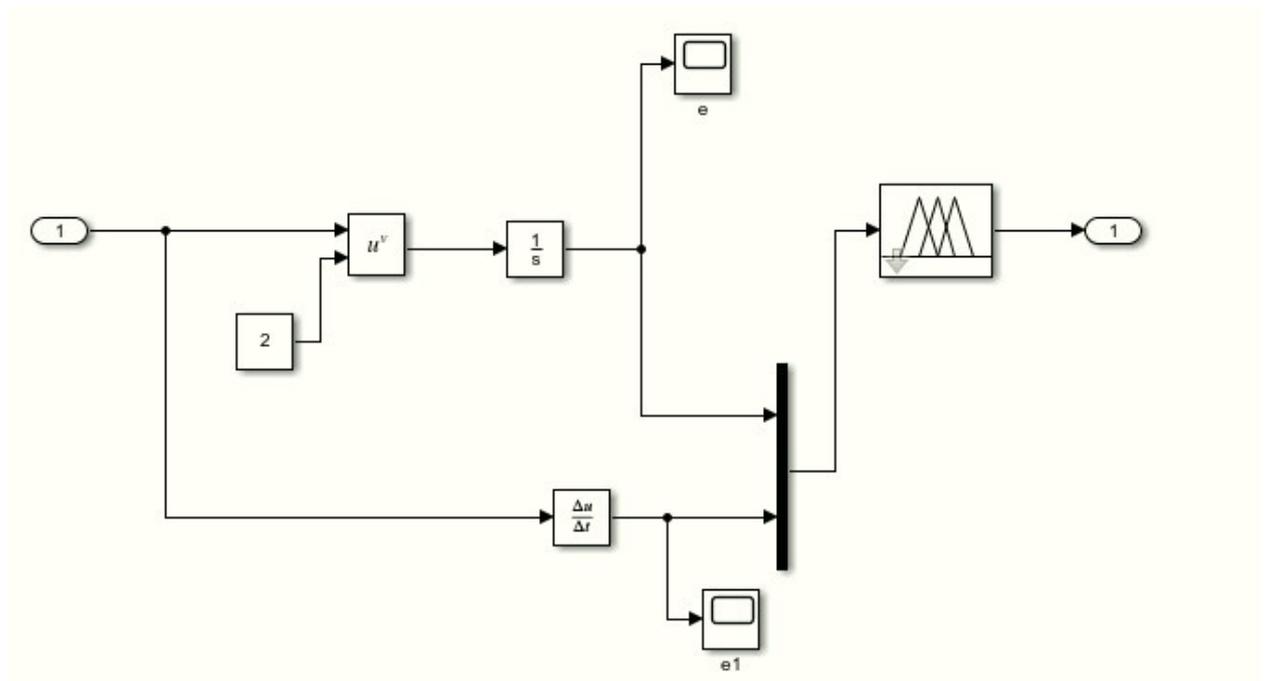


Рисунок 46 - Контур нечеткого регулирования

Вид функции принадлежности входных и выходных переменных, а также база правил для блока нечеткой логики представлена на рисунках 47-50.

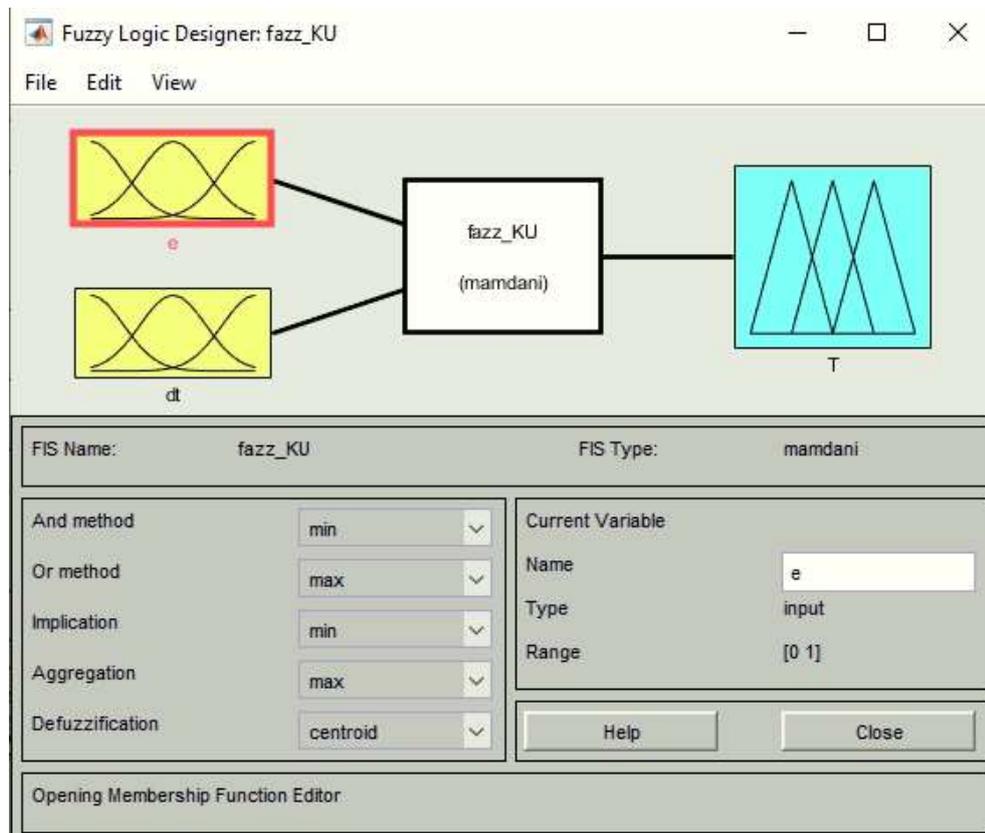


Рисунок 47 - Общий вид нечеткого регулятора

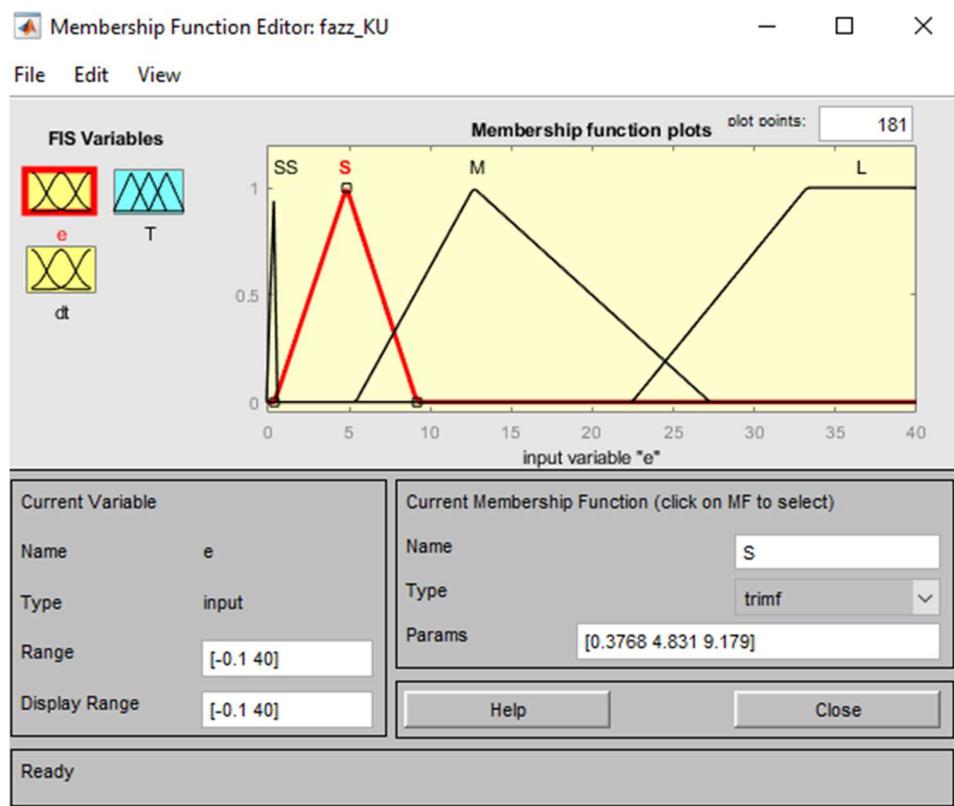


Рисунок 48 - Функция принадлежности ошибки

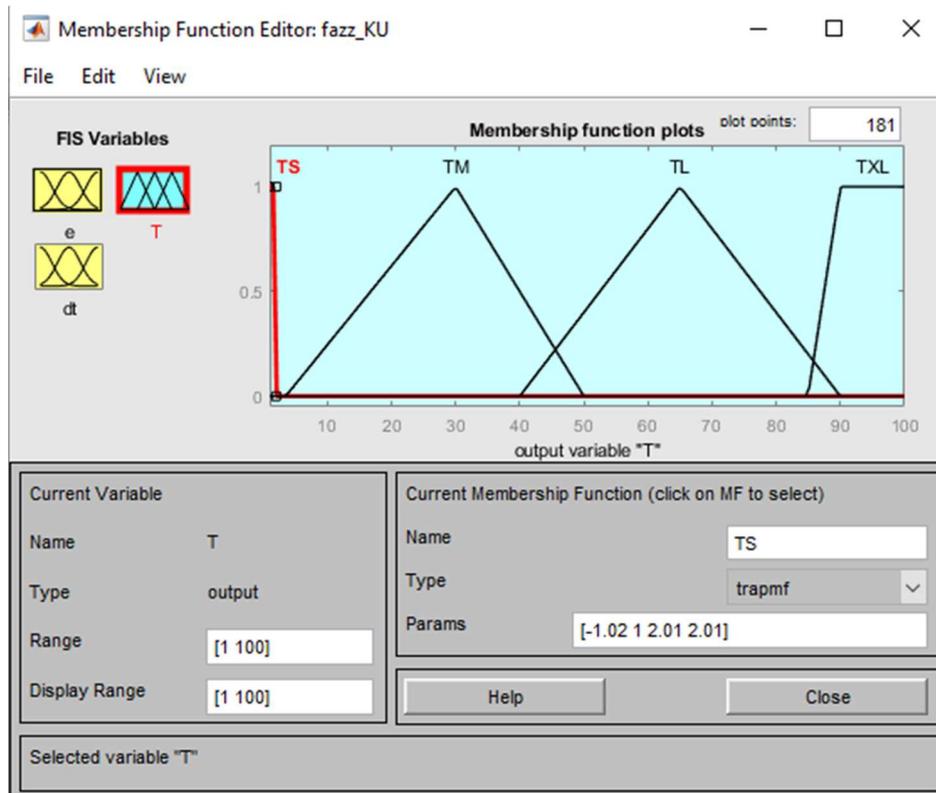


Рисунок 49 - Функция принадлежности коэффициента  $T$  корректирующего устройства

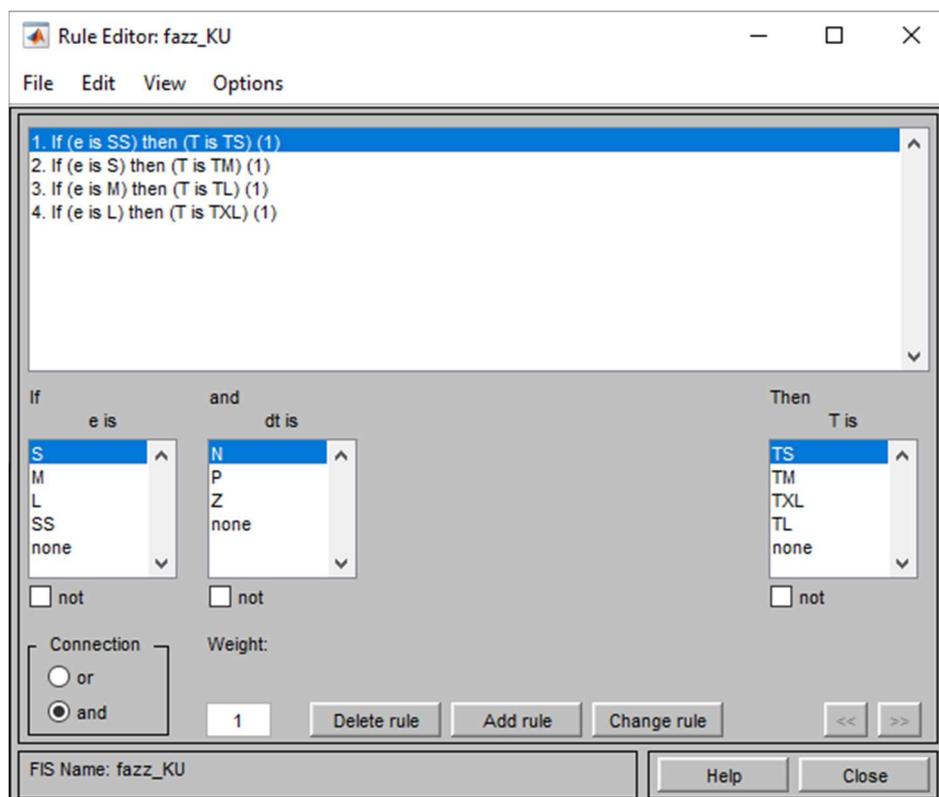


Рисунок 50 - База правил

Далее была проверена работа нечеткого псевдолинейного КУ с фазовым опережением при ОУ со стандартными параметрами и ОУ выведенном на границу устойчивости. Результаты моделирования представлены на рисунках 51, 52.

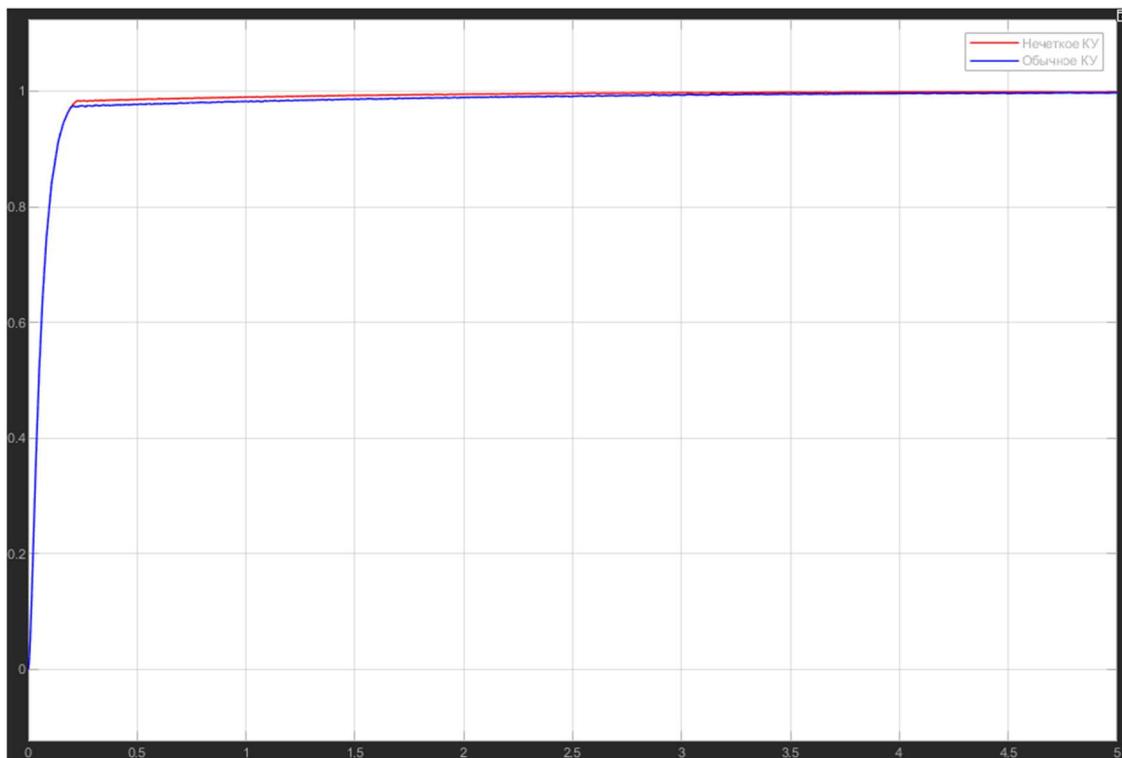


Рисунок 51 - Результаты работы при базовой функции

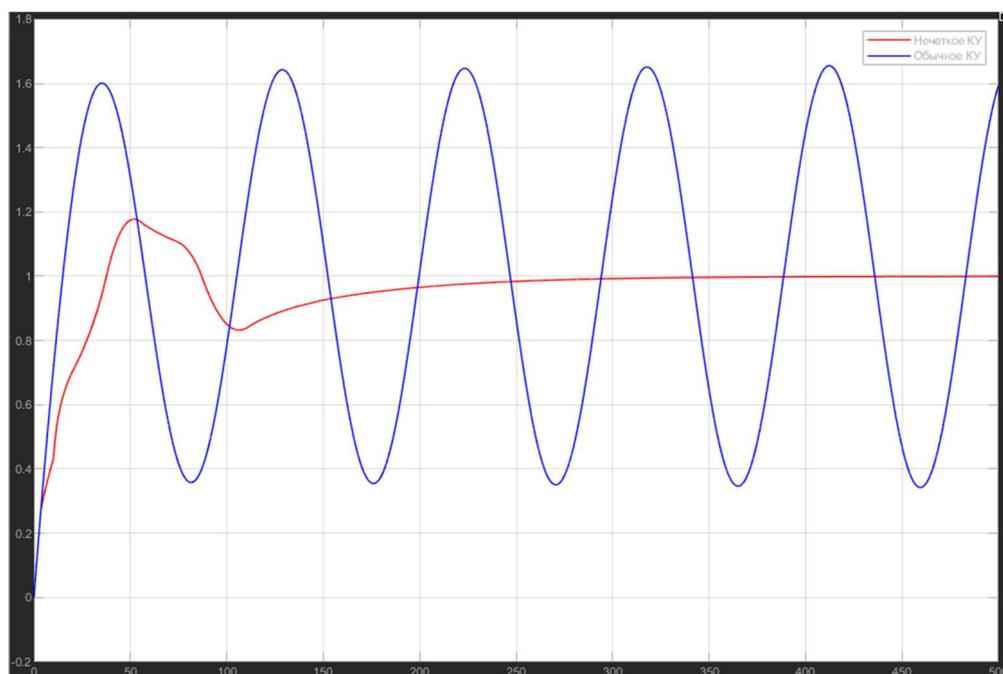


Рисунок 52 - Результаты работы при изменившейся передаточной функции системы

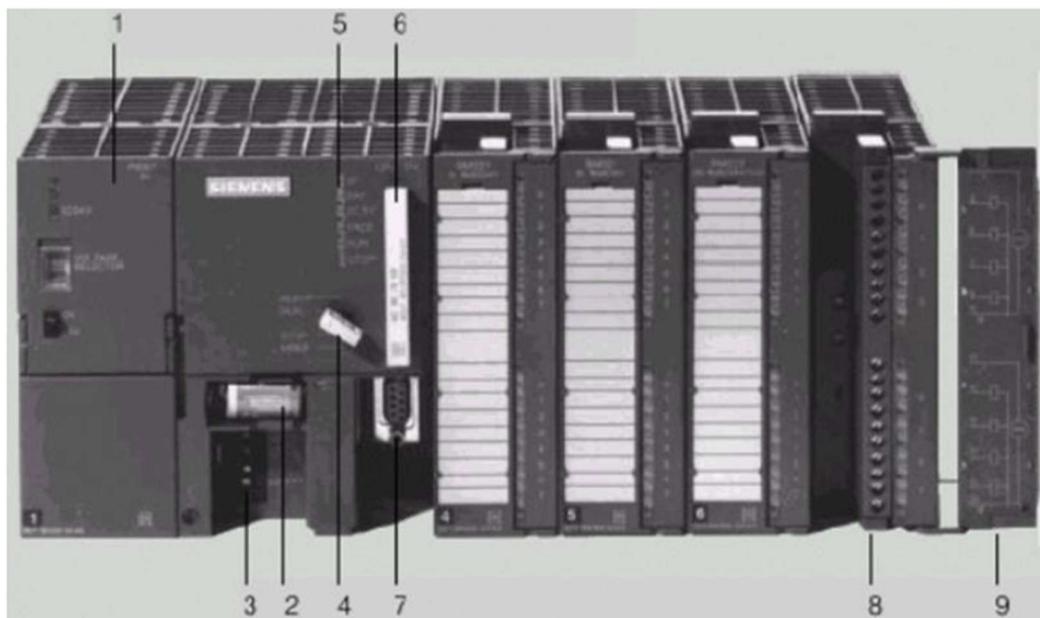
Как видно из рисунков 51 и 52 в случае базовых параметров объекта управления использование нечеткого КУ практически не дает преимущества в качестве регулирования. Если сравнивать работу КУ с ПИД-регуляторами обычного и нечеткого исполнения, то можно заметить незначительное преимущество в скорости регулирования перед нечетким ПИД-регулятором, однако оба нечетких устройства проигрывают в быстродействии обычному ПИД-регулятору. В случае с нечетким КУ данную проблему можно нивелировать за счет введения дополнительного контура нечеткой логики для подстройки коэффициента усиления КУ, в случае ПИД-регулятора, требуется дополнительная доработка конфигурации функций принадлежности и базы правил.

В случаях выхода объекта управления на границу устойчивости ПИД-регулятор и корректирующее устройство обычного исполнения с базовыми настройками не дают необходимого качества регулирования – в систем наблюдаются незатухающие колебания. Нечеткие устройства в свою очередь обеспечивают выход значения процесса на заданную уставку. Нечеткое КУ проигрывает нечеткому ПИД-регулятору в быстродействии (как уже неоднократно указывалось данная проблема может быть решена за счет введения контура нечеткого управления коэффициентом усиления корректирующего устройства), однако обеспечивает меньшее значение перерегулирования и в целом более плавный вид переходной характеристики.

## 4 Программная реализация псевдолинейного корректирующего устройства на контроллере Simatic S7-300

### 4.1 Состав контроллера SIMATIC S7-300

На рисунке 53 представлена одна из базовых конфигураций рейта контроллера SIMATIC S7-300.



1 – блок питания; 2 – буферная батарея; 3 – клеммы для подключения питания 24В; 4 – ключ переключения режимов работы; 5 – светодиоды индикации состояния системы; 6 – submodule памяти; 7 – разъем многоточечного интерфейса MPI; 8 – фронтальный соединитель; 9 – защитная крышка

Рисунок 53 - Внешний вид стойки контроллера S7-300

### 4.2 Программный пакет STEP7

STEP7 – комплекс программного обеспечения для разработки, конфигурирования и программирования промышленных систем автоматизированного управления, в основе которых лежат технические (линейка ПЛК SIMATIC) и программные (пакет визуализации WinCC) продукты производства фирмы Siemens.

Одной из отличительных особенностей пакета STEP7 является широкий набор средств и возможностей для проектирования распределенных систем автоматического управления, в состав которых могут входить: ПЛК, SCADA-системы, устройства распределенного ввода-вывода и возможность гибкой конфигурации сетевой структуры, обеспечивающей их связь. Возможность разработки может быть ограничена только программными и аппаратными средствами на базе которых производится данная работа.

Перечислим основные средства разработки пакета STEP7:

- SIMATIC Manager – является ключевой пользовательской оболочкой STEP7 из которой пользователь может четко видеть структуру проекта и быстро получать доступ к его компонентам или другим программным утилитам STEP7.
- Symbol Editor – утилита для управления пространством переменных (конфигурирование имен, адресов).
- Hardware Configuration – утилита для разработки конфигурации аппаратных средств проекта.
- Communication – утилита для разработки конфигурации сетевой структуры системы (информационный обмен через интерфейс MPI, промышленные сети PROFINET, PROFIBUS, Industrial Ethernet).
- Информационные функции – для мониторинга центрального процессора и режима отладки пользовательских программ.

Разработка проекта ведется на языках стандарта МЭК 61131.

В данной работе реализована САР с нечетким регулятором для объекта управления второго порядка в программном пакете STEP7, и проверена её работа под управлением контроллера SIMATIC S7-300.

## **4.2 Программный пакет Simatic WinCC**

Simatic WinCC - это система мониторинга, управления и сбора данных, поддерживающая операционные системы семейства Windows. WinCC обеспечивает полную функциональность в управлении и наблюдении за

процессом для всех отраслей промышленности, и от простых однопользовательских до распределенных многопользовательских систем с резервированными серверами и интегрированными решениями на основе Web-технологий. Основными возможностями Simatic WinCC являются:

- визуализация технологического процесса;
- конфигурирование и настройка связи с контроллерами различных производителей;
- отображение, архивирование и протоколирование сообщений и данных от технологического процесса;
- расширение возможностей системы за счет использования скриптов на языках ANSI C, VBS и VBA;
- формирование отчетов;
- взаимодействие с другими приложениями, в том числе по сети, путем использования стандартных интерфейсов OLE (Object Linking and Embedding) и ODBC (Open Database Connectivity) обеспечивает простую интеграцию WinCC во внутреннюю информационную сеть предприятия;
- построение резервированных систем;
- расширение возможностей путем использования элементов ActiveX;
- открытый OPC-интерфейс;
- мультиплатформенность (удалось достигнуть с выходом WinCC Open Architecture).

WinCC является модульной системой, функционально разделенной на менеджеры, которые могут распределяться по различным устройствам. Такая модель позволяет оптимально создавать распределенные системы с большим количеством серверов и клиентов в одной системе (2048 и 255 соответственно), а также обеспечивает широкие возможности масштабируемости системы. Масштабируемость систем на базе WinCC также достигается за счет большого

количества драйверов, осуществляющих обмен информацией с различными устройствами и смежными системами.

WinCC является частью системы комплексной автоматизации (Totally Integrated Automation), что позволяет рассматривать данную систему как одну из частей максимально унифицированного проекта. Это позволяет получить высокую интеграцию со всеми компонентами остальными компонентами в системе и возможность работы в едином информационном пространстве. Так, например, база переменных проекта доступна для инструментов разработки всех уровней, что позволяет значительно снизить ошибки при разработке, избавляет от необходимости импорта-экспорта данных, а также обеспечивает возможность одновременной работы с разными частями проекта.

При разработке проектов в WinCC используется объектно-ориентированный подход: каждый объект является образом конкретного физического устройства. Имеется возможность создания и работы с произвольными иерархическими структурами данных за счет типизации и наследования. Такие принципы относятся как к структурам данных, так и к графическим объектам.

Очень важным достоинством именно для разработчиков является возможность генерации шаблонов экранных форм (таких как интерфейс навигации, окно алармов), а также обширная библиотека стандартных элементов. За счет этого можно значительно повысить скорость разработки, а также сократить количество ошибок при создании экранных форм.

Также возможности разработчика дополняются за счет использования скриптовой обвязки на языках VBA и С, позволяющих создавать гибкие сценарии и алгоритмы визуализации.

С точки зрения удобства работы разработчика WinCC является неоднозначной системой. Для опытных пользователей данная система предоставляет большее количество возможностей по сравнению с другими системами: это и объектно-ориентированный подход, и работа в рамках концепции Totally Integrated Automation, и возможность генерации и

использования встроенных экранных форм. Однако для разработки проектов в WinCC пользователь должен иметь набор базовых и отработанных знаний и навыков. Поэтому у начинающих проектировщиков в процессе изучения и использования WinCC может возникнуть непонимание по поводу того, как правильно вести разработку ПО и как следствие, могут появиться существенные и критические ошибки в проекте. Поэтому на начальном этапе по возможности необходимо вести работу в WinCC под руководством и наблюдением опытного программиста.

К тому же серьезным недостатком WinCC можно считать направленность данной системы на использование в связке с компонентами (датчиками, контроллерами, панелями) производства компании Siemens. Хотя в теории предусматривается взаимодействие WinCC с системами и устройствами других производителей, на практике могут возникнуть значительные проблемы при его настройке. Поэтому если предполагается строить систему на основе изделий с различной номенклатурой и от различных производителей, то следует выбрать другой SCADA-пакет.

#### **4.3 Программная реализация нечеткого псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением в пакете STEP7**

Программную реализацию нечеткого псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением можно представить в виде 5 основных этапов: вычисление ошибки регулирования, реализация механизмов нечеткой логики для вычисления коэффициента  $T$  корректирующего устройства, реализация ПИД-регулятора и моделирование объекта управления. Данные операции представлены в структурном элементе проекта Step7 – организационном блоке OB1, который отвечает за циклическое выполнение программы. Сначала происходит вычисление интегральной квадратичной ошибки, которая является входным сигналом для блока нечеткой логики, в котором вычисляется значение коэффициента  $T$  передаточной функции корректирующего устройства. После этого происходит вычисление

ошибки регулирования, которая подается на вход блока нечеткого корректирующего устройства с фазовым опережением. Скорректированный сигнал подается на вход ПИД-регулятора, который в свою очередь вырабатывает управляющее воздействие на объект управления. Значение регулируемого сигнала подается на блок вычисления интегральной квадратичной ошибки, после чего весь цикл начинается заново. Блок ОВ1 реализован на языке FBD, его листинг приведен на рисунках 54 - 57.

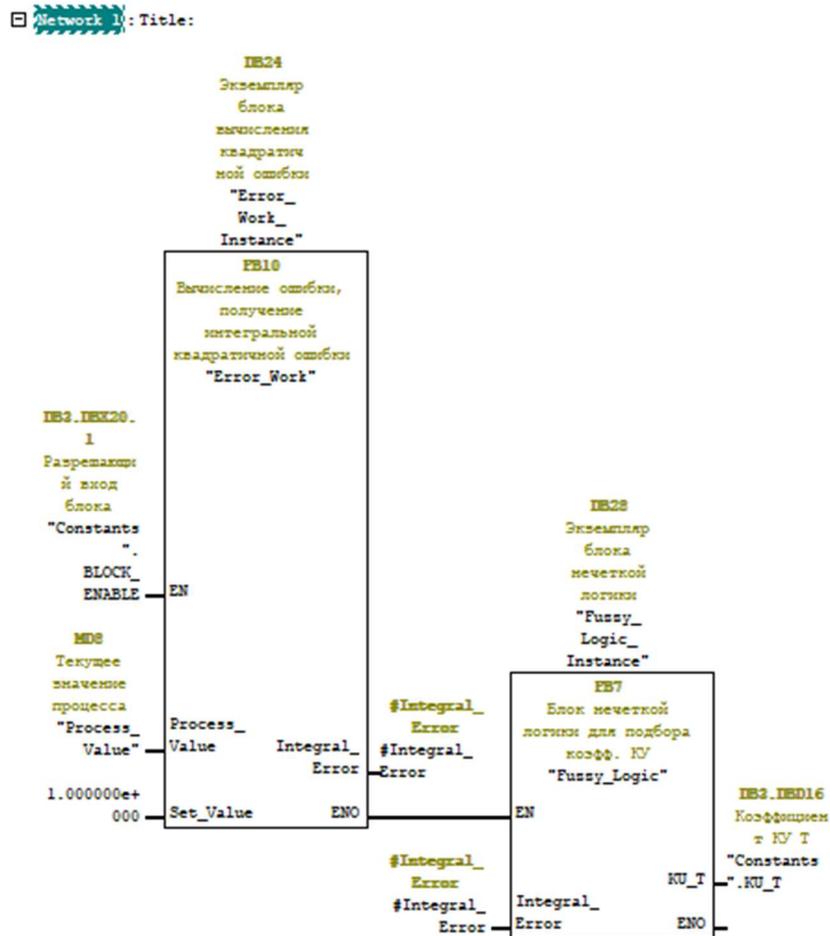


Рисунок 54 – Блок ОВ1, вычисление интегральной квадратической ошибки и блок нечеткой логики

Network 2 : Title:

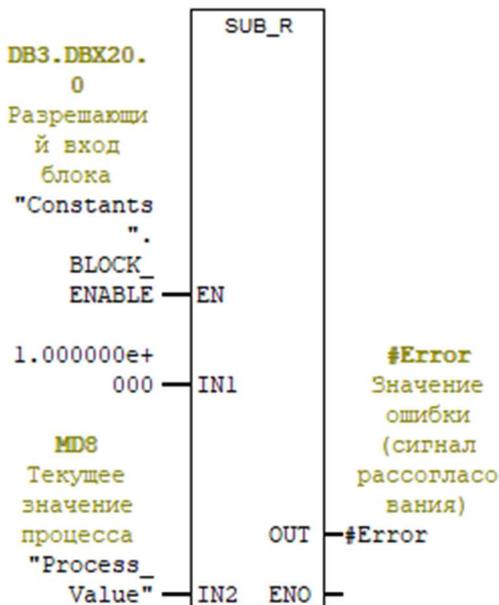


Рисунок 55 – Блок ОВ1, вычисление ошибки регулирования

Network 3 : Title:

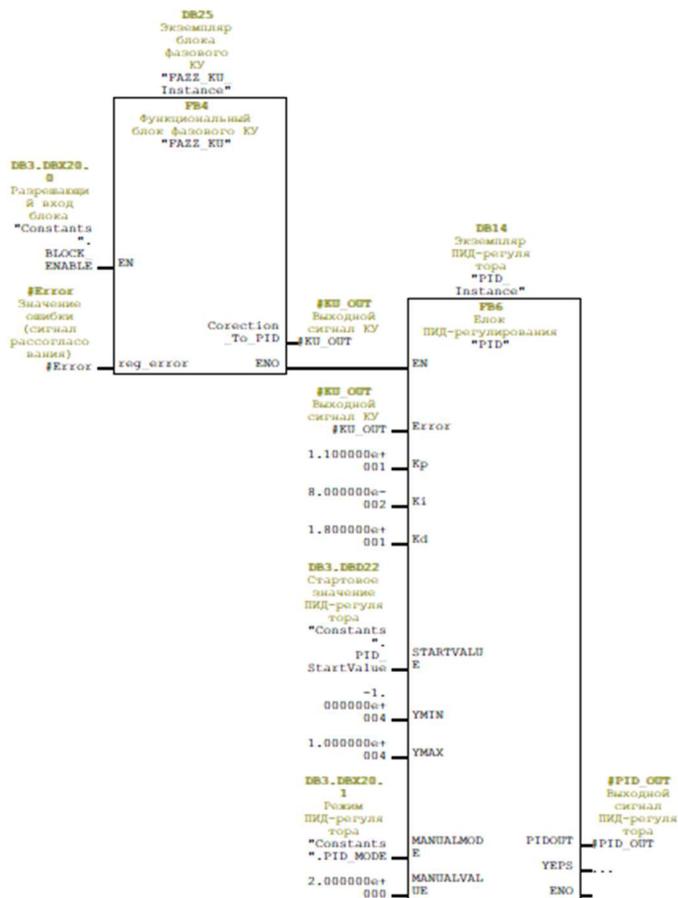


Рисунок 56 – Блок ОВ1, КУ с фазовым опережением и ПИД-регулятор

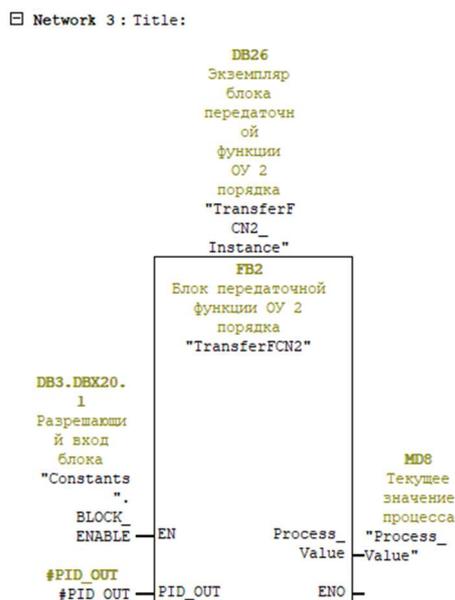


Рисунок 57 – Блок OB1, передаточная функция объекта управления второго порядка

Для реализации вышеописанных функций были применены как стандартные блоки пакета STEP7, так и пользовательские функциональные блоки, реализованные с нуля на языке FBD и SCL. Опишем их ниже

#### 4.3.1 Блок передаточной функции КУ

В данном блоке реализуется программный двойник типовой передаточной функции фазового канала псевдолинейного КУ с фазовым опережением. На вход подается значение ошибки регулирования, выходом является корректирующее воздействие.

Передаточная функция фазового канала корректирующего устройства может быть представлена в виде набора простейших математических операций и в таком случае принимает следующий вид:

$$W_{\phi} = \frac{1}{T_1} * \left( T + \frac{1}{s} \right) * \frac{1}{1 + \frac{1}{T_1} * \frac{1}{s}}. \quad (23)$$

Данная формула реализуется при помощи стандартных математических блоков STEP7, листинг блока представлен на рисунках 58 – 60.

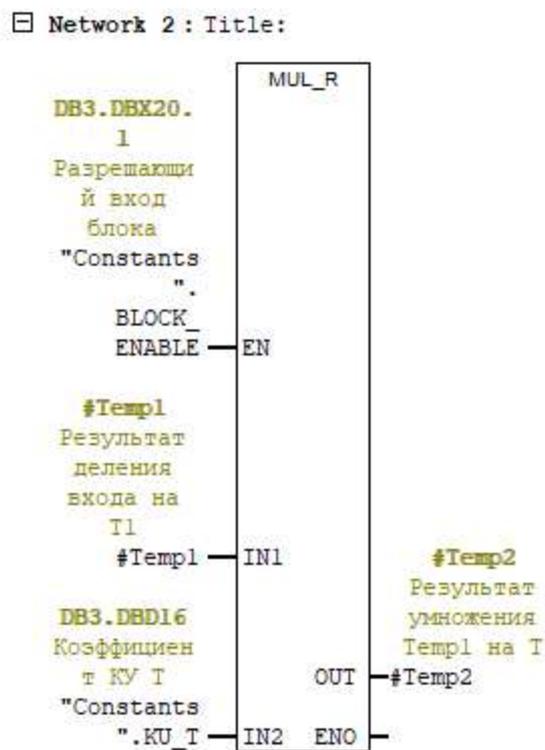
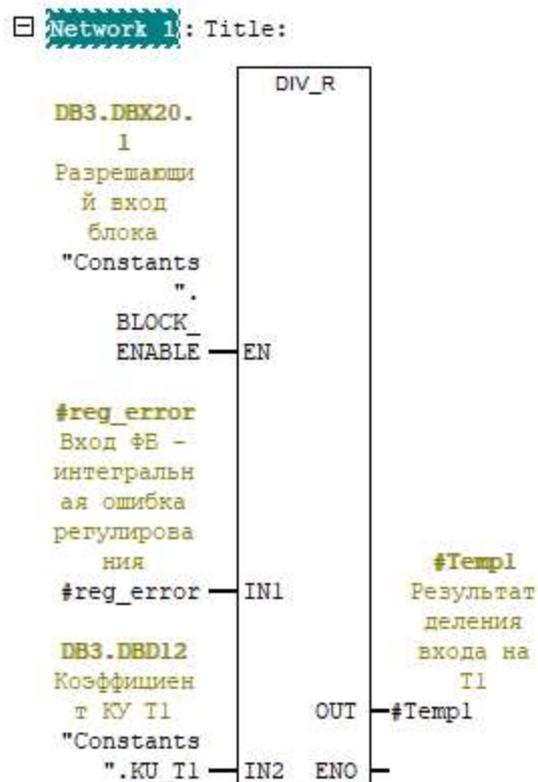
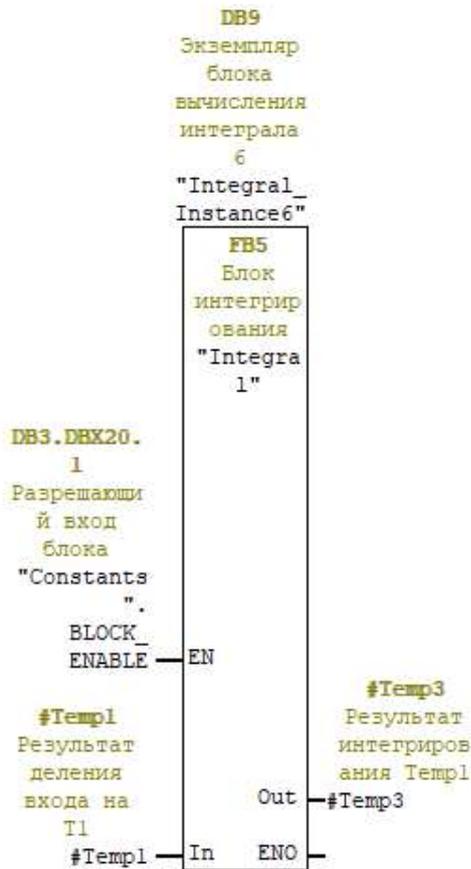


Рисунок 58 – Начало реализации передаточной функции КУ с фазовым опережением

Network 3 : Title:



Network 4 : Title:

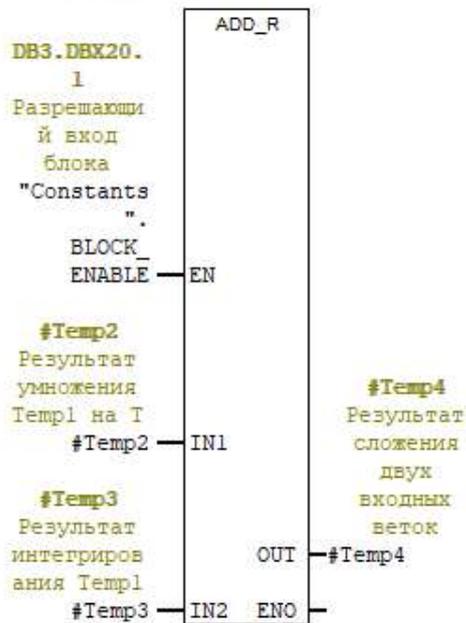
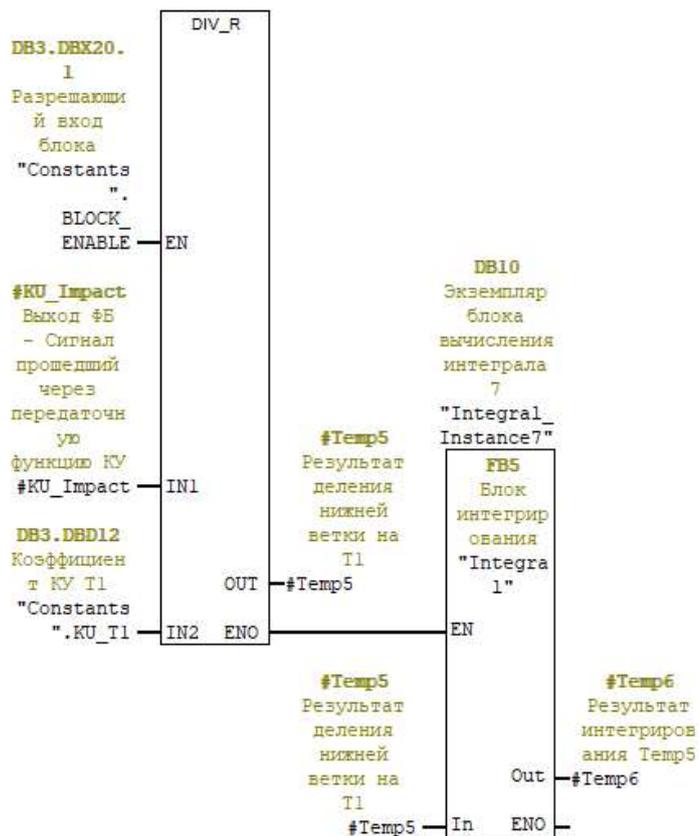


Рисунок 59 - Продолжение реализации передаточной функции КУ с фазовым опережением

Network 5 : Title:



Network 6 : Title:

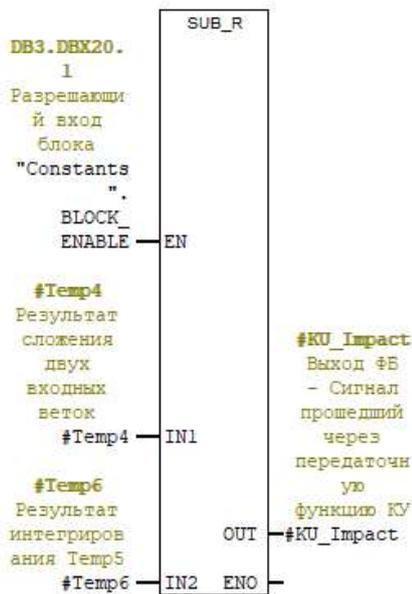


Рисунок 60 - Конец реализации передаточной функции КУ с фазовым опережением

### 4.3.2 Блок передаточной функции ОУ

В данном блоке реализуется программный двойник типовой передаточной функции объекта управления второго порядка. На вход подается управляющее воздействие с ПИД-регулятора, выходом является текущее значение процесса.

Передаточная функция объекта управления второго порядка может быть точно так же как и передаточная функция корректирующего устройства быть представлена в виде математических простейших операций:

$$W_{\phi} = \frac{K}{T_2 * s^2 + T_1 * s + 1} = K * \frac{1}{s^2} * \frac{1}{T_1} * \frac{1}{1 + \frac{T_2}{T_1} * \frac{1}{s} + \frac{1}{T_1} * \frac{1}{s^2}}. \quad (24)$$

На рисунке 61 представлена эквивалентная структурная схема ОУ второго порядка.

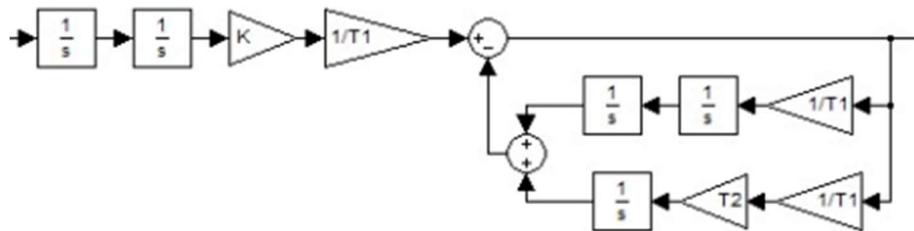


Рисунок 61 – Структурная схема объекта управления второго порядка представленная в виде простейших математических операций.

Листинг блока реализации передаточной функции объекта управления второго порядка представлен в приложении А.

### 4.3.3 Блок определения знака сигнала

Данный блок реализует определение знака входного сигнала. В случае если сигнал является положительным выход блока равен 1, в случае если сигнал отрицателен выход блока равен -1, если сигнал равен 0, то выход блока также равен 0. Листинг блока представлен на рисунке 62.

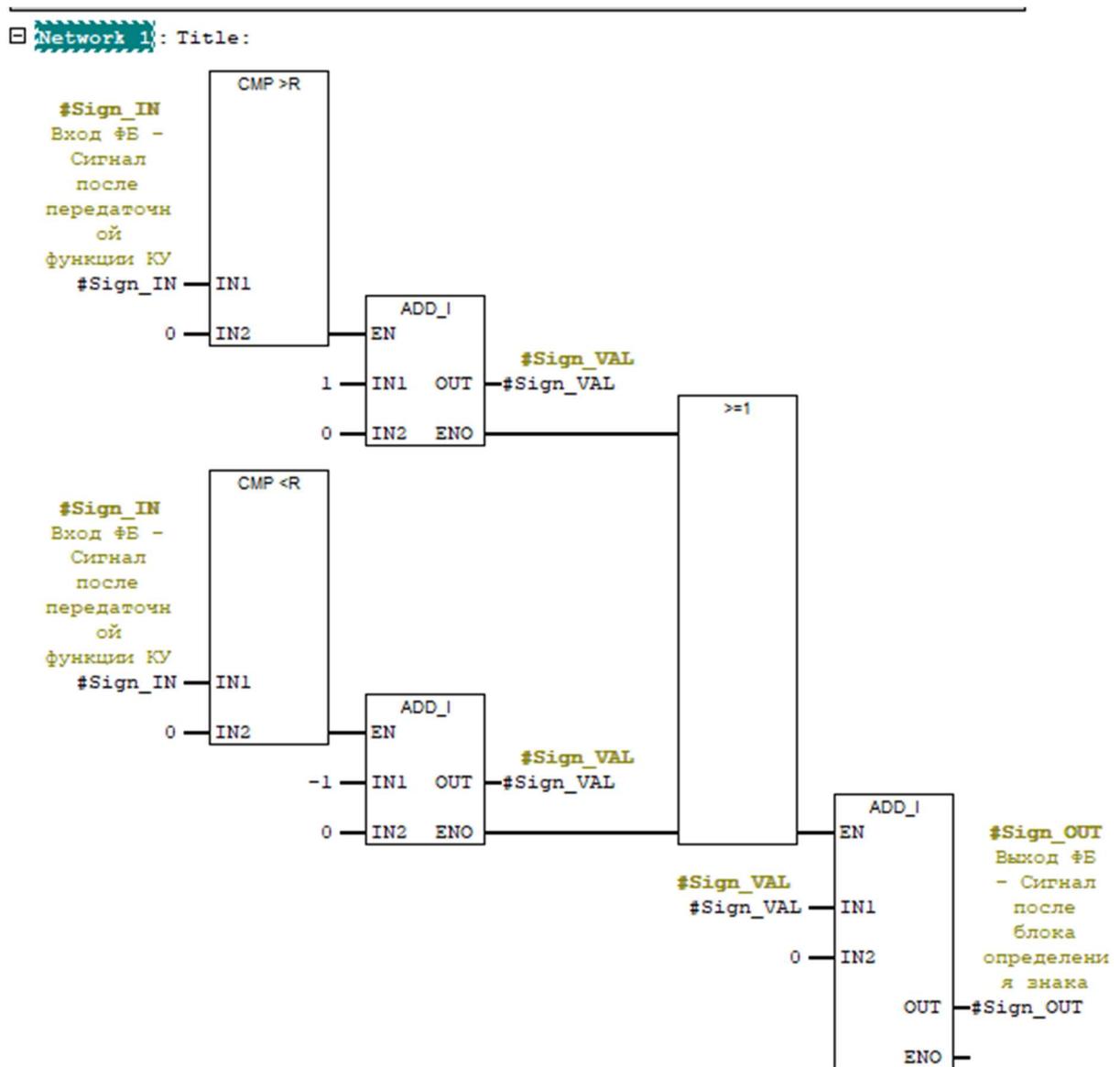


Рисунок 62 – Блок реализации функции определения знака сигнала

#### 4.3.4 Блок фазового КУ

Данный блок полностью программно повторяет структуру псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением. Нижняя ветвь реализуется при помощи пользовательских блоков передаточной функции КУ и определения знака сигнала. Верхняя ветвь реализована с помощью стандартных блоков STEP7. Выходом данного блока является произведение этих ветвей. Листинг блока представлен на рисунках 63 – 65.

Network 1: Title:

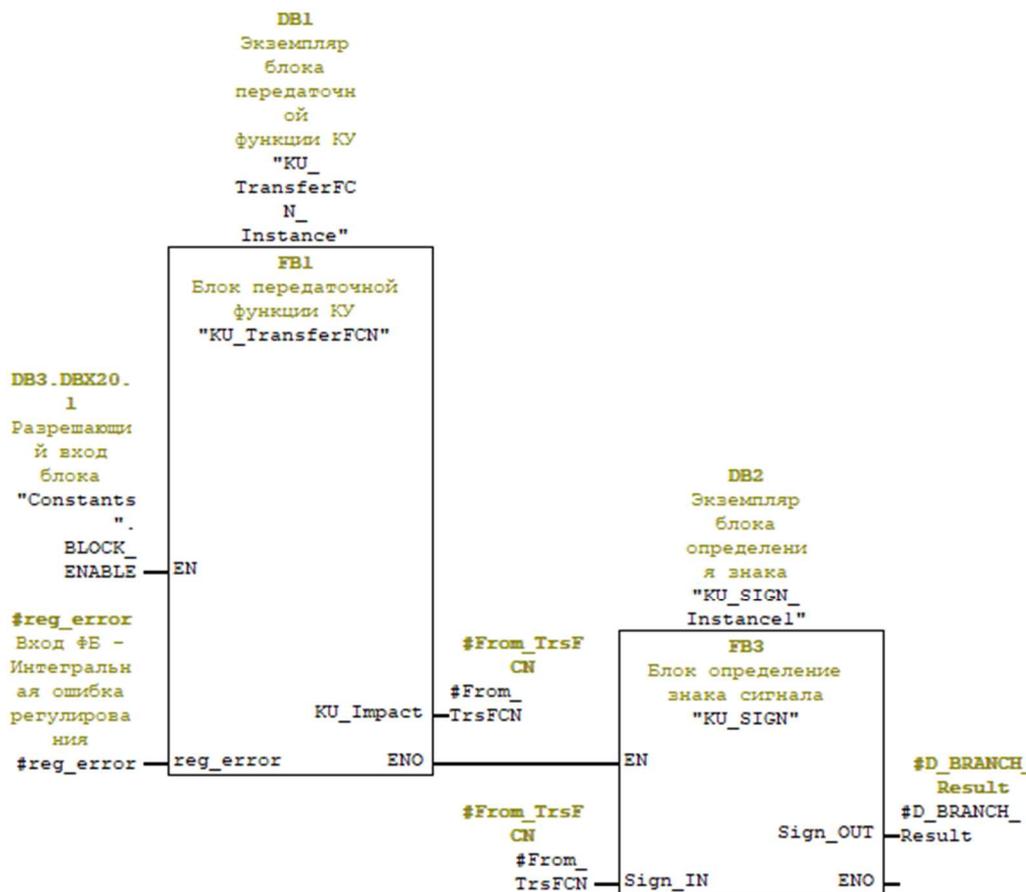


Рисунок 63 – Блок реализации КУ с фазовым опережением, начало листинга

Network 2: Title:

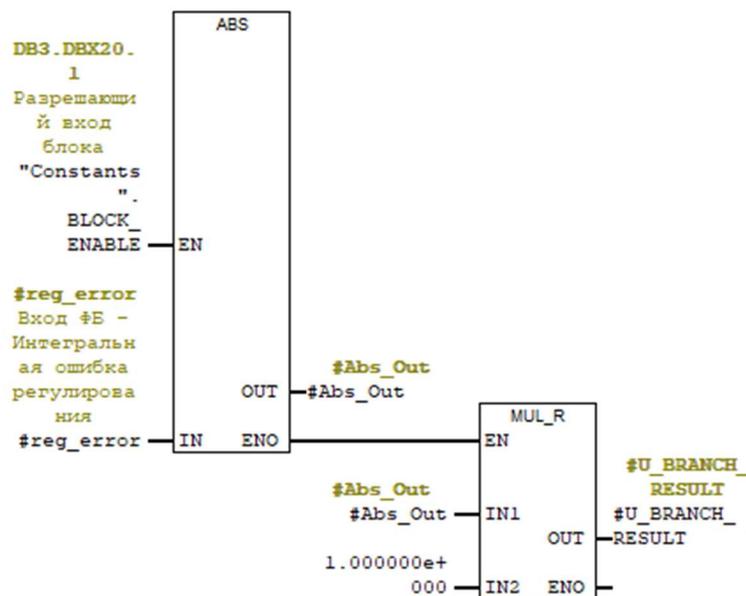


Рисунок 64 - Блок реализации КУ с фазовым опережением, продолжение листинга

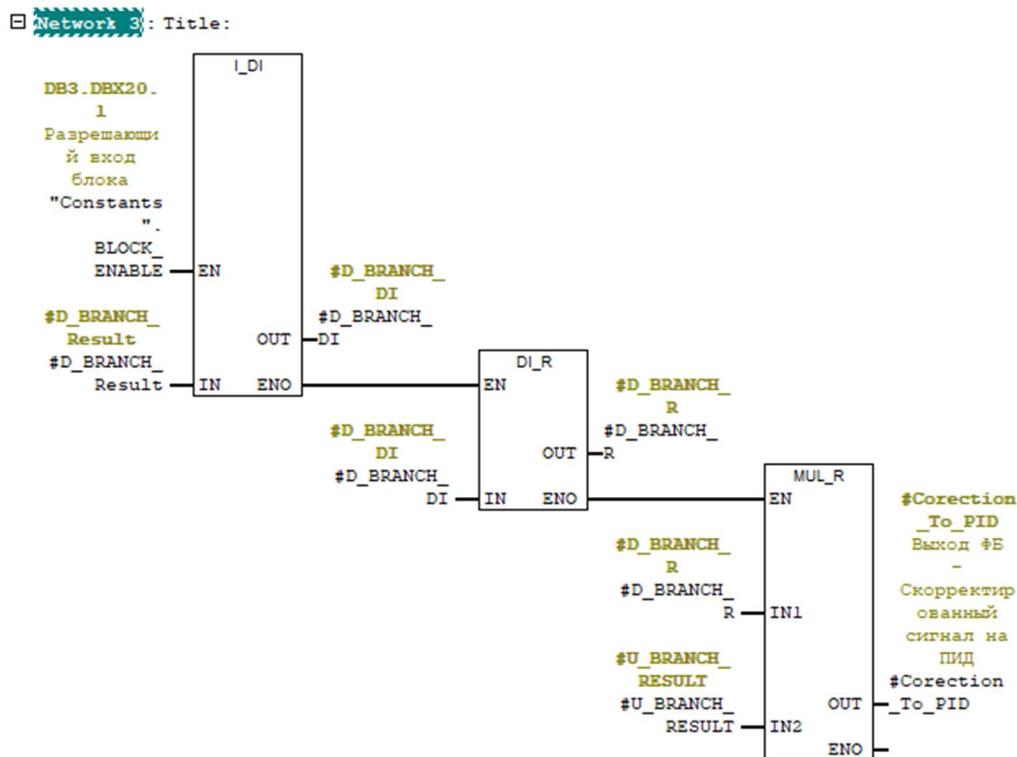


Рисунок 65 - Блок реализации КУ с фазовым опережением, конец листинга

#### 4.3.5 Блок вычисления интеграла

В основе данного блока лежит интегрирование методом левых прямоугольников, которое осуществляется по формуле:

$$\int_a^b f(x)dx = h \sum_{i=0}^{n-1} f_i = h(f_0 + f_1 + \dots + f_{n-1}). \quad (25)$$

Суть метода заключается в следующем: функция, для которой находится интеграл, аппроксимируется на малых участках при помощи прямоугольников, площади которых и принимаются за значение интеграла. Применительно к реализации на ПЛК площадь прямоугольника вычисляется как произведение значения сигнала на данном цикле на время выполнения цикла. Графическое представление данного метода показано на рисунке 66. Листинг блока приведен на рисунке 67.

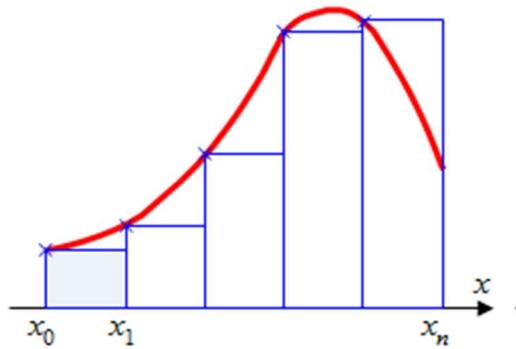


Рисунок 66 – Метод интегрирования левых прямоугольников

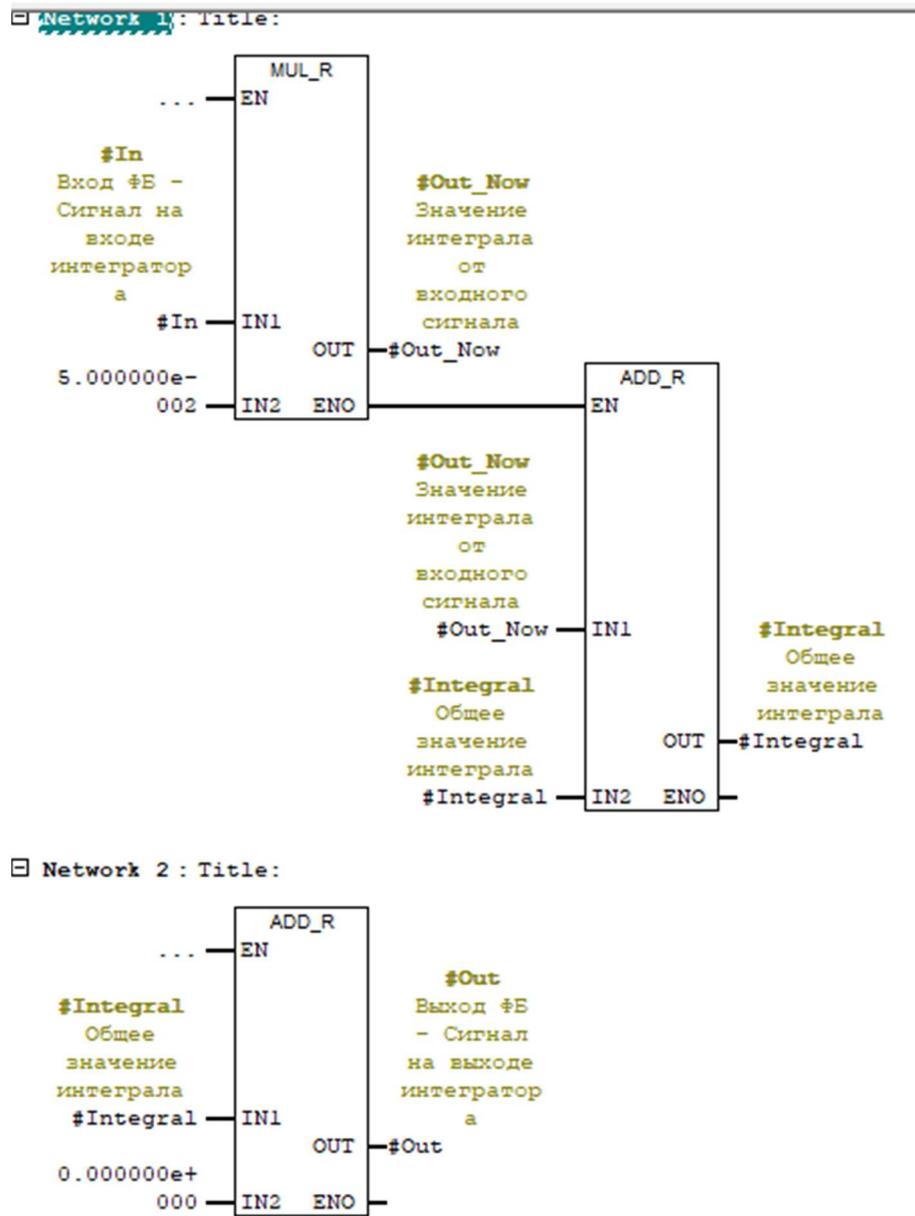


Рисунок 67 – Листинг блока интегрирования методом левых прямоугольников

### 4.3.6 Блок ПИД-регулирования

В данном блоке используется стандартная формула ПИД-регулирования

$$Y(t) = Y(0) + K_p * e(t) + K_i * \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt}. \quad (26)$$

В качестве метода дифференцирования был выбран метод левостороннего дифференцирования – в данном методе производная вычисляется как отношение разности сигналов на текущем и предыдущем цикле к времени цикла.

В качестве метода дифференцирования был выбран метод трапеций, который описывается следующей формулой:

$$\int_a^b f(x)dx = h \sum_{i=1}^n \frac{f_i + f_{i-1}}{2}. \quad (27)$$

Суть метода в целом полностью аналогична методу интегрирования прямоугольниками, за тем лишь исключением, что в данном методе площадь под интегрируемой функцией аппроксимируется при помощи трапеций. Иллюстрация метода представлена на рисунке 68.

Блок ПИД-регулирования написан на языке SCL, листинг данного блока приведен в приложении Б.

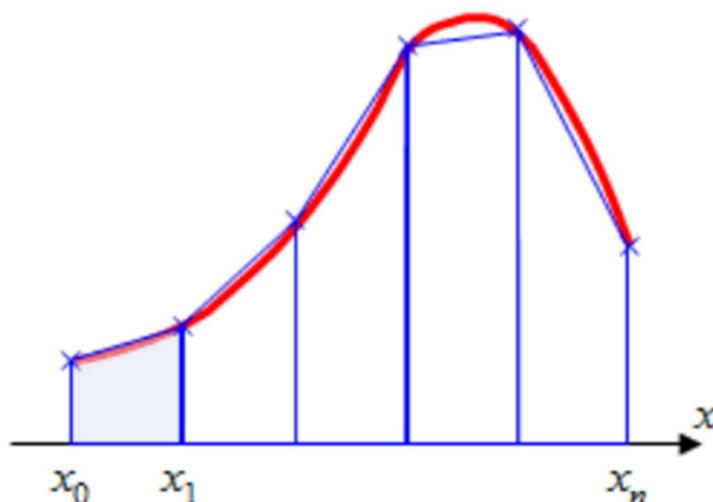


Рисунок 68 – Иллюстрация метода интегрирования трапеций

### 4.3.7 Блок переключателя

Алгоритм является по сути своей простым дискретным мультиплексором. Если на какой-либо дискретный сигнал  $d_i$  с индексом  $i$ , подается значение 1, то на выход блока коммутируется аналоговый сигнал  $a_i$  с соответствующим индексом  $i$ . В случае одновременной подачи нескольких дискретных сигналов приоритет имеет вход с меньшим индексом.

Блок переключателя написан на языке SCL, листинг данного блока приведен в приложении В.

### 4.3.8 Блок кусочно-линейной функции

Данный блок отвечает за представление функций принадлежности входного и выходного сигналов блока нечеткой логики в виде кусочно-линейных функций. Суть заключается в следующем: на вход функции поступают абсциссы и ординаты точек, определяющих функцию принадлежности, флаг-индикатор пересечения второй и третьей функций принадлежности, а также целевое значение:

- на этапе фаззификации - значение входной переменной корректирующего устройства;
- на этапе дефаззификации - степень принадлежности переменной по каждой функции.

Выходом функции является:

- на этапе фаззификации – степень принадлежности по каждой функции;
- на этапе дефаззификации – значение четкой переменной.

Стоит отдельно остановиться на этапе дефаззификации, так как именно на данном этапе и формируются значения четких переменных, которые будут подаваться на вход корректирующего устройства. В данном случае использовался полностью эмпирический метод, основанный на наблюдении за поведением блока нечеткой логики в пакете Matlab Fuzzy Logic Toolbox. Было найдено два наиболее вероятных случая работы устройства:

- в случае определения значения четкой переменной по первой функции принадлежности выходной переменной, то производится простой расчет четкого значения;
- в случае определения значения четкой переменной по второй или третьей функции либо высчитывается среднее значение между двумя абсциссами точек треугольника, соответствующих полученному на вход значению принадлежности (в случае если вторая и третья функции принадлежности не пересекаются), либо в случае пересечения берется абсцисса правого участка (в случае пересчета для второй функции принадлежности) и абсцисса левого участка (в случае пересчета для третьей функции принадлежности);
- в случае определения значения четкой переменной по четвертой функции принадлежности выходная четкая переменная является значением абсциссы функции, вычисленной на основании полученного на вход значения принадлежности (в случае, когда значение принадлежности не равно 1) или константой равной 94 (в случае, когда значение принадлежности равно 1).

Блок ПИД-регулирования написан на языке SCL, листинг данного блока приведен в приложении Г.

#### **4.3.9 Блок нечеткой логики**

Блок нечеткой логики реализуется при помощи представления функций принадлежности входных и выходных переменных в виде кусочно-линейных функций, с помощью блока описанного ранее. Значение четкой входной переменной (в данной работе входным сигналом аппарата нечеткой логики является интегральная квадратичная ошибка) подается на блок фаззификации, где определяется степень принадлежности данной переменной каждой из функций принадлежности. Далее проверяется факт пересечения второй и третьей функции принадлежности (используется в блоке кусочно-линейной функции, что описывалось ранее). После чего фаззифицированные значения поступают на блок дефаззификации, где происходит получение четкого

значения выходной переменной. Так как каждому блоку дефазификации соответствует свое четкое значение, то необходимо определить какое из них подавать на корректирующее устройство. Для этого используется блок переключателя, коммутирующего на выход значение с того блока дефазификации на вход которого было подано наибольшее значение степени принадлежности. Выход функционального блока переключателя является также и выходом функционального блока нечеткой логики (в данной работе выходным сигналом аппарата нечеткой логики является коэффициент  $T$  передаточной функции корректирующего устройства с фазовым опережением).

Листинг блока приведен в приложении Д.

#### 4.3.10 Блок вычисления интегральной квадратичной ошибки

В данном блоке происходит вычисление интегральной квадратичной ошибки регулирования. Входами блока являются значение текущей ошибки регулирования и уставки регулирования. Вычисление интегральной квадратичной ошибки реализовано на стандартных блоках STEP7, а также на пользовательском блоке вычисления интеграла. Листинг блока представлен на рисунке 69.

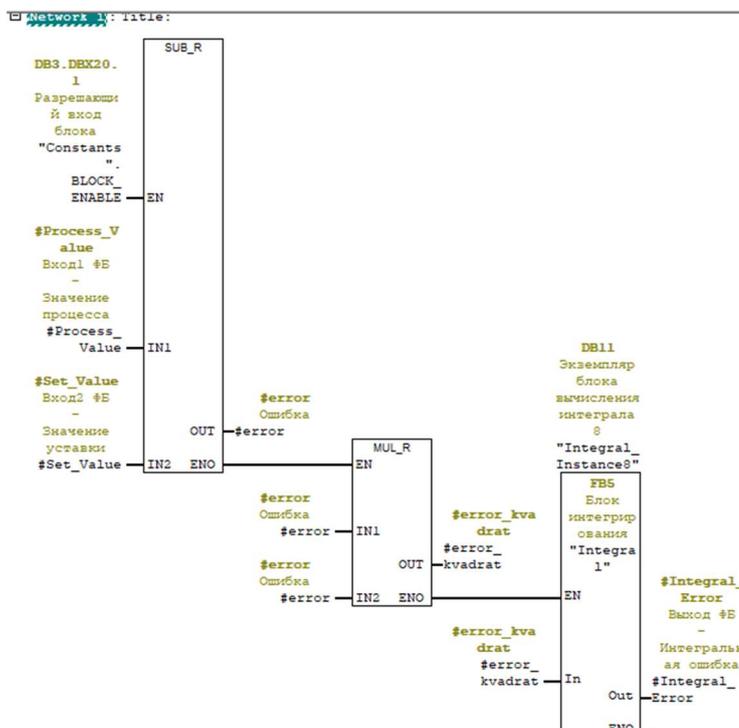


Рисунок 69 – Листинг блока вычисления интегральной ошибки

#### 4.4 Разработка панели визуализации процесса в Simatic WinCC

В SCADA-пакете WinCC была разработана простейшая панель визуализации процессов происходящих в системе управления. Связь контроллера и WinCC была установлена про помощи MPI интерфейса. Конфигурация подключения контроллера к MPI-шине в пакете STEP7 показана на рисунке 70.

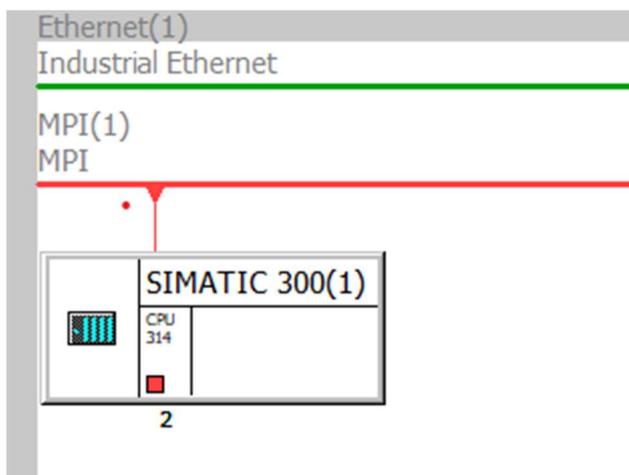


Рисунок 70 – Конфигурация MPI-соединения в пакете STEP7

В утилите WinCC Tag Management было также создано новое MPI-соединение. Его конфигурация показана на рисунках 71, 72.

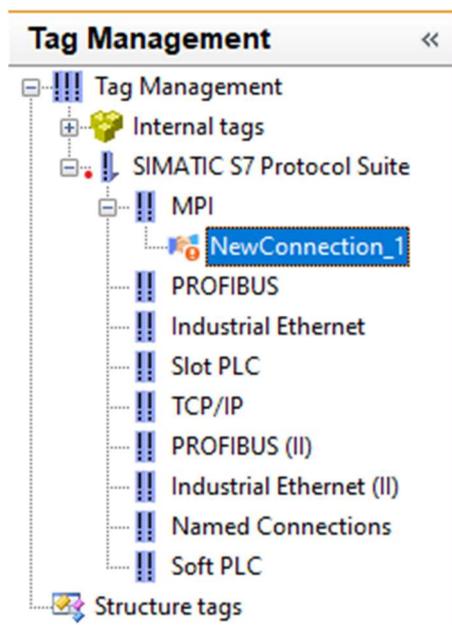


Рисунок 71 – Конфигурация MPI-соединения в пакете WinCC

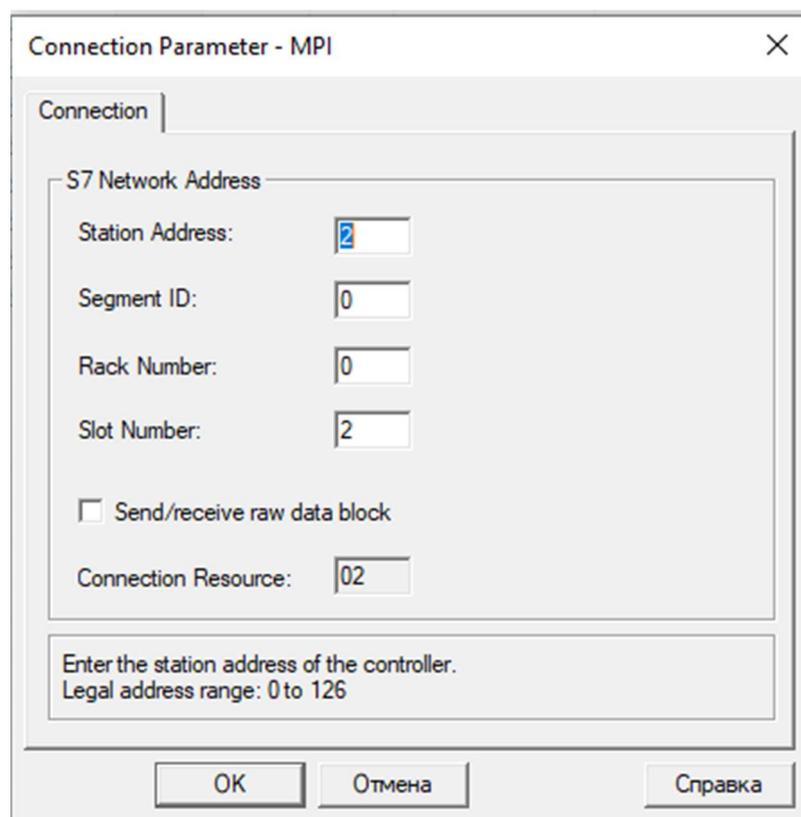


Рисунок 72 – Параметры MPI-соединения в пакете WinCC

Для каждого значения для которого необходима была визуализация на человеко-машинном интерфейсе был созданы соответствующие теги, которые при помощи адресации были связаны с экземплярами датаблоков в контроллере. Теговая структура приведена на рисунке 73.

	Name	Conn	Data type	Length	Format adaptation	Connection	Group	Address
1	Kd		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD38
2	Ki		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD34
3	Kp		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD30
4	KU_T		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD16
5	OU_K		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD8
6	OU_T1		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD4
7	OU_T2		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD0
8	ProcessValue		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB26,DD4
9	QuadraticError		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB24,DD8
10	SetPoint		Floating-point number 32-bit	4	FloatToFloat	NewConnection_1		DB3,DD42

Рисунок 73 – Структура тегов проекта WinCC

Далее была разработана мнемосхема, на которой в цифровом и графическом представлениях выводятся все необходимые для контроля величины. На рисунке 74 представлен результат работы системы управления при базовых параметрах передаточной функции объекта управления.

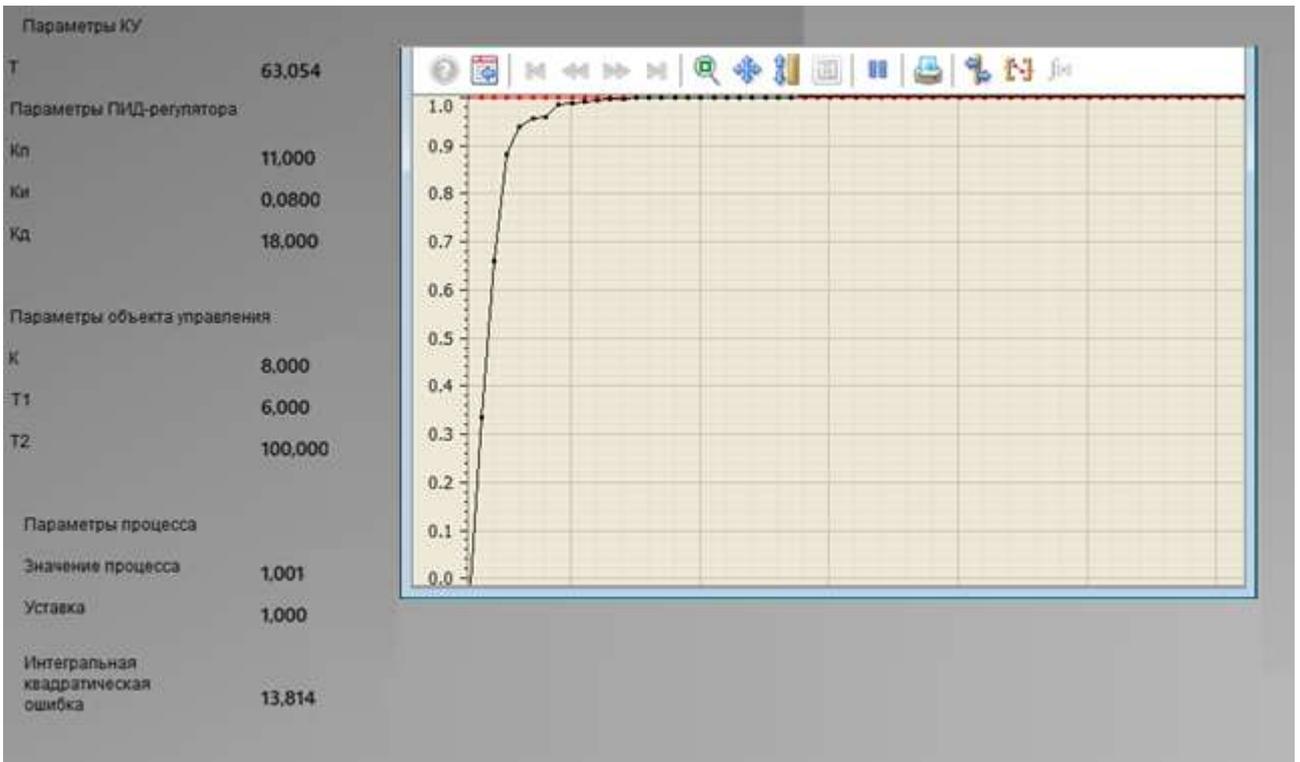


Рисунок 74 – Работа системы при базовых параметрах объекта управления

На рисунке 75 представлен результат работы системы управления при объекте управления выведенном на границу устойчивости.

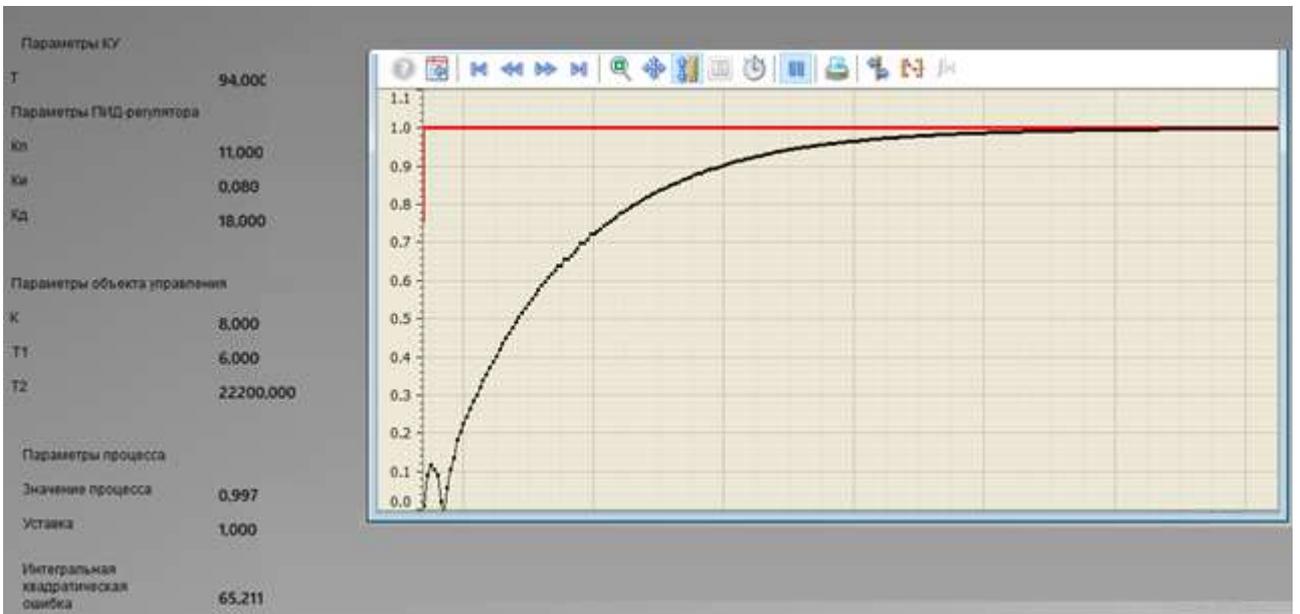


Рисунок 75 – Работа системы при объекте управления выведенном на границу устойчивости

## **5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

Целью выпускной квалификационной работы является разработка, исследование и программная реализация на контроллере псевдолинейного корректирующего регулятора для системы автоматического управления

Разработка, исследование и реализация корректирующего устройства выполняются с использованием персонального компьютера и промышленного контроллера «SIMATIC S7-300», в замкнутом помещении в условиях искусственного освещения.

Все работы проводились в 113А аудитории 10 корпуса ТПУ.

Технико-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию, а также уровня их научно-технической результативности.

### **5.1 Организация и планирование работ**

При организации процесса реализации проекта или научного исследования необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

На данном этапе создается перечень осуществляемых работ, и происходит определение исполнителей и оптимальной продолжительности. Результат планирования работ – сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее подходящим способом для этих целей будет линейный график. Для его построения нужно составить перечень работ и соответствие работ своим исполнителям. Составим такой перечень и сведем его в таблицу.

Таблица 1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работ	Исполнители	Загрузка (занятость) исполнителей
Постановка целей и задач, получение исходных данных	НР	НР – 100 %
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 50 % И – 100 %
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100 % И – 100 %
Изучение литературных источников, написание теоретической части работы и математических выкладок	И	И -100 %
Создание адаптивной САР с ПКУ	И	И -100 %
Создание программного обеспечение для ПКУ	И	И -100 %
Проведение испытаний, доработка программного обеспечения	НР, И	НР – 30 % И -100 %
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И -100 %
Оформление графического материала	И	И -100 %
Подведение итогов	НР, И	НР – 100 % И -100 %

### 5.1.1 Определение продолжительности этапов работ

Расчет продолжительности работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

В данном случае используется опытно-статистический метод. Его можно реализовать двумя способами:

- аналоговым;
- экспертным.

Для определения ожидаемого значения продолжительности работ  $t_{ож}$  применяется вероятностный метод – метод двух оценок  $t_{min}$  и  $t_{max}$ :

$$t_{ож} = \frac{3 * t_{min} + 2 * t_{max}}{5}, \quad (28)$$

где  $t_{min}$  – минимальная трудоемкость работ, чел/дн.;

$t_{max}$  – максимальная трудоемкость работ, чел/дн.

Для выполнения перечисленных в таблице работ требуются специалисты:

- инженер;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни.

Расчет длительности работ в рабочих днях осуществляется по формуле:

$$T_{РД} = t_{ож} * K_{ВН} * K_{Д}, \quad (29)$$

где  $t_{ож}$  – трудоемкость работы, чел/дн.;

$K_{ВН}$  – коэффициент выполнения работ ( $K_{ВН} = 1$ );

$K_{Д}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсации согласование работ ( $K_{Д} = 1.2$ ).

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле

$$T_{КД} = T_{РД} * T_{К}, \quad (30)$$

где  $T_{РД}$  – продолжительность выполнения этапа в рабочих днях;

$T_{КД}$  – продолжительность выполнения этапа в календарных днях;

$T_{К}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$T_K = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ПВД}}, \quad (31)$$

где  $T_{КАЛ}$  – календарные дни ( $T_{КАЛ} = 365$ );

$T_{ПВД}$  – выходные и праздничные дни ( $T_{ПВД} = 122$ ).

$$T_K = \frac{365}{365 - 122} = 1.502 \quad (32)$$

Таблица 2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Продолжительность работ			Исполнители	Трудоемкость работ по исполнителю, чел/дн			
	t <sub>min</sub>	t <sub>max</sub>	t <sub>ож</sub>		Трд		Ткд	
					НР	И	НР	И
Постановка задачи	1	2	1,4	НР	1,68	-	2,52	-
Разработка утверждение технического задания	4	6	4,8	НР, И	2,88	5,76	4,33	8,65
Разработка календарного плана	1	2	1,4	НР, И	1,68	1,68	2,52	2,52
Изучение литературных источников	7	10	8,2	И	-	9,84	-	14,78
Создание программного обеспечения для ПКУ	10	14	11,6	И	-	13,92	-	20,9
Создание программного обеспечения для ПКУ	14	20	16,4	И	-	19,68	-	29,55
Проведение испытаний, доработка программного обеспечения	5	7	5,8	НР, И	1,39	6,96	2,08	10,45
Обоснование безопасности и экономичности производства	3	5	3,8	И	-	4,56	-	6,85
Оформление расчетно-пояснительной записки	3	5	3,8	И	-	4,56	-	6,85
Оформление графического материала	5	6	3,8		-	4,56	-	6,85
Подведение итогов	1	2	1,4	И	1,68	1,68	2,52	2,52
Итого			62,4	НР, И	9,31	73,2	13,97	109,92

## 5.2 Составление сметы затрат на разработку проекта

Расчет затрат на разработку проекта необходим для соотнесения их с результатами от внедрения и использования разработки и формулировки выводов об эффективности и целесообразности осуществления комплекса работ.

Для обоснования целесообразности проекта необходимо определить затраты на всех этапах жизненного цикла продукта:

- исследование;
- разработка;
- внедрение;
- эксплуатация.

Определение затрат на разработку проекта производится путем составления сметы затрат. Результатом составления сметы является определение плановой себестоимости.

В состав затрат на исследование и разработку проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки. Расчет сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- основная заработная плата;
- дополнительная заработная плата;
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на оборудование для выполнения работ;
- амортизационные отчисления;
- прочие прямые расходы;
- накладные расходы.

### 5.2.1 Материалы и покупные изделия

Данная статья отражает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, включая расходы на их приобретение и, при необходимости – доставку. Транспортные расходы были приняты в размере 5 % от стоимости материалов. Расходы на материалы представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Материалы и покупные изделия

Наименование материалов и покупных изделий	Единица измерения	Кол - во	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
Блокнот	Штук	1	40	40
Бумага формата А4	Штук	1	150	150
Ручка	Штук	2	10	20
Карандаш	Штук	1	10	10
Итого				220

Пусть ТЗР составляет 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны  $СМАТ = 220 * 1,05 = 231$  руб.

### 5.2.2 Основная заработная плата

В этой статье расходов планируется и учитывается основная заработная плата исполнителей, непосредственно участвующих в разработке. Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада.

Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{дн}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{дн} = \frac{МО}{25,083}. \quad (33)$$

Расчеты затрат на полную заработную плату приведены в таблице 4. При расчете учитывалось, что в году 301 рабочий день и, следовательно, в месяце 25,083 рабочих дня.

Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 2. Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент дополнительной заработной платы  $K_{РП} = 1,1$ ;  $K_{дон.ЗП} = 1,188$ ;  $K_p = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной (базовой) суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку (зарплатной части сметы) необходимо первую умножить на интегральный коэффициент  $K_u = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$

Таблица 4 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./раб. день	Затраты времени, раб.дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	33664	1342,10	9	1,699	20522,05
И	15470	616,75	73	1,699	76493,65
Итого:					97015,70

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили  $C_{осн} = 97015,70$  руб.

### 5.2.3 Дополнительная заработная плата

Затраты по этой статье составляют отчисления по единому социальному налогу (ЕСН).

Отчисления по заработной плате определяются по формуле:

$$C_{соц.} = C_{зн} * 0,3, \quad (34)$$

где  $C_{соц.}$  – коэффициент, учитывающий размер отчислений из заработной платы. Данный коэффициент составляет 30% от затрат на заработную плату и включает в себя:

- отчисление в пенсионный фонд;
- на социальное страхование;
- на медицинское страхование;

Отчисления из заработной платы составили:

$$C_{дон/зн} = 0,3 \cdot 97015,70 = 29104,71 \text{ руб.} \quad (35)$$

### 5.2.4 Расходы на оборудование для выполнения работ

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле:

$$C_{эл.об.} = P_{об} * t_{об} * Ц_э, \quad (36)$$

где,  $P_{об}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$Ц_э$  – тариф на 1 кВт\*час;

$t_{об}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $Ц_э = 6,59$  руб/кВт\*час (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 2 для инженера ( $T_{РД}$ ) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{об} = T_{РД} * K_t. \quad (37)$$

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{об} = P_{НОМ} * K_C, \quad (38)$$

где  $P_{НОМ}$  – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_C$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице.

Таблица 5 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$ , час	Потребляемая мощность $P_{об}$ , кВт	Затраты $Э_{об}$ , руб.
ПК	324,5	0,3	641,53
Принтер	1	0,1	0,66
Итого:			642,19

### 5.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A * C_{OB} * t_{pф} * \eta}{F_D}, \quad (39)$$

где  $N_A$  – годовая норма амортизации,  $N_A = 25\%$ ;

$C_{OB}$  – цена оборудования,  $C_{OB} = 45000$  руб.;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени,  $F_D = 2384$  часа;

$t_{pф}$  – фактическое время работы оборудования при создании программного продукта,  $t_{pф} = 384$  часа;

$\eta$  – число задействованных ПЭВМ,  $\eta = 1$ .

Таким образом, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{AM} = \frac{0,25 * 45000 * 324 * 1}{2384} = 1528,94 \text{ руб.} \quad (40)$$

Для принтера  $C_{OB} = 12000$  руб., его  $F_D = 500$  час.,  $N_A = 50\%$ , тогда его амортизация составит:

$$C_{AM} = \frac{0,5 * 12000 * 1}{500} = 36 \text{ руб.} \quad (41)$$

Итого  $C_{AM} = 1528,94 \text{ руб.} + 36 \text{ руб.} = 1564,94 \text{ руб.}$

### 5.2.6 Прочие прямые расходы

В статье «прочие прямые расходы» отражены расходы на разработку инструментального средства, не учтенные в предыдущие статьи. Прочие расходы составляют 5% от затрат на разработку без учета накладных расходов и проводятся по формуле:

$$C_{проч} = (C_{mat} + C_{зн} + C_{соц} + C_{эл.об.} + C_{ам}) * 0,1 \quad (42)$$

Подставим значения и вычислим:

$$C_{пр} = (231 + 97015,70 + 29104,71 + 642,19 + 1564,94) * 0,1 = 12856 \text{ руб.}$$

### 5.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

Проведя расчет сметы затрат на разработку, можно определить общую стоимость разработки проекта.

Таблица 7 – Смета затрат

№	Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1	Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	231
2	Основная заработная плата	$C_{\text{зн}}$	97015,70
3	Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	29104,71
4	Расходы на электроэнергию	$C_{\text{эл}}$	642,19
5	Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	1564,94
6	Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	-
7	Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	12856
	Итого		141414,54

Таким образом, расходы на разработку составили  $C = 141414,54$  руб.

### 5.2.8 Прибыль

Примем прибыль в размере 5 – 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем случае она составляет 28282,90 руб. (20%) от расходов на разработку проекта.

### 5.2.9 НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли:  $(141604,73 + 28320,95) \cdot 0,18 = 30545,54$  руб.

### 5.2.10 Цена разработки НИР

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС, в нашем случае:

$$Ц = 141414,54 + 28282,9 + 30545,54 = 200242,98 \text{ руб.}$$

### **5.3 Оценка экономической эффективности проекта**

В рамках работы не представляется возможным оценить экономическую эффективность проекта, потому что для этого необходимо проводить полноценное исследование. Невозможность оценки обусловлена тем, что информация о прототипах и аналогах корректирующего устройства рассеяна, в связи с чем в рамках данной работы невозможно ее систематизировать.

Экономический эффект характеризуется повышением качества регулирования систем автоматического управления, а также снижением длительности перебоев в работе т.к. принцип регулирования, реализованный в ПО, позволяет избежать пауз для перенастройки оборудования под изменившиеся параметры системы. Разрабатываемые метод и ПО могут быть реализованы в широком круге производств, и направлены на внедрение особенно в сфере непрерывных производств, таких как нефтепереработка, производство теплоэнергии и электроэнергии.

## **6 Социальная ответственность**

Целью выпускной квалификационной работы является разработка, исследование и программная реализация на контроллере псевдолинейного корректирующего регулятора для системы автоматического управления

Разработка, исследование и реализация корректирующего устройства выполняются с использованием персонального компьютера и промышленного контроллера «SIMATIC S7-300», в замкнутом помещении в условиях искусственного освещения.

Все работы проводились в 113А аудитории 10 корпуса ТПУ.

### **6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

К правовым нормам, регламентирующим эргономические требования к рабочей зоне исследователя относятся следующие нормативные документы:

1. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)
2. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
3. ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
4. ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.
5. ГОСТ Р 50923-96. Дисплей. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения.
6. ГОСТ 12.2.061-81 ССБТ. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам.
7. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

8. ГОСТ 21889-76. Система «человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования.

9. ГОСТ Р ИСО 6385-2016. Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем.

В соответствии с 94 статьей ТК РФ длительность рабочей смены для работников, занятых на работах с вредными и (или) опасными условиями труда, где установлена сокращенная продолжительность рабочего времени, максимально допустимая продолжительность ежедневной работы (смены) не может превышать:

- при 36-часовой рабочей неделе – 8 часов;
- при 30-часовой рабочей неделе и менее – 6 часов.

В течение рабочего дня (смены) работнику должен быть предоставлен перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается.

При выполнении работы нагрузка в основном приходится на центральную нервную систему, в связи с умственным характером работы. Поэтому очень важно, чтобы рабочее место отвечало требованиям техники безопасности и было комфортным. Правильно организованное рабочее место обеспечивает работнику удобное положение при работе и высокую производительность труда при наименьшем физическом и психическом напряжении.

Согласно ГОСТ 12.2.032-78, конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должно соответствовать антропометрическим, физическим и психологическим требованиям. Большое значение имеет также характер работы. В частности, при организации рабочего места должны быть соблюдены следующие основные условия:

- оптимальное размещение оборудования, входящего в состав рабочего места;

- достаточное рабочее пространство, позволяющее осуществлять все необходимые движения и перемещения;
- необходимо естественное и искусственное освещение для выполнения поставленных задач;
- уровень акустического шума не должен превышать допустимого значения.

Главными элементами рабочего места являются письменный стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя. Поэтому для исключения возникновения заболеваний, связанных с малой подвижностью работника, необходимо иметь возможность свободной перемены поз. Также необходимо соблюдать режим труда и отдыха с перерывами, заполняемыми “отвлекающими” мышечными нагрузками на те звенья опорно-двигательного аппарата, которые не включены в поддержание основной рабочей позы.

Рабочий стул должен быть снабжен подъемно-поворотным механизмом. Высота сиденья должна регулироваться в пределах (400 – 500) мм. Глубина сиденья должна составлять не менее 380 мм, а ширина – не менее 400 мм. Высота опорной поверхности спинки не менее 300 мм, ширина – не менее 380 мм. Угол наклона спинки стула к плоскости сиденья должен изменяться в пределах (90 – 110)°.

## **6.2 Производственная безопасность**

Работы по исследованию и реализации корректирующего устройства относятся к категории работ, связанных с опасными и вредными производственными факторами.

Вредные производственные факторы – факторы, воздействие которых на человека может привести к его заболеванию и снижению работоспособности.

Опасные производственные факторы – факторы, воздействие которых может привести к травме, отравлению, внезапному резкому ухудшению здоровья или смерти человека.

Перечень возможных опасных и вредных факторов представлен в таблице 8.

Таблица 8 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
1. Отклонение показателей микроклимата	+	+		СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
2. Превышение уровня шума	+	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
3. Отсутствие или недостаток естественного света (освещенность)	+	+		СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
4. Физические и нервно-психические перегрузки	+	+		ГОСТ 12.1.019-2017 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
Электробезопасность (возможность поражения электрическим током от источников питания ПК и ПЛК, при соприкосновении с не заизолированными проводниками и при коротком замыкании в электрической цепи);	+	+		СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы"

### 6.2.1 Отклонение показателей микроклимата

Требования к параметрам микроклимата определяются согласно СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

Показателями, характеризующими микроклимат в производственных помещениях, являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей;

- относительная влажность воздуха.

Показатели микроклимата должны обеспечивать сохранение теплового баланса человека с окружающей средой и поддержание оптимального или допустимого теплового состояния организма, что позволяет обеспечивать высокий уровень работоспособности.

Отклонение показателей микроклимата может быть вызвано конструктивными особенностями производственного помещения, функционированием производственного оборудования, климатическими условиями окружающей среды.

Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	(22 – 24)	(21 – 25)	(40 – 60)	0,1
Теплый	Ia (до 139)	(23 – 25)	(22 – 26)	(40 – 60)	0,1

В целях профилактики неблагоприятного воздействия микроклимата и поддержания его оптимальных условий должны быть использованы защитные мероприятия: введение системы местного кондиционирования воздуха, воздушное душирование, спецодежда и средства индивидуальной защиты, помещения для отдыха и обогрева, регламентация времени работы, сокращение рабочего дня и т.д.

### 6.2.2 Превышение уровня шума

Во время разработки описываемой системы основными источниками шума является ПК.

Шум – это беспорядочные звуковые колебания разной физической природы, характеризующиеся случайным изменением амплитуды, частоты и т.д.

Шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты.

Допустимый уровень шума – это уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к шуму.

Допустимые шумовые характеристики рабочих мест регламентируются согласно [30]. Выполняемые работы можно отнести к конструированию, проектированию и программированию, рабочее место при этом располагается в лаборатории для теоретических работ и обработки данных. Исходя из этого, уровень звука должен находиться в пределах 50 дБА, согласно вышеприведенному нормативному документу. Уровень шума исправного современного компьютера находится в пределах от 35 до 50 дБА. Рабочее место удовлетворяет нормативным требованиям.

В качестве мер защиты от шума можно применить отделку рабочего помещения и готового устройства звукопоглощающими и звукоизоляционными материалами.

### **6.2.3 Освещение**

Недостаточная освещенность рабочей зоны может быть обусловлена особенностями устройства производственных помещений (недостаток источников естественного света), а также недостаточным количеством источников искусственного света.

Плохое освещение негативно воздействует на зрение, протекание биологических ритмов внутри организма, приводит к быстрому утомлению, снижению работоспособности, вызывает дискомфорт, является причиной головной боли и бессонницы. Все вышеприведенные факторы могут стать причинами несчастных случаев.

Обычно на производстве пользуются двумя видами освещения — естественным и искусственным. Как естественный, так и искусственный свет способствует усилению деятельности человека.

При разработке описываемой системы недостаток освещения может быть особенно ощутим при работе с ПК на котором производятся все учебные и исследовательские работы.

Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК согласно [31]. Данные требования представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК

Освещенность на рабочем столе	(300 – 500) лк
Освещенность на экране ПК	не выше 300 лк
Блики на экране	не выше 40 кд/м <sup>2</sup>
Прямая блескость источника света	200 кд/м <sup>2</sup>
Показатель ослеплённости	не более 20
Показатель дискомфорта	не более 15
Отношение яркости:	
– между рабочими поверхностями	3:1–5:1
– между поверхностями стен и оборудования	10:1
Коэффициент пульсации:	не более 5%

В случае недостатка освещения можно предложить к исполнению следующие мероприятия: введение дополнительных источников искусственного света, помещения для отдыха, регламентация времени работы, сокращение рабочего дня и т.д.

#### **6.2.4 Психические и физические перегрузки**

Появление данных факторов связано с длительным нахождением в одной рабочей позе, повторением стереотипных однотипных движений, ненормированным рабочим днем и временем отдыха. В результате физических перегрузок нарушается кровообращение в области таза и нижних конечностей,

а также становится возможным появление болезней позвоночника, таких как остеохондроз. Результатом психических перегрузок является умственное перенапряжение, перенапряжение органов слуха и зрения.

В целом к рабочему месту исследователя можно предъявить следующие основные требования: конструкция рабочего места и взаимное расположение всех его элементов должны обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины, обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы.

Также очень важно поддерживать оптимальный режим труда и отдыха, для профилактики и предотвращения психического и физического переутомления.

#### **6.2.5 Электробезопасность**

Процесс разработки описываемой системы связан с риском поражения электрическим током, который возникает в сети запитывания ПК и ПЛК «SIMATIC S7-300», в случае прикосновения к не заизолированным или поврежденным проводникам электрического тока. Действие электрического тока на организм носит разносторонний характер. Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает термическое, электролитическое и биологическое воздействие на различные системы организма и может вызвать нарушения в работе жизненно-важных органов.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с компьютером и ПЛК в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35 °С), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного соприкосновения к имеющим соединение с землей металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов согласно [32]. Данные показатели представлены в таблице 10.

Таблица 10 – Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t, с										
		0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Переменный, 50 Гц	U, В	550	340	160	135	120	105	95	85	75	70	60
	I, мА	650	400	190	160	140	125	105	90	75	65	50

В качестве мер защиты от прямого контакта с проводниками тока, согласно [33], необходимо применять следующие защитные меры:

- основная изоляция;
- защитные оболочки;
- безопасное расположение токоведущих частей, размещение их вне зоны досягаемости частями тела, конечностями.

Все вышеперечисленные меры защиты соблюдены на рабочем месте.

### 6.3 Экологическая безопасность

Работы, проводимые при разработке системы не несут за собой значительного загрязнения окружающей среды, что отмечает необходимость в применении средств защиты атмосферы, гидросферы, литосферы.

Исключением являются лишь случаи утилизации персонального компьютера, как твердого отхода и как следствие загрязнение почвы или выбросы в атмосферу загрязняющих веществ, углекислого газа, образование тепла в случае пожара.

При завершении срока службы ПК, их можно отнести к отходам электронной промышленности. Пластмассовые части ПК утилизируются при высокотемпературном нагреве без доступа воздуха. Части компьютера, печатные платы, содержащие тяжелые металлы и замедлители горения могут при горении выделять опасные диоксиды. Поэтому для опасных отходов

существуют специальные печи, позволяющие использовать теплоту сжигания. Но подобный способ утилизации является дорогостоящим, поэтому не стоит исключать вероятность образования токсичных выбросов.

Отходы, не подлежащие переработке и вторичному использованию подлежат захоронению на специализированных полигонах.

#### **6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

С учетом специфики разрабатываемой системы с наибольшей вероятностью чрезвычайной ситуацией при разработке и эксплуатации устройства будет являться пожар. Возникновение пожара может быть связано с неисправностью проводки.

В качестве мероприятий профилактики пожаров должны быть осуществлены следующие пункты:

- наличие средств пожаротушения;
- правильный выбор электрооборудования и способов его монтажа с учетом пожароопасности окружающей среды;
- оборудование эффективной вентиляции, исключающей возможность образования в помещении взрывоопасной смеси;
- запрещение курения и разведения огня в пожароопасных и взрывоопасных помещениях.

В случае пожара необходимо предпринять следующие действия:

- Вызвать пожарных по телефону «01», «101» или «112». Сообщить информацию об адресе, горящем объекте, а также фамилию и имя звонящего, номер телефона.
- При небольшом возгорании попытаться потушить пожар имеющимися средствами пожаротушения. Запрещается тушить водой электроприборы.
- При значительном распространении пламени немедленно покинуть помещение. Пользоваться лифтами запрещается.

- При задымлении путей эвакуации дышать через влажную ткань, передвигаться, пригибаясь к полу.
- При невозможности покинуть помещение — оставаться в комнате, закрыв окна и двери, привлекать внимание очевидцев через стекло.
- Встретить пожарных, показать машине удобный путь к очагу возгорания.

Причиной пожара в лаборатории могут стать неисправное электрооборудование, неисправности в электропроводке, электрических розетках и выключателях.

Для исключения возникновения пожара по этим причинам необходимо проводить плановый осмотр, вовремя выявлять и устранять неисправности и не использовать неисправные электроприборы.

Обогревание помещения открытыми электронагревательными приборами могут привести к пожару, т.к. в помещении находятся бумажные документы и справочная литература. Следовательно, использование открытого нагревательного прибора неприемлемо.

В целях уменьшения вероятности возникновения пожара вследствие короткого замыкания необходимо, чтобы электропроводка была скрытой.

В летний период во время грозы возможно попадание молнии вследствие чего возможен пожар. Во избежание этого рекомендуется установить на крыше здания молниеотвод.

Несоблюдение мер пожарной безопасности и курение в помещении также может привести к пожару. Поэтому курение в помещении лаборатории необходимо категорически запретить.

При возникновении пожара здание необходимо покидать в соответствии с планом эвакуации, которые размещены на каждом этаже.

### **Вывод по разделу «Социальная ответственность»**

Во время работы над разделом «Социальная ответственность» были установлены опасные и вредные факторы, имеющие место при разработке и

эксплуатации нечеткого псевдолинейного регулятора. Выявлены такие факторы как: микроклимат, шум, освещенность, физические и нервно-психические перегрузки. Была приведены нормативные документы, регламентирующие требования безопасности.

Для каждого фактора были предложены меры минимизации влияния на людей и окружающую среду. Соблюдение данных мер позволяет обеспечить соответствие рабочего места исследователя и конечного устройства регламентированным требованиям безопасности.

## Заключение

В рамках данной работы был проведен обзор основных видов существующих корректирующих устройств. Для исследования был сделан выбор в пользу псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением. Было проведено моделирование работы данного устройства применительно к объекту управления второго порядка. Моделирование показало, что влияние корректирующего устройства на качество процесса регулирования полностью зависит от параметров корректирующего устройства.

Также в работе были рассмотрены теоретические основы нечеткой логики и построение нечетких управляющих систем. На основе данных материалов в пакетах MATLAB Simulink и MATLAB Fuzzy Logic Toolbox была проведена разработка и моделирование псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением с подстройкой параметров через блок нечеткой логики. В случаях большого диапазона изменения параметров объекта управления введение нечетких устройств регулирования помогает обеспечить необходимое качество регулирования и является более предпочтительным вариантом по сравнению с обычными устройствами. В результате исследования было замечено, что введение нечеткого корректирующего устройства в систему автоматического регулирования позволяет повысить качество регулирования при изменяющемся объекте управления за счет подстройки коэффициента его передаточной функции, и обеспечивает либо равноценное (в сравнении с обычным ПИД-регулятором), либо более высокое (в сравнении с нечетким ПИД – регулятором) качество регулирования. Однако также стоит отметить, что нечеткое КУ проигрывает в быстродействии обычному ПИД – регулятору (в случае базовых параметров объекта управления) и нечеткому ПИД – регулятору (в случае выхода объекта управления на границу устойчивости). Данная проблема может быть решена введением дополнительного контура нечеткого регулирования для коэффициента усиления корректирующего устройства. Учитывая тот факт, что по сравнению с синтезом нечеткого ПИД –

регулятора синтез нечеткого КУ является более простой задачей (меньшее количество функций принадлежности входных и выходных переменных, более простая база правил), такой вариант является наиболее оптимальным.

Также нечеткое псевдолинейное корректирующее устройство было реализовано программно в пакете STEP7. В процессе реализации использовались как стандартные блоки пакета, так и пользовательские функциональные блоки. Разработка производилась на языках FBD и SCL.

## **The conclusion**

In this paper, a review of the main types of corrective devices was carried out. For the study, a choice was made in favor of a pseudo-linear corrector with a phase advance. Models of the operation of this device were carried out in relation to a second-order control object. Simulation has shown that the influence of the correcting device on the quality of regulation completely depends on the parameters of the correcting device.

Also, the work considered the theoretical foundations of fuzzy logic and the construction of fuzzy control systems. On the basis of these materials in the MATLAB Simulink and MATLAB Fuzzy Logic Toolbox packages, the development and simulation of a pseudo-linear correcting device with a phase advance with adjustment of parameters through a fuzzy logic block was carried out. The results of the study showed that with the basic parameters of the object, the control gives a slight improvement in the quality of the regulation process. As when the parameters of the control object change, the fuzzy correcting device gives a significant gain in the transient process compared to the conventional correcting process, which in the worst case does not provide the required quality and the system at a given setpoint at all.

Also, a fuzzy pseudo-linear correcting device was implemented in software in the STEP7 package. In the process of implementation, both the building blocks of the package and custom function blocks. The development was carried out in the FBD and SCL languages.

## Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. – М: Наука.: 1975. – 768 с.
2. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 421 с.
3. Топчеев Ю.И. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1971. – 466 с.
4. Власов К.П. Теория автоматического управления: Учебное пособие. – Х.: Изд-во Гуманитарный центр, 2007. – 526 с.
5. Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования и управления. Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. школа, 1977 – 519 с.
6. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. - М.: Энергия, 1969 – 375 с.
7. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 492 с.
8. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМФТЛИТ, 2004. – 464с
9. Чаки Ф. Современная теория управления. Нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. Пер. с англ. В.В. Капитоненко и др. – М.: Мир, 1975. – 422 с.
10. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следящие системы): Учебное пособие. – 2-е изд. – Ульяновск, 2001. – 98 с.
11. Исследование качества переходных процессов замкнутых систем управления // Кафедра Информационных технологий моделирования и управления URL : <http://itmu.vsuet.ru/Posobija/OTU/htm/LR5.htm> – дата обращения: 11.05.2021

12. Программируемые контроллеры S7-300 // Siemens в России!  
URL : [https://www.siemens-pro.ru/docs/simatic/s7-300/05\\_S7\\_300\\_2015\\_rupart-1.pdf](https://www.siemens-pro.ru/docs/simatic/s7-300/05_S7_300_2015_rupart-1.pdf) – дата обращения 16.05.2021
13. Хлыпало Е.И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 272 с.
14. Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах. – Л.: Энергия, 1973. – 125 с.
15. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 719 с.
16. Панько М.А. Особенности нечетких алгоритмов регулирования в сравнении с классическими// Теплоэнергетика. - 2001. - №10. - С. 39-42
17. Прасов, М. Т. Алгоритм дефаззификации при синтезе нечеткого регулятора автоматизированных систем контроля и управления // Промышленные АСУ и контроллеры: Ежемесячный научно-технический производственный журнал. - М. - 2006. - № 6. - С. 41-42.
18. Ротач В. Я. Возможен ли синтез нечётких регуляторов с помощью теории нечётких множеств? // Промышленные АСУ и контроллеры: Ежемесячный научно-технический производственный журнал. - М. - 2004. - № 1. - С. 33-34.
19. Современная прикладная теория управления: Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: ТРТУ, 2000. ч.Ш.
20. Стальский Владимир Вильгельмович. Нечеткая логика и ее применение в автоматическом регулировании. - СПб: 1998. - 94 с.
21. Усков, А. А. Алгоритм синтеза нечётких логических регуляторов на основе самоорганизации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика: Журнал. - М. - 2004. - № 8. - С. 1-3.

22. Усков, А. А. Эмпирический принцип синтеза нечётких логических регуляторов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика: Журнал. - М. - 2004. - № 1. - С. 16-18
23. F. Fujitec, FLEX-8800 series elevator group control system, Fujitec Co., Ltd., Osaka, Japan, 1988.
24. Kovacic Z., Bogdan S. Fuzzy Controller Design. Theory and Applications - Arlington: Taylor & Francis Group. 2006.
25. Li H.-X., Gatland H. B. A new methodology for designing a fuzzy logic controller – IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1995. - P. 505-512.
26. Li H.-X., Gatland H. B., Green A. W. Fuzzy variable structure control - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B. 1997. - P. 306-316
27. Li W. Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller - IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1998. - P. 449-463.
27. Li H.-X., Zhang L., Cai K.-Y., Chen G. An improved robust fuzzy-pid controller with optimal fuzzy reasoning - IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B. 2005. - P. 1283-1294.
28. Mamdani E. H. Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plant. Proc. IEE., 1974.
29. Zade L. A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Part 1, 2, 3 // Information Sciences, n. 8 pp.199-249, pp.301-357; n. 9 pp. 43-80.
30. СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. Санитарные нормы»
31. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»
32. ГОСТ 12.1.038-82 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов».

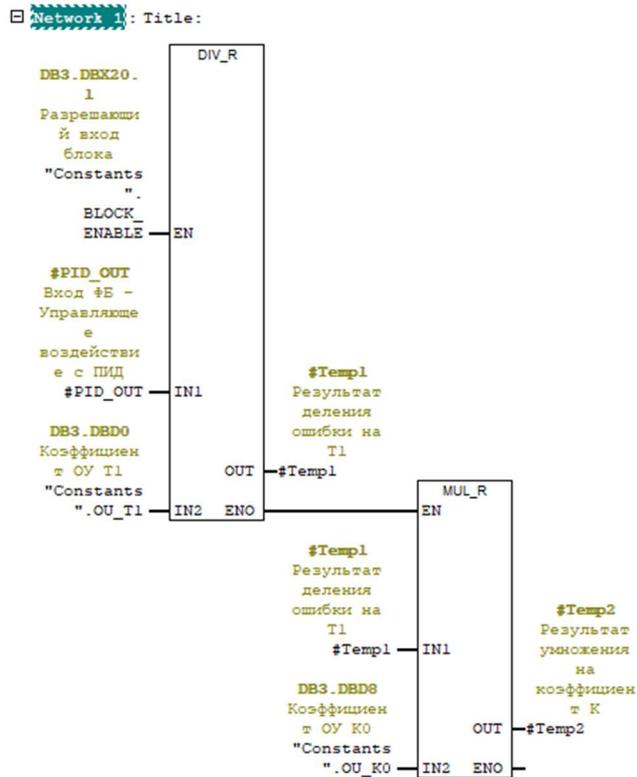
33. ГОСТ 12.1.019-2017 «Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

34. ГОСТ 12.1.005-76 «Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования».

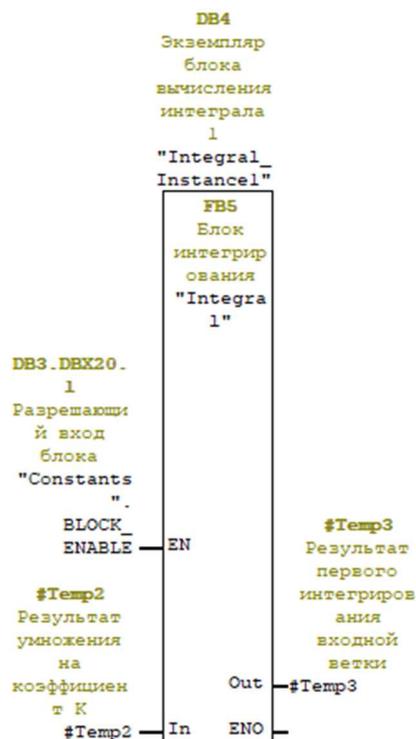
# Приложение А

(Обязательное)

## Функциональный блок передаточной функции объекта управления

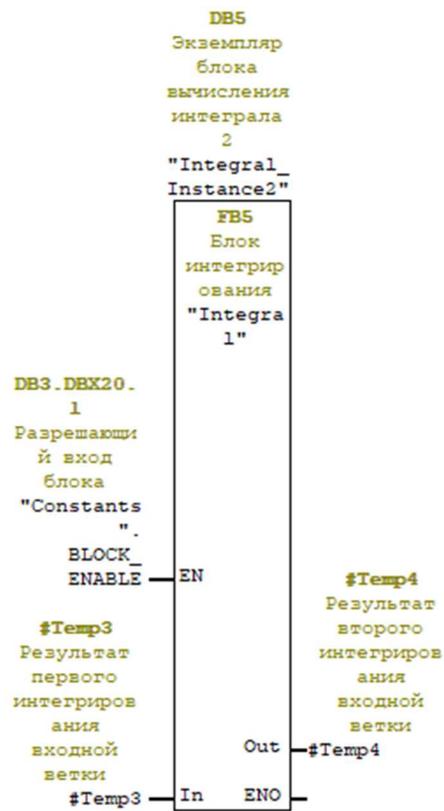


Network 2: Title:

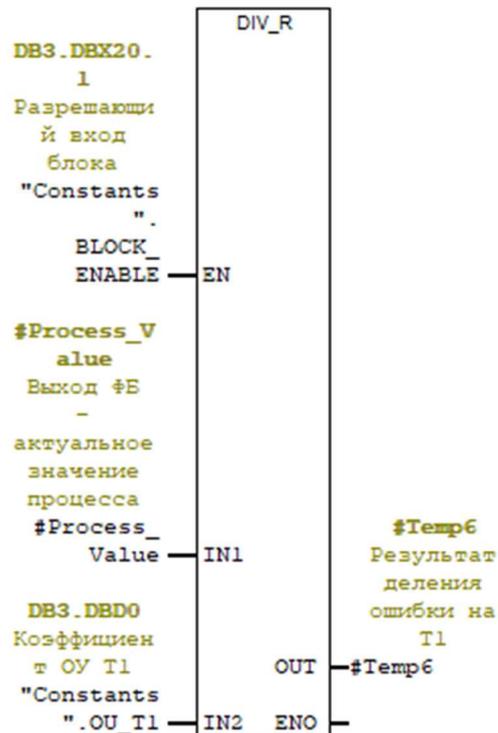


## Приложение А - Продолжение

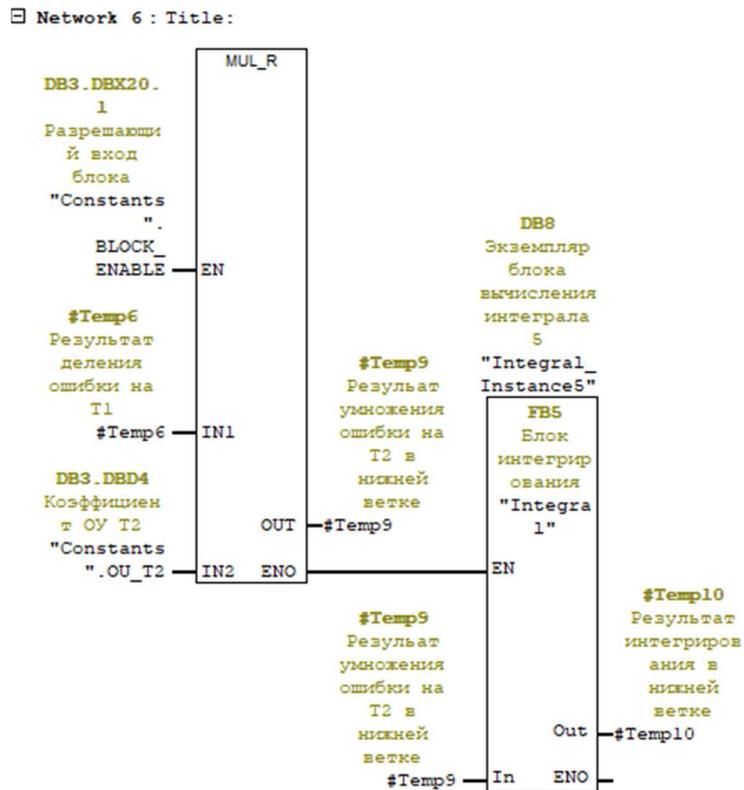
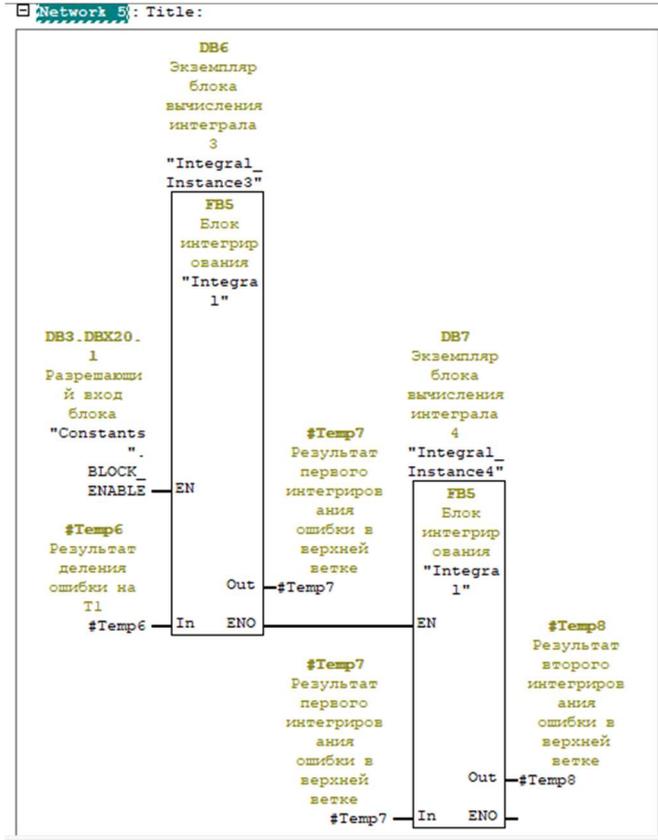
□ Network 3 : Title:



□ Network 4 : Title:

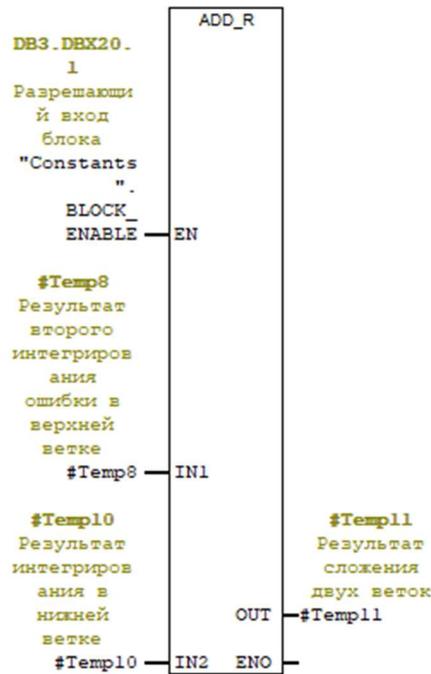


## Приложение А - продолжение

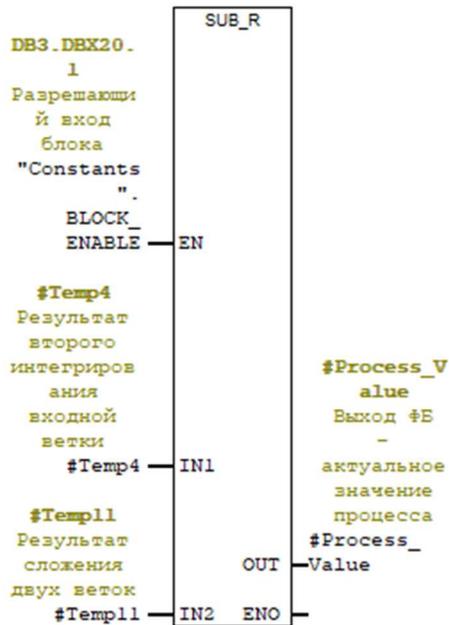


## Приложение А - продолжение

□ Network 7 : Title:



□ Network 8 : Title:



## Приложение Б

(Обязательное)

Листинг функционального блока ПИД-регулятора

```
FUNCTION_BLOCK PID
TITLE ='Непрерывный PID регулятор'
VAR_INPUT
    Error:REAL;           //Сигнал рассогласования с КУ
    Kp:REAL;              //Пропорциональный коэффициент регулятора
    Ki:REAL;              //Интегральный коэффициент регулятора
    Kd:REAL;              //Дифференциальный коэффициент регулятора
    STARTVALUE:REAL;     //Начальное значение
    YMIN:REAL;           //Нижняя граница выходного сигнала
    YMAX:REAL;           //Верхняя граница выходного сигнала
    MANUALMODE:BOOL;     //Переключатель режима
    MANUALVALUE:REAL;    //Выходное значение ручной режим
END_VAR
VAR_OUTPUT
    PIDOUT:REAL;         //Выходное значение ПИД-регулятора
    YEPS:REAL;           //Сигнал рассогласования
END_VAR
VAR
    E:REAL;              //Сигнал ошибки
    Dlast:REAL;          //Предыдущее значение ошибки
    g:INT:=0;            //Признак итерации
    Ti:REAL;             //Ti = (1/Ki)
    IOUT:REAL;           //Интегральная составляющая
    Ik:REAL;             //Время интегрирования
    ITM:REAL:=10.0;     //Время интегрирования
    DOUT:REAL;           //Дифференциальная составляющая
```

## Приложение Б - продолжение

```
Dk:REAL;           //Время дифференцирования
DTM:REAL:=10.0;   //Время дифференцирования
Ia:ARRAY[1..2] OF REAL; //Массив двух соседних значений сигнала
рассогласования, используются как основания трапеции в методе трапеций([1] -
сигнал рассогласования предыдущего цикла; [2] - сигнал рассогласования
текущего цикла)
Itrz:REAL;        //Кусочное значение интеграла, метод трапеций
Isum:REAL:=0;     //Значение интеграла
END_VAR
BEGIN
IF MANUALMODE     //Если ручной режим
THEN
    PIDOUT:=MANUALVALUE;
ELSE
    E:=Error;
    YEPS:=E;      // Скорректировали входную переменную
    IF g = 0 THEN //Если первая итерация
        Dlast:=E;
        Ia[1]:=E;
        g:=g+1;
        PIDOUT:= STARTVALUE;
    ELSE
        Dk:=DTM/1000.0;
        DOUT:=(E-Dlast)/Dk;
        Dlast:=E;
        Ia[2]:=E;
```

## Приложение Б - продолжение

```
Ik:=ITM/1000.0;
Itrz:=((Ia[2]+Ia[1])/2)*Ik;
Isum:=Isum+Itrz;
IOUT:=Isum;
Ia[1]:=Ia[2];
Ti:=1/Ki;
//Формируем выход ПИД-регулятора
    PIDOUT:=STARTVALUE+Kp*E+Ki*IOUT+Kd*DOUT;
END_IF;
IF PIDOUT > YMAX THEN
    PIDOUT:=YMAX;
END_IF;
IF PIDOUT < YMIN THEN
    PIDOUT:=YMIN;
END_IF;
END_IF;
END_FUNCTION_BLOCK
```

## Приложение В

(Обязательное)

Листинг функционального блока переключателя

```
FUNCTION_BLOCK Switch
```

```
TITLE ='Переключатель'
```

```
VAR_INPUT
```

```
    X1:REAL;
```

```
    Sw1:BOOL;
```

```
    X2:REAL;
```

```
    Sw2:BOOL;
```

```
    X3:REAL;
```

```
    Sw3:BOOL;
```

```
    X4:REAL;
```

```
    Sw4:BOOL;
```

```
END_VAR
```

```
VAR_OUTPUT
```

```
    Y:REAL;
```

```
    N:INT;
```

```
END_VAR
```

```
VAR_TEMP
```

```
    Flag:BOOL;
```

```
END_VAR
```

## Приложение В - продолжение

```
BEGIN  
  
Flag := 0;  
  
IF Sw1 AND NOT Flag  
  
THEN  
  
    Y:=X1;  
  
    N:=1;  
  
    Flag:=True;  
  
END_IF;  
  
IF Sw2 AND NOT Flag  
  
THEN  
  
    Y:=X2;  
  
    N:=2;  
  
    Flag:=True;  
  
END_IF;  
  
IF Sw3 AND NOT Flag  
  
THEN  
  
    Y:=X3;  
  
    N:=3;  
  
    Flag:=True;  
  
END_IF;
```

## Приложение В - продолжение

IF Sw4 AND NOT Flag

THEN

Y:=X4;

N:=4;

Flag:=True;

END\_IF;

IF NOT FLAG

THEN

N:=0;

Y:=0.0;

END\_IF;

END\_FUNCTION\_BLOCK

## Приложение Г

(Обязательное)

Листинг функционального блока кусочно-линейных функций

```
FUNCTION_BLOCK Piece_Func
TITLE ='Кусочно-линейная функция'
VAR_INPUT
    Nkol:INT;
    Nptr:BOOL;
    X:REAL;
    X1:REAL;
    Y1:REAL;
    X2:REAL;
    Y2:REAL;
    X3:REAL;
    Y3:REAL;
    X4:REAL;
    Y4:REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Y:REAL;
    Nuch:INT;
END_VAR
VAR
    Flag:BOOL;
    YOUT1:REAL;
```

## Приложение Г - продолжение

```
YOUT2:REAL;
YOUT3:REAL;
YOUT4:REAL;

END_VAR

BEGIN

Nuch:=0;

IF Nptr Then

    IF (X > X1) AND (X < X2) THEN

        
$$Y := (X2 * Y1 - X1 * Y2 - (Y1 - Y2) * X) / (X2 - X1);$$


        Nuch:= 1;

    END_IF;

    IF (X > X2) AND (X < X3) THEN

        
$$Y := (X3 * Y2 - X2 * Y3 - (Y2 - Y3) * X) / (X3 - X2);$$


        Nuch:= 2;

    END_IF;

    IF (X > X3) AND (X < X4) THEN

        
$$Y := (X4 * Y3 - X3 * Y4 - (Y3 - Y4) * X) / (X4 - X3);$$


        Nuch:= 3;

    END_IF;

END_IF;

IF NOT Nptr THEN //Находим X для каждого участка

    IF (Y1 <> Y2) THEN

        
$$YOUT1 := (X2 * Y1 - X1 * Y2 - (X2 - X1) * X) / (Y1 - Y2); \quad \text{Находим X}$$



```

## Приложение Г - продолжение

```
Nuch:= 1;
ELSE
    YOUT1:= (X2-X1)/2;
END_IF;
IF (Y2 <> Y3) THEN
    YOUT2:= (X3*Y2-X2*Y3 - (X3 - X2)*X)/(Y2-Y3);    Находим X
    Nuch:= 2;
ELSE
    YOUT2:= (X3-X2)/2;
END_IF;
IF (Y3 <> Y4) THEN
    YOUT3:= (X4*Y3-X3*Y4 - (X4 - X3)*X)/(Y3-Y4);    Находим X
    Nuch:= 3;
ELSE
    YOUT3:= (X4-X3)/2;
END_IF;
IF Nkol = 2 THEN    //Если выходная функция - самая первая, то просто
высчитываем X
    Y := YOUT3;
END_IF;
IF Nkol = 0 THEN    //Если выходная функция - вторая или третья И
вторая и третья не пересекаются, то берем средний X по двум точкам
    Y := (YOUT3 + YOUT2)/2; //Redact - Поменять "-" на "+"
END_IF;
```

## Приложение Г - продолжение

IF Nkol = 8 THEN //Если выходная функция - вторая И вторая и третья пересекаются, высчитываем и возвращаем вероятность по правому участку функции

Y := YOUT3;

END\_IF;

IF Nkol = 16 THEN //Если выходная функция - третья И вторая и третья пересекаются, высчитываем и возвращаем вероятность по левому участку функции

Y := YOUT2;

END\_IF;

IF Nkol = 4 THEN //Если выходная функция - четвертая,то

IF X = 1 THEN //Если вероятность равна 1, то возвращаем 94

Y := 94.0;

ELSE

Y := YOUT2; //Иначе высчитываем

END\_IF;

END\_IF;

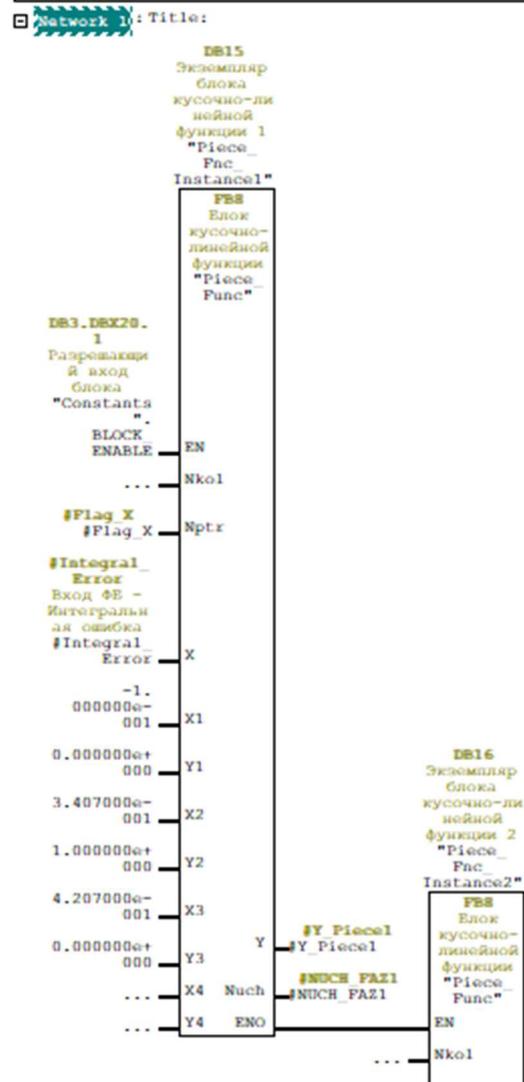
END\_IF;

END\_FUNCTION\_BLOCK

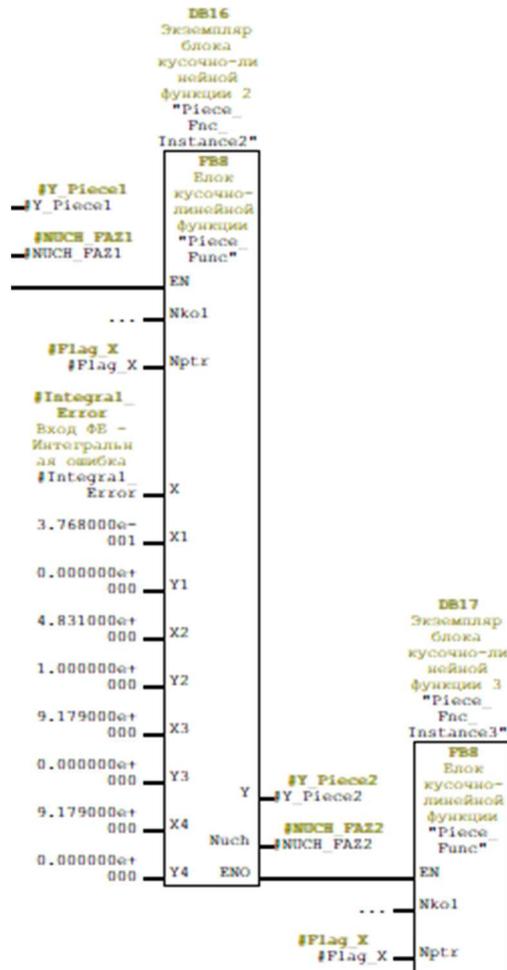
# Приложение Д

(Обязательное)

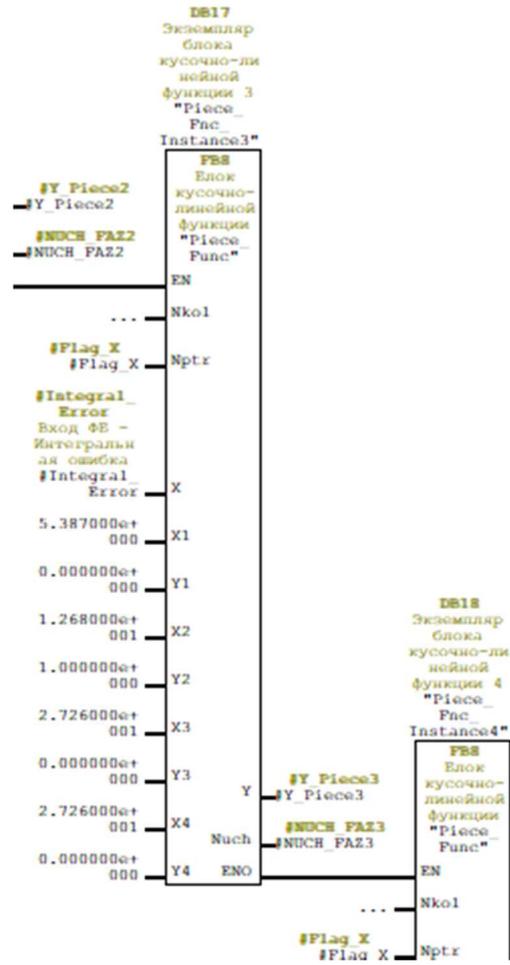
## Листинг функционального блока нечеткой логики



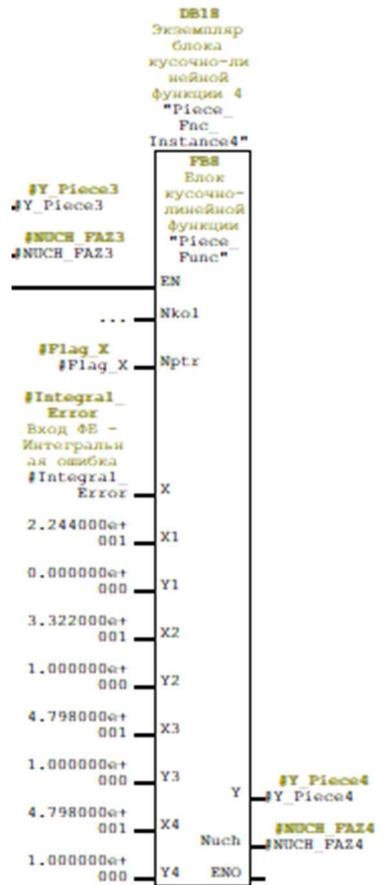
## Приложение Д - продолжение



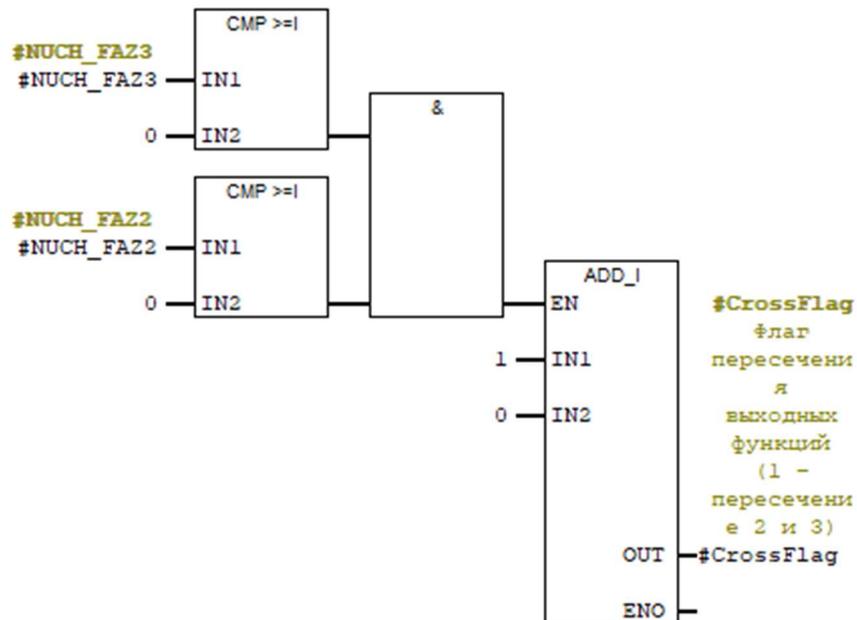
## Приложение Д - продолжение



## Приложение Д - продолжение

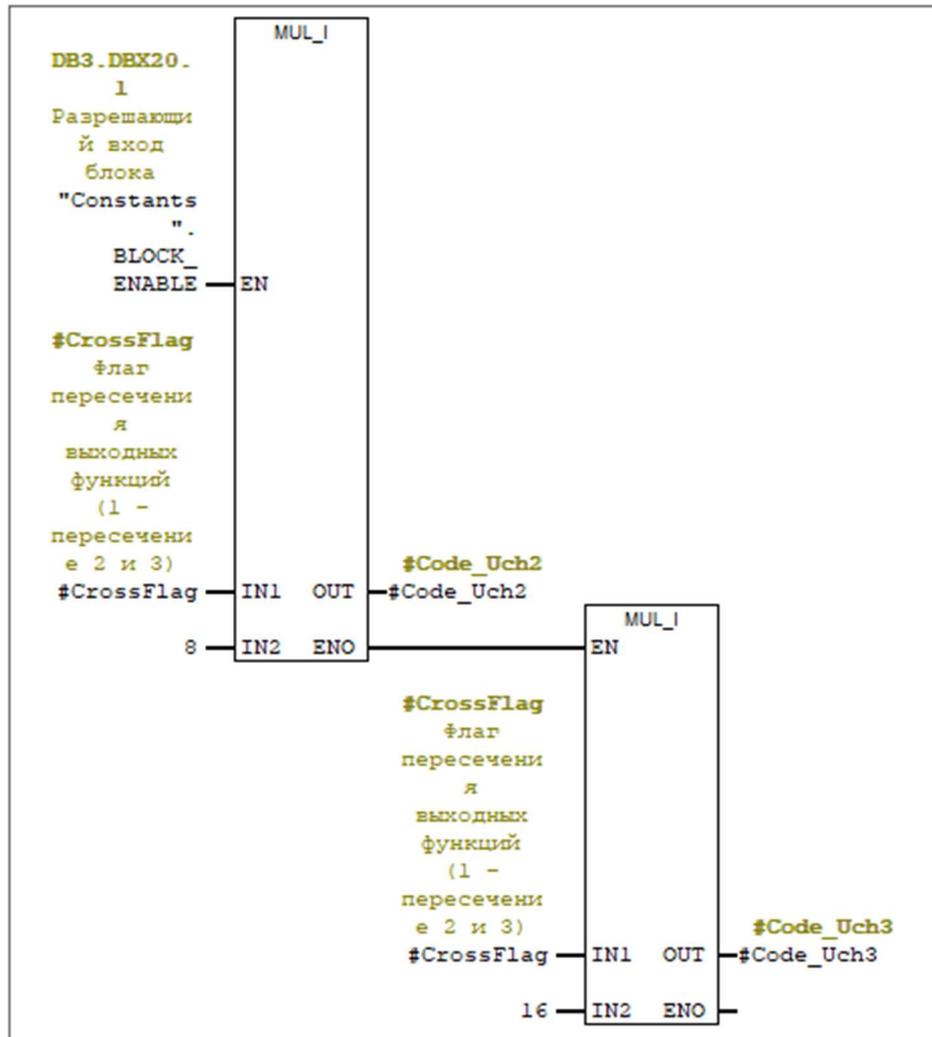


□ Network 2 : Title:

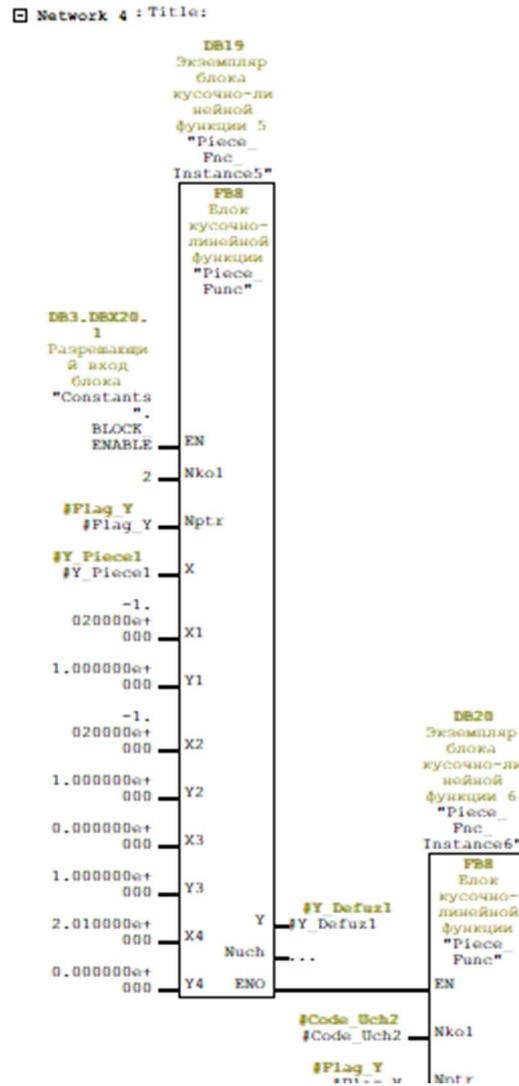


## Приложение Д - продолжение

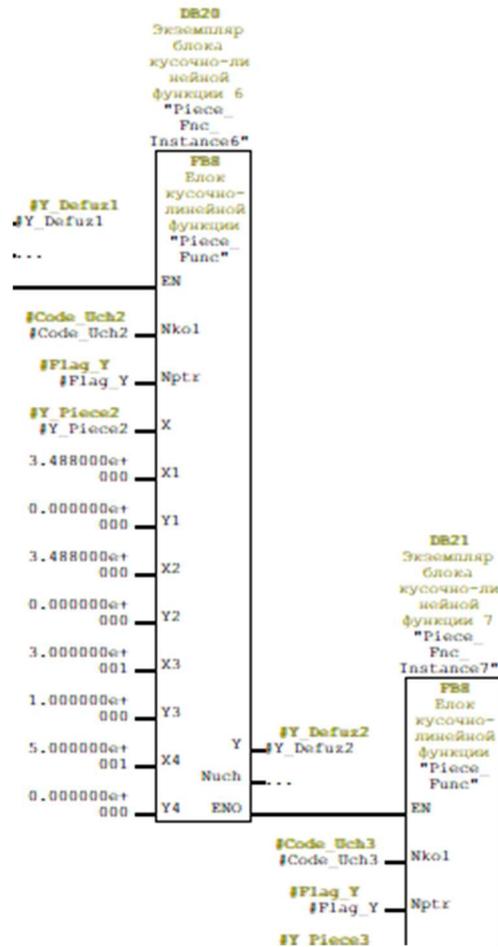
Network 3: Title:



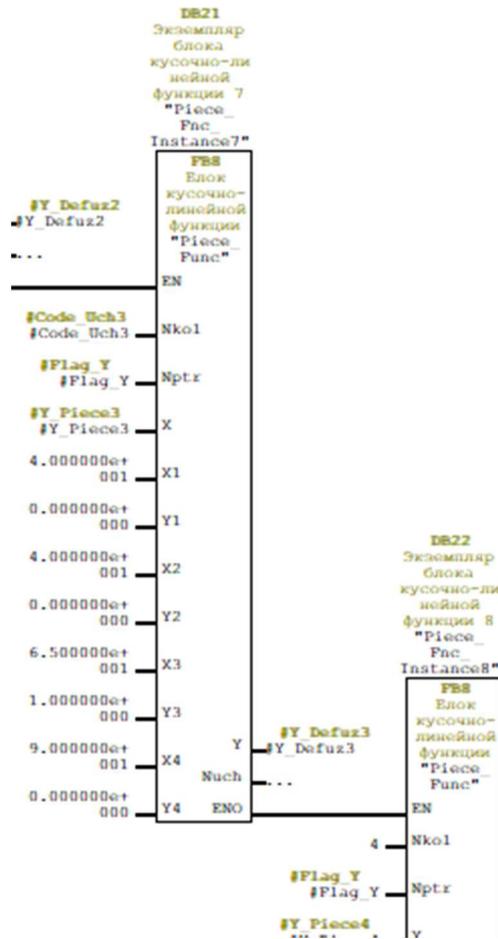
## Приложение Д - продолжение



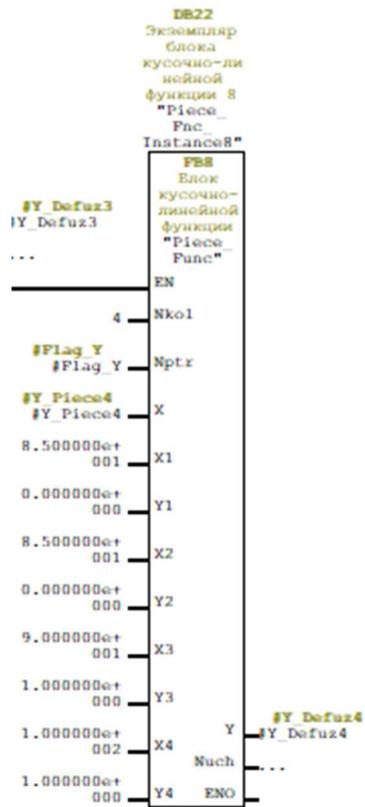
## Приложение Д - продолжение



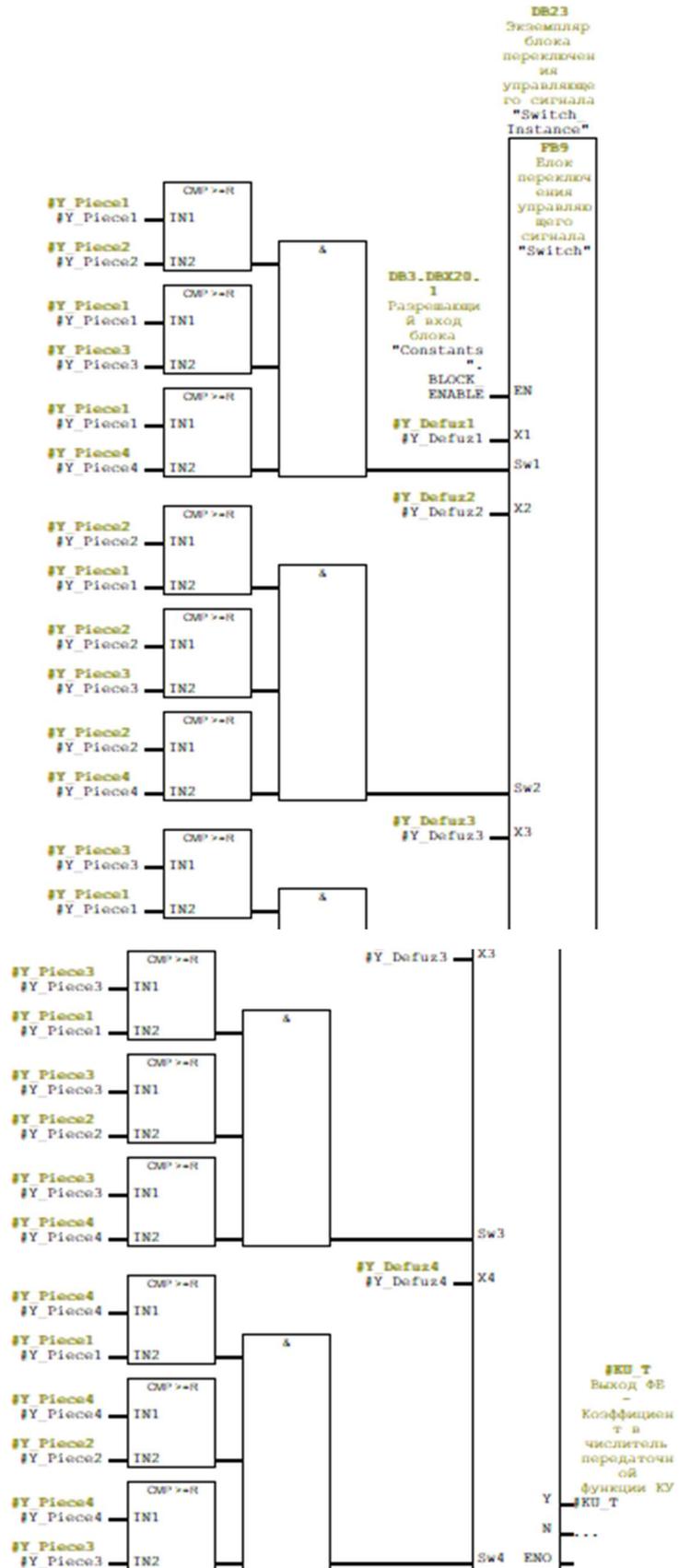
## Приложение Д - продолжение



## Приложение Д - продолжение



## Приложение Д - продолжение



## Приложение Е

(Справочное)

### Analytic review of existing corrective devices

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8ТМ91	Веретехин Артем Валерьевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Скороспешкин Максим Владимирович	к.т.н,		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИЯ	Сидоренко Татьяна Валерьевна	к.п.н., доцент		

## Introduction

The fundamental task of designing automatic control systems (ACS) is the design of a structural diagram that provides high quality control indicators - accuracy and speed.

At the moment, PID control is common in the industrial field. This is due to its simplicity, relative low cost, and efficiency in control in linear systems. However, efficiency is ensured only in control objects with static parameters. If the exact description of the mathematical model is unknown for the system or there are uncertainties, then the quality of regulation drops significantly.

In order to improve the quality of regulation in such systems, corrective devices are used that provide a change in characteristics taking into account the requirements. Correcting devices are added to the ATS in order to provide the necessary stability margin, improve accuracy and improve the quality of the transient process as a whole.

Several groups of correcting devices can be distinguished: linear, non-linear, pseudo-linear. The most widespread are linear correcting devices, but recently the use of nonlinear correcting devices that implement nonlinear control laws is gaining momentum. In many cases, these devices can significantly improve the properties of control systems, and in some cases they are the only way to achieve the required properties of the system.

However, even such devices do not always meet the requirements - when developing control systems, it is most often assumed that the parameters of the control object, as well as the nature of the impact on the system, remain unchanged or change insignificantly. If, under any circumstances, there has been a significant change in these indicators, the control process can significantly deviate from the calculated one, which leads to a deterioration in the quality of regulation.

That is why recently there has been a trend to replace traditional regulators with adaptive ones based on fuzzy logic methods. Such regulators are more difficult

to design and configure, but they can provide the required quality of regulation in conditions of nonstationarity of the control object.

This final qualification work is devoted to the research, development and software implementation of a regulator based on fuzzy logic and using a pseudo-linear correcting device with a phase advance.

### **E.1 Analytical review of corrective devices**

For automatic regulation and control systems, the structure of which includes only basic functional elements aimed at implementing a certain regulation law, a smaller value of the regulation error is characteristic. But at the same time, such systems often do not allow achieving the specified quality indicators. It is in such cases that it is advisable to use system correction methods to change its frequency characteristics in order to improve quality indicators.

The correction device can be presented in the form of a correcting element having a certain transfer function, the addition of which as an additional link can change the properties of the system.

The main purpose of using CD is to improve the quality indicators of the management process. In this case, this means an increase in quality indicators and control accuracy, a change in the properties of dynamics, which allows you to get a gain in speed and stability margin.

It is possible to distinguish linear CD and nonlinear CD as the main types of CD used in automatic control systems. In the most common design, they are linear or nonlinear filters connected in a direct circuit (in series) or in a feedback circuit (in parallel), or combined devices with simultaneous serial and parallel connection.

#### **E.1.1 Linear correction devices**

At the moment, the use of linear correcting devices is quite common. They have both advantages, the main of which is ease of implementation, and disadvantages - limited possibilities for correction to improve the quality indicators of the system.

In the synthesis of LCD, two main methods are used. The first is the introduction of corrective links of a certain class into the system, which is selected depending on the desired result. Let's list some of these links:

- integrating link of the first order, increasing the degree of astatism, which leads to an improvement in control accuracy
- proportional-differentiating and integrating-differentiating link, increasing the system stability margin;
- aperiodic link, which is a high-pass filter.

Another approach is to plot and analyze the desired frequency response. With this approach, it is possible to determine in advance the frequency parameters of the CD.

As mentioned above, LCDs are distinguished by their simplicity of implementation, as a result of which they are widely used in many practical problems.

But in addition to the advantages, LCDs also have their own disadvantages that limit their use. The main one is the rigid dependence of the amplitude and phase frequency characteristics. Thus, in the synthesis of LCD, there is always a great risk when bringing one of the characteristics to the target form, to get an undesirable form of another characteristic. An example is the synthesis of phase advance differentiating circuits. In this case, when creating a positive one, the low frequency region, which is the carrier for the useful signal, is simultaneously attenuated. And vice versa: the integrating links that drown out the high-frequency spectrum of the signal create a negative phase shift (lag), which also has a negative impact on the quality of the transient process.

The ideal situation when using corrective devices is to combine the positive properties of differentiating and integrating circuits and eliminate their disadvantages. This problem can be solved using nonlinear correcting devices.

### **E.1.2 Nonlinear correction devices**

The necessary dynamic qualities of the system and compensation for the influence caused by its nonlinearities can be obtained by introducing nonlinear correcting devices into the system.

Adding nonlinear correcting devices to the structure of the system makes it possible to obtain practically unchanged stability margins and quality indicators in non-stationary systems. Such devices can be represented as non-linear four-port networks with series and parallel connection, non-linear laws, non-linear CD, switching CD.

Since linear correction is one of the special cases of nonlinear correction, the latter can be considered as a more general corrective tool. Systems with optimal performance parameters can be built only with the use of nonlinear correction tools that solve the issue of compensating for the negative impact of natural nonlinearities on the control process.

However, it should be borne in mind that nonlinear correction also has its own specific disadvantages, one of which is its specialization in relation to external influences. Thus, the method of nonlinear correction, which is selected for a certain class of external influence, with other influences, at best, can be ineffective, and at worst, even harmful. Therefore, if external influences have a wide range, then linear correction may be the best option. It should also be noted that there is no generally accepted method for the synthesis of nonlinear correcting devices.

Let us dwell in detail on each class of nonlinear QA:

1. Serial and parallel quadripoles. This category includes non-linear control systems, pseudo-linear control systems and combined CD. Pseudo-linear control systems will be discussed in detail below. The most common schemes for the synthesis of nonlinear QA is either adding a correcting device to the direct circuit of the system, or to the feedback circuit. Combined control systems are obtained by combining non-linear and pseudo-linear control systems.
2. Nonlinear control laws – group corrective devices, which includes the following laws:

- nonlinear functional laws of control provide compensation for the impact of nonlinearities, increase the stability and quality of operation of automatic control systems and are written in the form of functional dependencies on the absolute value and derivatives of the input signal;
- the laws of logical control with the help of which it is possible to change both the structure of the system as a whole, and individual elements and their parameters. Logic blocks are the main form of recording these laws;
- optimizing laws allow maintaining the maximum or minimum at a given level during the entire regulation process. Implementation form - switching blocks and multiplication blocks;
- parametric laws with which it is possible to implement the control process based on deviations from the law and the program specified in advance.

In self-tuning ACS, nonlinear correcting devices are used using elements of the unchangeable part of the ACS.

### **E.1.3. Pseudo-linear correcting devices**

Pseudo-linear CD - devices in which the dependence of the equivalent amplitude and phase characteristics is determined only by the frequency of the input signal. The independence of the amplitude and phase characteristics is also one of the characteristic features, from which one of the main advantages of pseudo-linear devices follows - the possibility of independent adjustment of the amplitude and phase characteristics, which cannot be done by linear means, which provides greater freedom of action for an expert conducting the synthesis of the ACS frequency characteristics.

The main elements of the PCD are a linear filter that adds a phase advance or lag and blocks of mathematical operations. PCA can include two-channel and three-channel nonlinear filters, with separate channels for amplitude and phase. The product of the channel signals is the output of the system.

Below are pseudo-linear CDs, on and more used in automatic control systems:

- CD with amplitude suppression;

- CD with phase advance;
- Amplitude-phase CD with separate channels;
- CD, with the ability to memorize the extremum.

Next, each of the above corrective devices will be discussed.

#### **E.1.3.1 Correction device with amplitude suppression**

During the operation of this CU, with an increase in frequency, amplitude suppression and a constant value of the phase signal are observed.

#### **E.1.3.2 Dual channel correcting device**

In a two-channel correcting device, a phase-leading KA and an amplitude-suppressing KA operating in parallel channels are combined.

#### **E.1.3.3 Corrective device with memorization of extremum**

Let's imagine the composition of this CD:

- scaling block (MSB) - when the signal passes through this block, it is amplified;
- peak detector unit (PD) - when a signal passes through this unit, its extremum is memorized;
- zero organ (NO) - if the input signal is equal to zero, it will reset the peak detector;
- sign - block that determines the sign of the input signal;
- abs - block for calculating the module from the input signal.

#### **E.1.3.4 Correcting device with phase advance**

A phase advance corrector ensures that a phase advance is obtained without affecting the signal amplitude. The diagram of this correcting device is shown in

A characteristic feature of a pseudo-linear QA with a phase advance is the mutual independence of the frequency characteristics of the correcting device and the amplitude of the input signal. The principle of operation can be understood on the example of a block diagram and it consists in the following: a signal arrives at both channels, which is fed to the input of the CD. The signal in the upper channel is converted through the amplification blocks (for this structural scheme, the gain is 1)

and the signal module. The signal in the lower channel is converted by means of an integrating-differentiating element and a block for determining the sign of the signal. The output is to multiply the signal of the upper and lower channel.

The transfer function (PF) of the integrating-differentiating link has the form:

$$W_{\phi}(s) = \frac{Ts+1}{T_1s+1}.$$

The harmonic linearization coefficients for this link will take the form:

$$a = \frac{1}{\pi}(\pi - 1a + \sin 2a),$$

$$b = \frac{1}{\pi}(1 - \cos 2a),$$

where  $a = \arctg \frac{\omega T(1-v)}{1+\omega^2 T_1 v}$ ;  $v = \frac{T_1}{T}$