

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки управление в технических системах
Кафедра автоматики и компьютерных систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка, исследование и программная реализация псевдолинейного нечеткого регулятора

УДК 681.51.09:519.876

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Усольцева Ирина Игоревна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Скороспешкин В.Н.	К.Т.Н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менедж. ИСГТ	Конотопский В.Ю.	К.Э.Н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ ИНК	Анищенко Ю. В.	К.Т.Н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС ИК	Фадеев А. С.	К.Т.Н.		

Планируемые результаты обучения по направлению

27.04.04 «Управление в технических системах»

	Результаты
P1	Применять глубокие естественнонаучные и математические знания для решения научных и инженерных задач в области анализа, синтеза, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами.
P2	Уметь обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в области теории, проектирования, производства и эксплуатации средств автоматизации и систем управления техническими объектами
P3	Ставить и решать инновационные задачи инженерного анализа, связанные с разработкой технических систем управления с использованием аналитических методов и сложных моделей.
P4	Выполнять инновационные инженерные проекты по разработке программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения с использованием современных методов проектирования, систем автоматизированного проектирования, передового опыта разработки конкурентно способных изделий.
P5	Планировать и проводить теоретические и экспериментальные исследования в области проектирования аппаратных и программных средств автоматизированных систем с использованием новейших достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта. Критически оценивать полученные данные и делать выводы.
P6	Осуществлять авторское сопровождение процессов проектирования, внедрения и эксплуатации программно-аппаратных средств автоматизированных систем различного назначения.
P7	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в интернациональной профессиональной среде с пониманием культурных, языковых и социально-экономических различий партнеров
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, активно владеть иностранным языком, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности, в том числе на иностранном языке.
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена и руководителя группы, в том числе междисциплинарной и международной, при решении инновационных инженерных задач.
P10	Демонстрировать личную ответственность и ответственность за работу возглавляемого коллектива, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения инновационной инженерной деятельности. Демонстрировать глубокие знания правовых, социальных, экологических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности.
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению, непрерывному самосовершенствованию в инженерной деятельности, способность к педагогической деятельности.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
Направление подготовки стандартизация и метрология
Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8АМ41	Усольцевой И.И.

Тема работы:

Разработка, исследование и программная реализация псевдолинейного нечеткого регулятора

Утверждена приказом директора (дата, номер) От 20.04.2016 г. №3006/с

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Нечеткая логика, псевдолинейные корректирующие устройства, лабораторный стенд, программный пакет Isagfar, промышленный контроллер КРОСС-500.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Анализ существующих корректирующих устройств систем автоматического регулирования; Анализ существующих методов настройки ПИД-регулятора; Исследование свойств псевдолинейных корректирующих устройств с амплитудным подавлением и фазовым опережением и систем

	управления с данными корректирующими устройствами в ППП Matlab; Программная реализация псевдолинейного регулятора на контроллере КРОСС-500.
Перечень графического материала	Слайд 1. Название темы. Слайд 2. Цель работы и задачи. Слайд 3. Типы корректирующих устройств. Слайд 4. Types of corrective devices Слайд 5. Псевдолинейное корректирующее устройство с амплитудным подавлением. Слайд 6. Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением. Слайд 7. Модель САУ с корректирующим устройством с амплитудным подавлением. Слайд 8. Модель САУ с корректирующим устройством с фазовым опережением. Слайд 9. Структурная схема САУ с нечетким регулятором. Слайд 10. Модель САУ с нечетким регулятором. Слайд 11. Подстройка САУ с нечетким регулятором. Слайд 12. Программная реализация. Слайд 13. Программная реализация. Слайд 14. Социальная ответственность. Слайд 15. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. Слайд 16. Результаты выполнения ВКР.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент кафедры менеджмента, к.э.н. В. Ю. Конотопский
Социальная ответственность	Доцент кафедры ЭБЖ, к.т.н. Ю. В. Анищенко
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Основы теории нечеткой логики	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Скороспешкин В.Н	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Усольцева Ирина Игоревна		

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт кибернетики
 Направление подготовки стандартизация и метрология
 Уровень образования магистратура
 Кафедра компьютерных измерительных систем и метрологии
 Период выполнения – осенний / весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

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

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

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
27.05.2015 г.	Основная часть	60
27.05.2015 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
27.05.2015 г.	Социальная ответственность	10
27.05.2015 г.	Обязательное приложение на иностранном языке	15

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АиКС	Скорспешкин В.Н.	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС ИК	А. С. Фадеев	К.Т.Н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8AM41	Усольцева Ирина Игоревна

Институт	Институт Кибернетики	Кафедра	АиКС
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Управление в технических системах

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

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	
2. Планирование проведения и формирование бюджета научных исследований	
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. Альтернативы проведения НИ
4. График проведения и бюджет НИ

5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

14.04.2016

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Конотопский В. Ю.	К.Э.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ41	Усольцева Ирина Игоревна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа 8AM41	ФИО Усольцевой Ирине Игоревне
-----------------	----------------------------------

Институт	Институт Кибернетики	Кафедра	АиКС
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Управление в технических системах

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является псевдолинейный нечеткий регулятор. Область применения: внедрение метода настройки регулятора в промышленных масштабах.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения.</p> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения</p>	<p style="text-align: center;">Действие фактора на организм человека:</p> <ul style="list-style-type: none"> – повышенный уровень шума; – несоответствующий микроклимат рабочего помещения; – повышенный уровень электромагнитных излучений; – недостаточная освещенность рабочего помещения. <p>– электрический ток</p>
2. Экологическая безопасность:	– Воздействие на литосферу в случае утилизации персонального компьютера, как отхода электронной промышленности
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	– пожар
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	<ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	7.04.2016
---	------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ ИНК	Анищенко Ю. В.	к.т.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Усольцева Ирина Игоревна		

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 124 с., 49 рис., 22 табл., 33 источника, 3 приложения.

Ключевые слова: псевдолинейные корректирующие устройства, интегральная квадратичная ошибка, ПИД-регулятор, амплитудная частотная характеристика, фазовая частотная характеристика, переходный процесс, программный пакет Matlab, контроллер КРОСС-500, программный пакет Isagraf.

Объектом исследования является нечеткий регулятор, реализованный на базе ПИД-регулятора и псевдолинейного корректирующего устройства, и система автоматического регулирования (САР) с применением данного регулятора.

Цель работы - исследование свойств псевдолинейных корректирующих устройств и системы автоматического управления нестационарным объектом с псевдолинейным регулятором, программная реализация псевдолинейного регулятора на контроллере КРОСС-500.

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы выполнен обзор линейных, нелинейных и псевдолинейных корректирующих устройств. Исследование свойств корректирующих устройств осуществлялось с применением программного пакета Matlab.

В результате исследования разработана модель САР, в которой изменение постоянной времени псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением осуществляется на основе нечеткой логики.

Обозначения и сокращения

ПЛК – программируемый логический контроллер;

ПО – программное обеспечение;

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессам;

ПО – программное обеспечение;

КУ – корректирующее устройство;

ЛКУ – линейные корректирующие устройства;

НКУ – нелинейные корректирующие устройства;

ОУ – объект управления;

ПИД-регулятор – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор;

ПКУ – псевдолинейные корректирующие устройства;

САР – система автоматического регулирования;

САУ – система автоматического управления;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

ФЧХ – фазо-частотная характеристика.

Оглавление

Реферат	11
Обозначения и сокращения.....	12
Введение.....	17
1 Анализ принципов построения нечетких регуляторов	19
1.1 Основы теории нечеткой логики	19
1.1.1 Понятие нечеткого множества и его основные свойства	19
1.1.2 Нечеткая логика и ее основные свойства (нечеткие выводы). 24	
1.2 Структура и принцип работы нечеткого регулятора.....	32
2 Анализ корректирующих устройств систем автоматического управления	39
2.1 Линейные корректирующие устройства.....	40
2.1.1 Дифференцирующее корректирующее устройство	40
2.1.2 Интегрирующие корректирующие устройства.....	42
2.1.3 Интегро-дифференцирующие корректирующие устройства ..	44
2.2 Нелинейные корректирующие устройства.....	45
2.3 Псевдолинейные корректирующие устройства	48
2.3.1 Корректирующие устройства с амплитудным подавлением. .	49
2.3.2 Корректирующие устройства с фазовым опережением	51
2.3.3 Корректирующие устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы	53
2.4 Выбор корректирующих устройств	55
3 Исследование свойств псевдолинейных корректирующих устройств.....	57
3.1 Исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением.....	57
3.1.1 Анализ свойств ПКУ при изменении постоянной времени объекта регулирования.....	57

3.2.2 Анализ свойств ПКУ при изменении времени запаздывания объекта управления.....	60
3.2 Исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением.....	64
3.2.1 Анализ свойств ПКУ при изменении постоянной времени объекта регулирования.....	64
3.2.2 Анализ свойств ПКУ при изменении времени запаздывания объекта управления.....	67
4 Разработка и исследование в среде Matlab свойств системы управления с нечетким регулятором	70
4.1 Выбор метода настройки ПИД регулятора	70
4.1.1 Графические методы.....	70
4.1.2 Аналитические методы.....	73
4.1.3 Методы, основанные на правилах.....	74
4.1.4 Оптимизационные методы.....	76
4.2 Выбор критерия качества регулирования.....	77
4.3 Исследование САР с нечетким псевдолинейным корректирующим устройством с фазовым опережением.	78
4.4 Рекомендация по использованию нечетких корректирующих устройств.	86
5 Программная реализация регулятора в среде ISAGRAF для промышленного контроллера КРОСС-500	88
5.1 Программный пакет Isagraf.....	88
5.2 Программа для системы автоматического регулирования с нечетким регулятором	92
6 Социальная ответственность	96
6.1 Производственная безопасность.....	96
6.1.1 Отклонение параметров микроклимата.....	97
6.1.2 Недостаточность освещения.....	97

6.1.3 Повышенный уровень шума	98
6.1.4 Повышенные уровни электромагнитного поля	99
6.1.5 Электрический ток	100
6.2 Экологическая безопасность.....	101
6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	101
6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	103
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	106
7.1 Организация и планирование работ	106
7.1.1 Продолжительность этапов работ	107
7.1.2 Расчет накопления готовности работ.....	110
7.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ	111
7.2.1 Расчет затрат на материалы	111
7.2.2 Расчет основной заработной платы.....	111
7.2.3 Расчет отчислений от заработной платы	112
7.2.4 Расчет затрат на электроэнергию	113
7.2.5 Расчет амортизационных расходов.....	114
7.2.6 Расчет прочих расходов	115
7.2.7 Расчет общей себестоимости разработки.....	115
7.2.8 Прибыль	115
7.2.9 НДС	115
7.2.10 Цена разработки НИР	116
7.3 Оценка экономической эффективности проекта	116
7.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР	116
Заключение	120
Conclusion.....	121
Список использованных источников	122

Приложение А Реализация нечеткого корректирующего устройства в системе ISaGRAF на языке FBD	125
Приложение Б Программный код, написанный на языке ST	127
Приложение В Fuzzy logic theory basics.....	128

Введение

Как и любые другие технические устройства, системы автоматического регулирования (САР) должны удовлетворять целому ряду требований, таким как быстродействие, точность регулирования и управления. Поэтому одной из важнейших задач при проектировании подобных систем является выбор структурной схемы, а также параметров элементов, которые могут обеспечить требуемые показатели качества.

В настоящее время большинство САР строятся на базе ПИД-регуляторов. Данный регулятор хорошо справляется со своими функциями при статических параметрах объекта управления САР. Однако существует ряд задач, где необходимо применение систем с динамическими параметрами, то есть изменяющимися с течением времени. В подобных случаях можно использовать ПИД-регуляторы, параметры которых подстраиваются в процессе работы. Для настройки параметров такого регулятора требуется или идентификация объекта управления, или использование методов, основанных на вычислениях по кривой переходного процесса. Эти подходы требуют значительного времени для настройки, что усложняет реализацию данных систем.

Для повышения качества систем также используются корректирующие устройства, которые позволяют изменять соответствующие характеристики в зависимости от требований, предъявляемых системе. С помощью внедрения в САР корректирующих устройств можно добиться повышения точности системы, необходимого запаса устойчивости и улучшения качества переходных процессов в целом.

Однако в условиях неопределенности и неполноты знаний об объекте, а также при необходимости создания систем автоматического управления (САУ) для сложных технологических объектов формальные классические методы теории управления могут оказаться неэффективными. Поэтому в настоящее время все большее распространение получают нечеткие регуляторы и системы управления с нечеткой логикой.

Настоящая выпускная квалификационная работа посвящена исследованию и программной реализации нечеткого регулятора на основе псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением.

1 Анализ принципов построения нечетких регуляторов

В последние годы наблюдается большой интерес к одному из важнейших приложений теории нечетких множеств – анализу и синтезу нечетких регуляторов, и применению их в системах автоматического управления. Они показали себя как эффективный и простой инструмент для автоматизации многих практических задач.

Нечеткие регуляторы основываются на теории нечетких множеств и нечеткой логике, которые являются расширением соответствующих классических теорий [15].

1.1 Основы теории нечеткой логики

1.1.1 Понятие нечеткого множества и его основные свойства

Под понятием *множество* подразумевают набор элементов, которые обладают некоторыми общими свойствами. При этом каждый из элементов заведомо или принадлежит данному множеству, или же не принадлежит. Но в большинстве случаев, основываясь на практике прикладных исследований, данный принцип не отвечает процессам, которые протекают в реальных системах.

Понятие нечеткого множества базируется на предположении, что к данному множеству любой элемент принадлежит только в некоторой степени. Поэтому для нечеткого множества определение степени принадлежности числом из интервала $[0,1]$ и есть главный способ математического описания, причем крайние значения этого интервала («0» и «1») обозначают «не принадлежит» и «принадлежит».

Определение 1.1. Пусть E – универсальное множество, которому принадлежит обладающий некоторым свойством R элемент x . A – обычное подмножество, которое состоит из элементов x , определяется как множество пар по формуле:

$$A = \{\mu_A(x) / x\}, \quad (1.1)$$

где $\mu_A(x)$ - *характеристическая функция*, принимает значение в диапазоне $(0;1]$, если x по некоторой степени выполняет свойство R , в противном случае принимает значение 0 .

Функция принадлежности показывает уровень принадлежности элемента к подмножеству A .

Определим основные характеристики нечетких подмножеств. Для этого установим A – как нечеткое множество с элементами универсального множества E и множеством принадлежностей M , где $M = \{0,1\}$.

Определение 1.2. Нечеткое множество A является *нормальным*, если его высота, определяемая величиной $\sup_{x \in E} \mu_A(x)$, равна единице, то есть верхняя граница хоть одной его функции принадлежности равна 1 ($\sup_{x \in E} \mu_A(x) = 1$). Нечеткое множество называют *субнормальным*, если $\sup_{x \in E} \mu_A(x) < 1$.

Определение 1.3. Нечеткое множество называется *пустым*, если $\forall x \in E, \mu_A(x) = 0$. Непустое субнормальное множество можно нормализовать по формуле:

$$\mu_A(x) = \frac{\mu_A(x)}{\sup_{x \in E} \mu_A(x)}. \quad (1.2)$$

Определение 1.4. Нечеткое множество называется *унимодалным*, если хотя бы для одного x справедливо равенство: $\mu_A(x) = 1$.

Определение 1.5. Подмножество с функциями принадлежности, которые имеют значения $\mu_A(x) > 0$, называется *носителем* нечеткого подмножества A , то есть $A = \{x / x \in E, \mu_A(x) > 0\}$.

Определение 1.6. Элементы $x \in E$, которым соответствуют функции принадлежности $\mu_A(x) = 0,5$, называются *точками перехода* множества A .

Теперь рассмотрим основные логические и алгебраические операции над нечетными множествами, и их свойства.

Определение 1.7. Определим A и B как нечеткие множества на унифицированном множестве E . Утверждают, что A содержит B , если

$\forall x \in E \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$. Эта операцию называют *операцией включения* и обозначают как $A \subset B$.

Определение 1.8. Определим A и B как нечеткие множества на унифицированном множестве E . Утверждают, что A равно B , если $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = \mu_B(x)$. Эту операцию называют *равенством* и обозначают как $A = B$.

Определение 1.9. Определим A и B как нечеткие множества на унифицированном множестве E , а $M=[0,1]$. A и B дополняют друг друга, если $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = 1 \Leftrightarrow \mu_B(x)$. Эту операцию называют *дополнением* и обозначают как $B = \bar{A}$ или $\bar{A} = B$. Ясно, что $\bar{\bar{A}} = A$ (дополнение определено для $M=[0,1]$, но его можно определить для любого упорядоченного M).

Определение 1.10. *Пересечением* нечетких множеств A и B называют наибольшее нечеткое подмножество, содержащееся одновременно и в A , и в B , с функцией принадлежности: $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Обозначают как $A \cap B$.

Определение 1.11. *Объединением* нечетких множеств A и B называют наименьшее нечеткое подмножество, включающее как A , так и B , с функцией принадлежности: $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Обозначают как $A \cup B$.

Определение 1.12. *Разностью* нечетких множеств A и B называют нечеткое множество $A \ominus B = A \cap \bar{B}$ с функцией принадлежности: $\mu_{A \ominus B}(x) = \mu_{A \cap \bar{B}} = \min(\mu_A(x), 1 \Leftrightarrow \mu_B(x))$.

Определение 1.13. *Дизъюнктивной суммой* нечетких множеств A и B называют нечеткое множество $A \oplus B = (A \ominus B) \cup (B \ominus A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B)$ с функцией принадлежности: $\mu_{A \oplus B}(x) = \max(\min(\mu_A(x), 1 \Leftrightarrow \mu_B(x)); \min(1 \Leftrightarrow \mu_A(x), \mu_B(x)))$.

Рассмотрим свойства операций пересечение и объединение:

- коммутативность: $A \cap B = B \cap A$ и $A \cup B = B \cup A$;
- ассоциативность: $(A \cap B) \cap C = (B \cap A) \cap C$ и $(A \cup B) \cup C = (B \cup A) \cup C$;
- идемпотентность: $A \cap A = A$ и $A \cup A = A$;

- дистрибутивность: $(A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ и
 $(A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$;
- $A \cup \emptyset = A$, где \emptyset - пустое множество, то есть $\mu_{\emptyset}(x) = 0 \quad \forall x \in E$;
- $A \cap \emptyset = \emptyset$;
- $A \cap E = A$, где E – универсальное множество;
- $A \cup E = E$;
- теоремы де Моргана: $\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$ и $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$.

В отличие от четких множеств, для нечетких множеств в общем случае:

$$A \cap \overline{A} \neq \emptyset, \quad A \cup \overline{A} \neq E.$$

Замечание: Указанные выше операции над нечеткими множествами базируются на использовании max и min операций. В теории нечетких множеств рассматриваются вопросы указания обобщенных и параметризованных операторов пересечения («и»), объединения («или») и дополнения («не»). Одним из подходов к операторам пересечения, дополнения и объединения является класс треугольных норм и конорм, с которыми определяются эти операторы.

Треугольной нормой (t-нормой) называют двуместную действительную функцию $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, которая удовлетворяет следующим условиям:

- ограниченность: $T(0,0) = 0$; $T(\mu_A, 1) = \mu_A$; $T(1, \mu_A) = \mu_A$;
- монотонность: $T(\mu_A, \mu_B) \leq T(\mu_C, \mu_D)$, если $\mu_A \leq \mu_C, \mu_B \leq \mu_D$;
- коммутативность: $T(\mu_A, \mu_B) = T(\mu_B, \mu_A)$;
- ассоциативность: $T(\mu_A, T(\mu_B, \mu_C)) = T(T(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$.

Треугольной конормой (t-конормой) называют двуместную действительную функцию $S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, которая удовлетворяет следующим условиям:

- ограниченность: $S(1,1) = 1$; $T(\mu_A, 0) = \mu_A$; $T(0, \mu_A) = \mu_A$;
- монотонность: $S(\mu_A, \mu_B) \geq S(\mu_C, \mu_D)$, если $\mu_A \geq \mu_C, \mu_B \geq \mu_D$;
- коммутативность: $S(\mu_A, \mu_B) = S(\mu_B, \mu_A)$;

- ассоциативность: $S(\mu_A, S(\mu_B, \mu_C)) = S(S(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$ -.

Теперь рассмотрим алгебраические операций над нечеткими множествами и их свойств.

Определение 1.14. Алгебраическим произведением нечетких множеств A и B называют нечеткое множество, определяемое $\forall x \in E, \mu_{A \times B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$. Обозначают как $A * B$.

Определение 1.15. Алгебраической суммой нечетких множеств A и B называют нечеткое множество, определяемое $\forall x \in E, \mu_{A+B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \Leftrightarrow \mu_A(x) \times \mu_B(x)$. Обозначают как $A + B$.

Для операций произведения и суммы выполняются следующие свойства:

- коммутативность: $A \times B = B \times A$ и $A + B = B + A$;
- ассоциативность: $(A \times B) \times C = A \times (B \times C)$ и $(A + B) + C = A + (B + C)$;
- $A \times \emptyset = \emptyset, A + \emptyset = A, A \times E = A, A + E = E$;
- теоремы де Моргана: $\overline{A \times B} = \overline{A} + \overline{B}$ и $\overline{A + B} = \overline{A} \times \overline{B}$.

Для операций произведения и суммы не выполняются следующие свойства:

- идемпотентность: $A \times A = A$ и $A + A = A$;
- дистрибутивность: $A \times (B + C) = (A \times B) + (A \times C)$ и $A + (B \times C) = (A + B) \times (A + C)$;
- $A \times \overline{A} = \emptyset, A + \overline{A} = E$.

Замечание: При совместном использовании операций объединения, пересечения, произведения и суммы выполняются следующие свойства:

- $A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$;
- $A \times (B \cap C) = (A \times B) \cap (A \times C)$;
- $A + (B \cup C) = (A + B) \cup (A + C)$;
- $A + (B \cap C) = (A + B) \cap (A + C)$.

На основе операции алгебраического произведения определяется операция возведения в степень α нечеткого множества A , где α -

положительное число. Нечеткое множество A^α определяется функцией принадлежности $\mu_{A^\alpha} = \mu_A^\alpha(x)$. Частным случаем возведения в степень являются операция *концентрирования* ($CON(A) = A^2$) и операция *растяжения* ($DIL(A) = A^{0.5}$), которые используются при работе с лингвистическими неопределенностями (Рисунок 1.1)

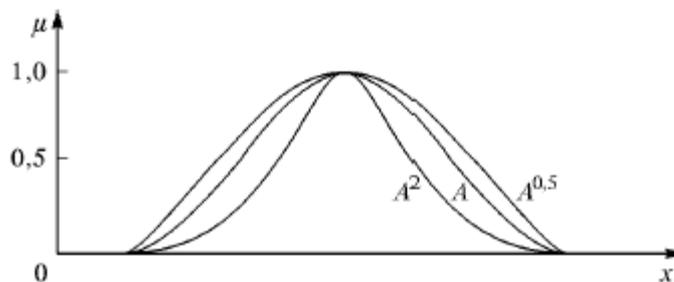


Рисунок 1.1 – Иллюстрации к понятию операций концентрирования (уплотнения) и растяжения

1.1.2 Нечеткая логика и ее основные свойства (нечеткие выводы)

Понятие логики можно определить, как анализ разных методов рассуждений. В изучении этих методов логика воспринимает в первую очередь форму, а не содержание доводов в тех или иных рассуждениях. Логике не интересуют, являются ли отдельные посылки и заключения истинными или же ложными. Важно лишь то, вытекает из истинности посылок истинность заключения или нет. Одной из основных задач логики можно назвать систематизацию, формализацию и каталогизацию правильных способов рассуждения [14,15].

Основа механизма нечетких выводов – это база знаний, которая формируется специалистами предметной области и представляет собой совокупность нечетких предикатных правил:

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

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

.....

Пn: если x есть A_n , тогда y есть B_n ;

где x – входная переменная; y – выходная переменная (вычисляется с помощью базы правил по значению входной переменной); A и B – определенные на x и y функции принадлежности.

Ниже рассмотрим более детальное пояснение.

Причинное нечеткое отношение предпосылки и заключения отражает знание эксперта $A \rightarrow B$, поэтому его можно назвать нечетким отношением и обозначить через R :

$$R = A \rightarrow B, \quad (1.3)$$

где « \rightarrow » обозначается нечеткая импликация.

R рассматривается как нечеткое подмножество прямого произведения $X * Y$ полного множества заключений Y и предпосылок X . Следовательно, получение нечеткого результата вывода B' можно представить в виде формулы с использованием данного наблюдения A' и знания $A \rightarrow B$:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B), \quad (1.4)$$

где « \circ » обозначается операция свертки.

Операции импликации и композиции в алгебре нечетких множеств можно представить по-разному. Следует учитывать, что и итоговый результат будет различаться. Однако, общий логический вывод неизменно реализуется за такие четыре этапа, как [15]:

- этап *фаззификации* или нечеткости (*fuzzification*). Функции принадлежности, которые были определены по значениям входных переменных, применяются к их фактическим значениям для нахождения степеней истинности каждой предпосылке, соответствующей каждому правилу;
- этап *логического вывода*. Значения истинности для каждой предпосылки каждого правила применяются для нахождения заключений каждого правила. Это осуществляется появлением одного нечеткого подмножества, которое назначается каждой переменной нечеткого вывода для каждого правила. Обычно

применяются исключительно операции \min (операция МИНИМУМ) и prod (операция УМНОЖЕНИЕ) в качестве правил логического вывода. При логическом выводе с операцией МИНИМУМА полученная после вывода функция принадлежности отсекается по высоте, которая соответствует вычисленным значениям степеней истинности предпосылок правил (нечеткая логика «И»). При логическом выводе в виде операции УМНОЖЕНИЯ функция принадлежности вывода масштабируется с помощью вычисленных значений степеней истинности предпосылок правила;

- этап *композиции*. Все нечеткие подмножества, которые назначены для каждой переменной вывода, объединяются вместе с целью формирования одного нечеткого подмножества для каждой переменной вывода. В данном случае применяются операции вида \max (МАКСИМУМ) или sum (СУММА). Для композиций вида МАКСИМУМ комбинированный метод вывода нечеткого подмножества организуется поточечным максимумом по всем полученным нечетким подмножествам (нечеткая логика «ИЛИ»). При композиции СУММА формирование комбинированного вывода нечеткого подмножества происходит как поточечная сумма по всем нечетким подмножествам, которые назначены правилами логического вывода переменной;
- этап *дефаззификации* (defuzzication). Приведение к четкости, используемое при приведении в четкое число нечеткого набора выводов.

Рассмотрим подробнее некоторые из методов приведения к четкости.

Алгоритм Mamdani.

Для описания данного алгоритма предположим, что базу знаний описывают два нечетких правила:

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

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

где x и y – входные переменные; z – выходная переменная; $A_1, A_2, B_1, B_2, C_1, C_2$ – заданные функции принадлежности, а четкое значение z_0 определяется на базе четких значений x_0 и y_0 и приведенной информации.

В данном случае алгоритм Mamdani может быть математически описан следующим образом:

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

2. Этап логический вывода: находятся уровни «отсечения» для предпосылок каждого правила (используется операция MIN)

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0),\end{aligned}\tag{1.5}$$

где через « \wedge » обозначена операция логического минимума (min), затем находятся «усеченные» функции принадлежности:

$$\begin{aligned}C'_1(z) &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)), \\ C'_2(z) &= (\alpha_2 \wedge C_2(z)).\end{aligned}\tag{1.6}$$

3. Этап композиции: используя МАКСИМУМ (max, в дальнейшем изображаемой как « \vee ») осуществляется объединение найденных усеченных функций, и как следствие получение итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности:

$$\mu_{\Sigma}(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z)).\tag{1.7}$$

4. Этап дефазификации (для нахождения z_0): осуществляется приведение к четкости (например, центроидным методом) [14,15].

Принцип работы алгоритма продемонстрирован на рисунке 1.2.

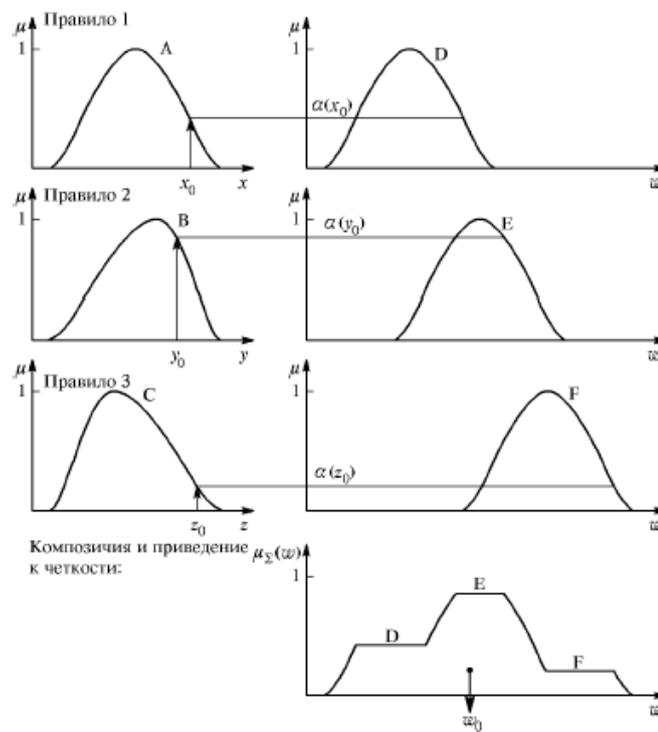


Рисунок 1.2 – Иллюстрация к алгоритму Mamdani

Алгоритм Tsukamoto.

Исходные данные принимаются такими же как у алгоритма Mamdani, но для данного метода предположим, что функции $C_1(z_1)$ и $C_2(z_2)$ - монотонные.

1. Этап нечеткости: тот же принцип, что сформулирован в алгоритме Mamdani.

2. Этап логического вывода: сначала определяются уровни «отсечения» α_1 и α_2 , (как в алгоритме Mamdani), вслед за этим – посредством решения уравнений находится:

$$\alpha_1 = C_1(z), \quad \alpha_2 = C_2(z), \tag{1.8}$$

- четкие значения (z_1 и z_2) для каждого из исходных правил.

3. Этап дефаззификации: формируется четкое значение выходной переменной (как взвешенное среднее z_1 и z_2):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2}{\alpha_1 + \alpha_2} . \tag{1.9}$$

в общем случае (дискретный вариант центроидного вывода) [14, 15]:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} . \quad (1.10)$$

Алгоритм Sugeno.

Для математического описания алгоритма Sugeno и Takagi используем следующий набор правил:

П1: если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда $z_1 = a_1 \cdot x + b_1 \cdot y$,

П2: если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда $z_2 = a_2 \cdot x + b_2 \cdot y$. (1.11)

1. Этап нечеткости: тот же принцип, что сформулирован в алгоритме Mamdani.

2. Этап логического вывода: находятся $\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$, $\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$ и индивидуальные выходы правил:

$$z_1^* = a_1 \cdot x_0 + b_1 \cdot y_0, \quad (1.12)$$

$$z_2^* = a_2 \cdot x_0 + b_2 \cdot y_0.$$

3. Этап дефаззификации: определяется четкое значение выходной переменной [14, 15]:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot z_1^* + \alpha_2 \cdot z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2} . \quad (1.13)$$

Принцип работы алгоритма продемонстрирован на рисунке 1.3.

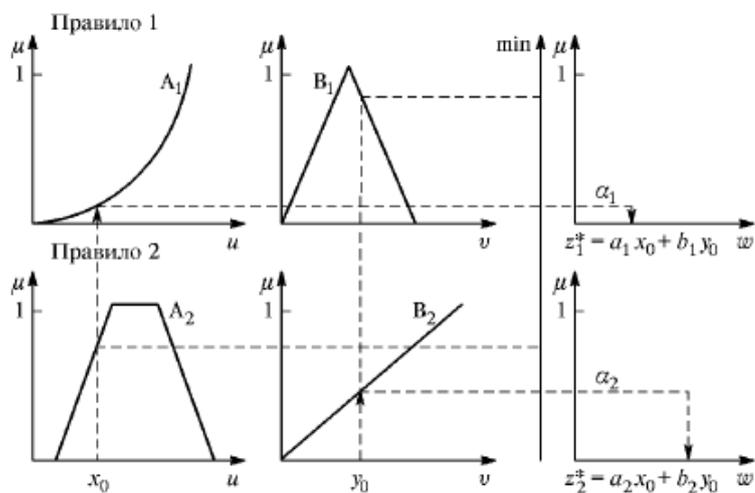


Рисунок 1.3 – Иллюстрации к алгоритму Sugeno

Алгоритм Larsen.

В алгоритме Larsen нечеткая импликация моделируется с использованием оператора умножения.

1. Этап нечеткости: тот же принцип, что сформулирован в алгоритме Mamdani.

2. Этап логического вывода: Этап логического вывода: сначала определяются уровни «отсечения» α_1 и α_2 , (как в алгоритме Mamdani), вслед за этим – частные нечеткие подмножества

$$\alpha_1 C_1(z), \quad \alpha_2 C_2(z). \quad (1.14)$$

3. Этап композиции: определяется итоговое нечеткое подмножество с функцией принадлежности:

$$\mu_z(z) = C(z) = (\alpha_1 C_1(z)) \vee (\alpha_2 C_2(z)). \quad (1.15)$$

в общем случае n правил:

$$\mu_z(z) = C(z) = \bigcup_{i=1}^n (\alpha_i C_i(z)). \quad (1.16)$$

4. Этап дефаззификации: осуществляется приведение к четкости (как в алгоритмах, рассмотренных выше) [14, 15].

Принцип работы алгоритма продемонстрирована на рисунке 1.4.

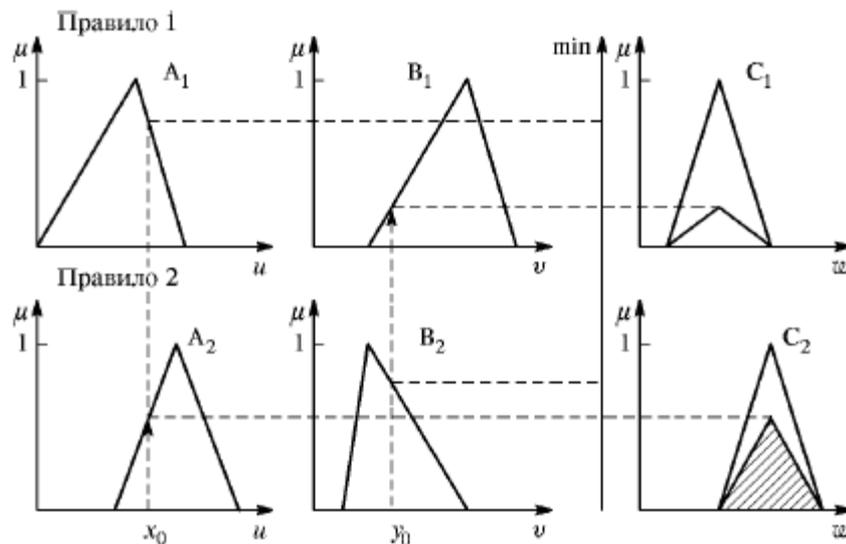


Рисунок 1.4 – Иллюстрации к алгоритму Larsen

Упрощенный алгоритм нечеткого вывода.

Для описания данного алгоритма предположим, что базу знаний описывают следующие нечеткие правила:

П1: если x есть A_1 и y есть B_1 , тогда $z_1 = c_1$,

П2: если x есть A_2 и y есть B_2 , тогда $z_2 = c_2$,

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

1. Этап нечеткости: тот же принцип, что сформулирован в алгоритме Mamdani.

2. Этап логического вывода: Этап логического вывода: сначала определяются уровни «отсечения» α_1 и α_2 , (как в алгоритме Mamdani).

3. Этап дефаззификации: определяется четкое значение выходной переменной по формуле:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot c_1 + \alpha_2 \cdot c_2}{\alpha_1 + \alpha_2} . \quad (1.17)$$

В общем случае наличия n правил – по формуле:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} . \quad (1.18)$$

Принцип работы алгоритма продемонстрирован на рисунке 1.5.

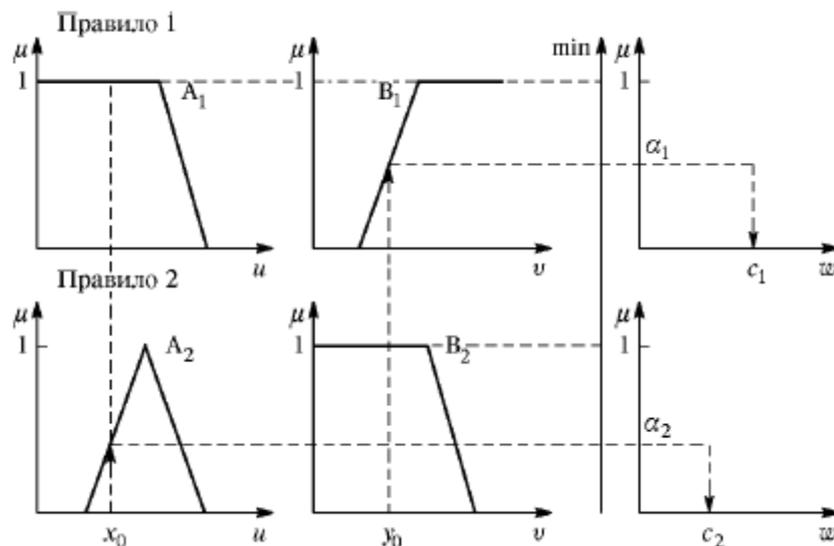


Рисунок 1.5 – Иллюстрация упрощенного алгоритма нечеткого вывода

переменных по каждому из лингвистических термов, использующихся в подусловиях базы правил системы нечеткого вывода.

Порядок выполнения данной процедуры следующий. До начала данного этапа предполагают, что для всех входных переменных системы нечеткого вывода известны конкретные значения, т. е. множество значений $V' = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$. В общем случае каждое $a_i \in X_i$, где X_i — универсум лингвистической переменной β_i . Эти значения можно получить либо от внешнего по отношению к системе нечеткого вывода способом, либо от датчиков. Потом рассматриваются все подусловия вида " β_i есть α " правил системы нечеткого вывода, где a_i — некоторый терм с функцией принадлежности $\mu(x)$. Тем самым количественное значение находится как $b'_i = \mu(a_i)$, используется a_i как аргумент. Полученное значение является результатом фаззификации подусловия " β_i есть α ".

Фаззификация завершена, когда определены все значения для каждого из подусловий всех правил рассматриваемой базы правил системы нечеткого вывода. Выражение $B = \{b'_i\}$ обозначает данное множество значений. При этом если некоторый терм α' лингвистической переменной β_i не присутствует ни в одном из нечетких высказываний, то в процессе фаззификации значение функции принадлежности, соответствующее ему, не находится.

Блок формирования логического решения включает в себя следующие этапы: агрегирование, активирование и аккумулярование.

Под агрегированием подразумевается процедура определения по каждому из правил системы нечеткого вывода степени истинности условий.

Порядок выполнения данной процедуры следующий. Перед началом данного этапа предполагают, что известны значения истинности всех подусловий системы нечеткого вывода, т. е. определено множество значений $B = \{b'_i\}$. Затем рассматривается каждое из условий правил системы нечеткого вывода. Если нечеткое высказывание вида (1.19) и (1.20) соответствует условию правила:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ЕСЛИ } \langle \beta_1 \text{ есть } \alpha \rangle, \quad (1.19)$$

или

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ « β_1 есть $\nabla \alpha$ », (1.20)

где ∇ соответствует высказываниям «ОЧЕНЬ», «БОЛЕЕ ИЛИ МЕНЕЕ», «МНОГО БОЛЬШЕ» и другим, то степень его истинности равна соответствующему значению b'_i .

Если нескольких подусловий включены в условие:

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ « β_1 есть α' » И « β_2 есть α », (1.21)

или

ПРАВИЛО <#>: ЕСЛИ « β_1 есть α' » ИЛИ « β_2 есть α », (1.22)

где лингвистические переменные в подусловиях попарно не равны друг другу, то на основе известных значений истинности подусловий определяется степень истинности сложного высказывания. Так определяются для всех условий правил системы нечеткого вывода количественные значения истинности.

Агрегирование завершено, если определены все значения b''_k для всех правил P , которые входят в рассматриваемую базу системы нечеткого вывода правил R_k . Это множество значений обозначается через $B = \{b''_1, b''_2, \dots, b''_n\}$.

Под активизацией в системах нечеткого вывода подразумевается процедура или определения для всех подзаклучений правил нечетких продукций степени истинности. В общем случае активизация почти аналогична композиции нечетких отношений. Так как системы нечеткого вывода используют лингвистические переменные, свое значение теряют формулы для нечеткой композиции. В действительности при составлении базы правил системы нечеткого вывода задаются весовые коэффициенты F_i для каждого правила (по умолчанию если весовой коэффициент не задан явно, то его значение равно единице).

Порядок выполнения данной процедуры следующий. Перед данным этапом предполагают, что для всех условий системы значения истинности нечеткого вывода известны, т. е. множество значений $B = \{b''_1, b''_2, \dots, b''_n\}$ и значения весовых коэффициентов F_i для каждого из правил. Затем

рассматриваем все заключения правил системы нечеткого вывода. Если нечеткое высказывание представляется заключением правила:

$$\text{ТО } \langle \beta_2 \text{ есть } v \rangle, \quad (1.23)$$

или

$$\text{ТО } \langle \beta_2 \text{ есть } \nabla v \rangle, \quad (1.24)$$

то степень его истинности равна алгебраическому произведению соответствующего значения b''_i на весовой коэффициент F_i .

Если же несколько подзаключений включены в заключение:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ТО } \langle \beta_2 \text{ есть } a \rangle \text{ И } \langle \beta_3 \text{ есть } v \rangle, \quad (1.25)$$

или

$$\text{ПРАВИЛО } \langle \# \rangle: \text{ТО } \langle \beta_2 \text{ есть } a \rangle \text{ ИЛИ } \langle \beta_2 \text{ есть } v \rangle, \quad (1.26)$$

где в подзаключениях лингвистические переменные попарно не равны друг другу, то степень истинности каждого из подзаключений равна алгебраическому произведению соответствующего значения b''_i на весовой коэффициент F_i . Так все значения c_k степеней истинности подзаключений для всех правил P , которые входят в рассматриваемую базу системы нечеткого вывода правил R_k . Полученное множество значений обозначается как $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$, где q — общее количество подзаключений в базе правил.

Возможен такой вариант, когда весовой коэффициент F_i определяется в индивидуальном порядке для отдельных подзаключений. В этом случае активизация остается прежней. После нахождения множества $C = \{c_1, c_2, \dots, c_q\}$ для всех подзаключений определяются функции принадлежности для имеющихся выходных лингвистических переменных. Для этого предлагается использование одного из методов, которые по сути являются модификацией того или иного метода нечеткой композиции:

- min-активизация: $\mu'(y) = \min\{c_i, \mu(y)\}$;
- prod-активизация: $\mu'(y) = c_i \mu(y)$;
- average-активизация: $\mu'(y) = 0.5(c_i + \mu(y))$,

где $\mu'(y)$ - функция принадлежности терма, являющегося значением некоторой заданной на универсуме Y выходной переменной ω_j ,

Этап активизации завершен, если для каждой выходной лингвистической переменной, которые входят в отдельные подзаключения правил нечетких продукций, будут определены функции принадлежности нечетких множеств их значений, т. е. совокупность нечетких множеств: C_1, C_2, \dots, C_q , где q —общее количество подзаклучений в базе правил системы нечеткого вывода.

Под аккумуляцией (или аккумулярованием) в системах нечеткого вывода подразумевается процедура или процесс нахождения функции принадлежности для всех выходных лингвистических переменных множества $W = \{ \omega_1, \omega_1, \dots, \omega_s \}$.

Целью аккумуляции является объединение для получения функции принадлежности всех выходных переменных всех степеней истинности заключений (подзаклучений). Причина необходимости выполнения данного этапа - это принадлежность различным правилам системы нечеткого вывода подзаклучений, которые относятся к одним и тем же выходным лингвистическим переменным.

Процесс выполнения данной процедуры следующий. Перед данным этапом предполагают, что значения истинности для каждого подзаклучения всех правил P , которые входят в рассматриваемую базу системы нечеткого вывода правил R_k определены в форме совокупности нечетких множеств: C_1, C_2, \dots, C_q , где q - общее количество подзаклучений в базе правил. Затем каждая из выходных лингвистических переменных $\omega_j \in W$ рассматривается последовательно, как и относящиеся к ней нечеткие множества: $C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{qj}$.

Этап аккумуляции завершен, если для каждой из выходных лингвистических переменных определены итоговые функции принадлежности нечетких множеств их значений, т. е. совокупность нечетких множеств: C'_1, C'_2, \dots, C'_s , где s — общее количество выходных лингвистических переменных в базе правил системы нечеткого вывода.

На этапе дефаззификации для всех выходных лингвистических переменных множества $W = \{ \omega_1, \omega_1, \dots, \omega_s \}$ происходит нахождение обычного

(четкого) значения. Целью дефаззификации является получение обычного количественного значения каждой из выходных переменных, с использованием результатов аккумуляции для каждой из выходных лингвистических переменных. Этот этап можно назвать этапом приведения к четкости.

Процесс выполнения данного этапа заключается в следующем. Перед данным этапом предполагают, что известны функции принадлежности для каждой выходной лингвистической переменной в форме нечетких множеств: C'_1, C'_2, \dots, C'_s , где s - общее количество выходных лингвистических переменных базы правил системы нечеткого вывода. Затем каждая из выходных лингвистических переменных $\omega_j \in W$ рассматривается последовательно, как и нечеткое множество C'_j , которое к ней относится. В результате дефаззификации определяется количественного значения $y_j \in R$ для выходной лингвистической переменной ω_j в виде, которое определяется по одному из методов дефаззификации.

Дефаззификация завершена, если определены итоговые количественные значения для каждой выходной лингвистической переменной в форме некоторого действительного числа, т. е. в виде y_1, y_2, \dots, y_s , где s — общее количество выходных лингвистических переменных базы правил системы нечеткого вывода.

Отметим некоторые особенности нечеткого регулятора. НР обрабатывает все входные переменные, поэтому на него можно подавать дополнительные переменные, характеризующие процессы в объекте управления, и тем самым обеспечивать более широкое воздействие на динамику управления. Система с НР обычно устойчива в отношении изменений параметров объекта управления, что связано с нечеткой природой правил функционирования. Традиционные методы описания регуляторов, например, при помощи передаточных функций, для НР не подходят и не требуются. НР является нелинейным и его особенностью является отсутствие динамики в самом НР. Отсутствие "памяти" и процедура проектирования, а также словесное описание процесса управления, характеризующееся лингвистическими правилами, являются главными особенностями НР.

Нечеткие регуляторы реализуются на практике, как правило, в форме программного обеспечения высокого уровня, например, «Pascal», что обеспечивает большую гибкость при их настройке. При этом по результатам моделирования и испытаний системы управления, содержащей нечеткий регулятор в замкнутом контуре, можно изменять количественные диапазоны лингвистических переменных, функции принадлежности и модифицировать базу правил с целью получения требуемого качества управления.

Нечеткие регуляторы представляют интерес в первую очередь для управления объектами, которые или не поддаются, или поддаются с большими трудностями формализованному описанию, но даже применительно к управлению объектами, для которых получены математические модели, эти регуляторы часто предпочтительнее других, так как позволяют получить более высокое качество (меньшие ошибки в переходных и установившихся режимах) систем автоматического управления.

При формировании структурных схем систем управления с нечеткими регуляторами важным представляется выбор входных параметров нечеткого регулятора. Лингвистические правила управления сами по себе не могут быть реализованы на современных ЭВМ. Необходима процедура их формализации. В связи с этим очень важной является задача выбора метода формализации экспертных знаний. Поскольку нечеткие множества формализуются посредством функций принадлежности важную роль играет выбор их вида и параметров. При реализации нечеткого управления в современных ЭВМ необходимо задавать конкретные значения параметров функций принадлежности, в первую очередь пределы их изменения. Поэтому важна методика параметрической настройки нечеткого регулятора [19].

2 Анализ корректирующих устройств систем автоматического управления

Под улучшением качества процесса регулирования, помимо повышения точности в типовых режимах, понимается изменение динамических свойств системы регулирования с целью получения необходимого запаса устойчивости и быстродействия. В этой проблеме основное значение имеет обеспечение запаса устойчивости.

При решении задачи повышения запаса устойчивости проектируемой системы регулирования, прежде всего необходимо попытаться рациональным образом изменить ее параметры (коэффициенты передачи отдельных звеньев, постоянные времени и т.п.) так, чтобы удовлетворить требованиям качества регулирования, которые определяются критериями качества. При невозможности решить эту задачу в рамках имеющейся системы приходится идти на изменение (коррекцию) ее структуры.

Под коррекцией систем автоматического управления (САУ) понимается изменение их динамических свойств (характеристик) с целью обеспечения требуемого запаса устойчивости, повышения динамической точности и показателей качества переходного процесса. Коррекция осуществляется включением в систему дополнительных элементов – корректирующих устройств, которые должны изменить динамику всей системы в нужном направлении [1, 2, 4, 5].

Основная задача корректирующих устройств состоит в улучшении точности системы и качества переходных процессов. Однако наряду с этим путем введения корректирующих устройств можно решать и более общую задачу – сделать систему устойчивой, если она была без них неустойчивой, а затем добиться и желаемого качества процесса регулирования.

Все корректирующие устройства, применяемые в системах автоматического управления, можно разделить на линейные, нелинейные и псевдолинейные корректирующие устройства [1, 2].

2.1 Линейные корректирующие устройства

Линейные корректирующие устройства имеют ряд достоинств и широко применяются для улучшения динамических свойств как линейных, так и нелинейных автоматических систем. К явным преимуществам корректирующих устройств данного типа относятся эффективность и простота в реализации [1, 2, 6, 8].

Рассмотрим подробнее наиболее распространенные виды линейных корректирующих устройств.

2.1.1 Дифференцирующее корректирующее устройство

Ухудшение переходного процесса и потеря устойчивости при увеличении коэффициента усиления k_p системы связано с наличием запаздывания в системе колебаний по фазе. Для того, чтобы обеспечить требуемый запас устойчивости по фазе и амплитуде при увеличении k_p , нужно демпфировать логарифмическую фазо- частотную характеристику (ЛФЧХ) системы, приподняв ее вверх, т.е. скомпенсировать запаздывание в некоторой полосе частот, которая расположена около частоты среза ω_{cp} , соответствующей повышенному коэффициенту усиления системы. Подобная деформация ЛФЧХ осуществляется включением последовательного элемента системы устройства, которое бы вносило опережение по фазе синусоидальных колебаний в указанной выше полосе частот, а не запаздывание в отличие от других элементов системы. В результате сложения сигнала рассогласования с производной от него можно достичь опережения по фазе. Подобная операция осуществляется с помощью дифференцирующих звеньев [1, 6]. Передаточная функция звена:

$$W(s) = \frac{k(T_1s+1)}{T_2s+1}, \quad (2.1)$$

где $T_1 > T_2$.

ЛЧХ звена отображены на рисунке 2.1. Логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) построена в соответствии с выражением:

$$L(\omega) = 20 \log k + 20 \log \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} - 20 \log \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1}. \quad (2.2)$$

ЛФЧХ контура на основании формулы:

$$\psi(\omega) = \arctg\omega T_1 - \arctg\omega T_2. \quad (2.3)$$

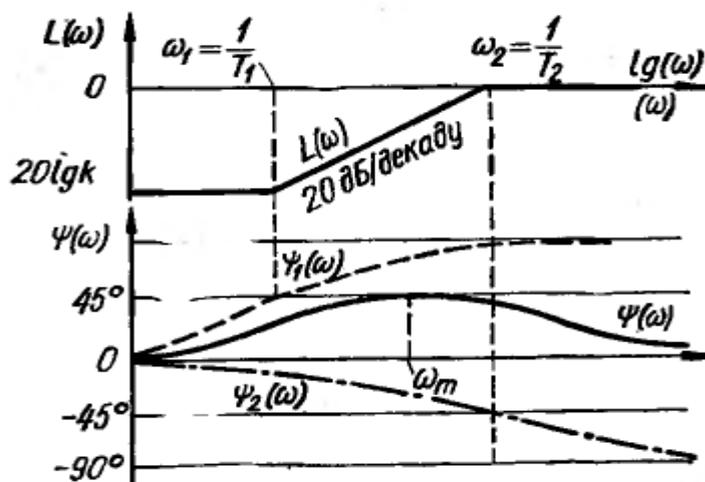


Рисунок 2.1 – ЛЧХ дифференцирующего звена

Исходя из логарифмических частотных характеристик (ЛЧХ), в определенной полосе частот звеном создается опережение по фазе синусоидального сигнала. Чтобы получить большой угол опережения нужно уменьшить коэффициент усиления. Возможно также одновременное изменение T_1 , T_2 и k .

Достоинством дифференцирующих звеньев является то, что одновременно с увеличением коэффициента усиления k системы удастся увеличить и ее частоту среза $\omega_{ср}$, т.е. появляется возможность уменьшения времени переходного процесса наряду с уменьшением ошибки системы в установившемся режиме [1, 6].

К недостаткам данных устройств можно отнести тот факт, что они вносят значительное ослабление в области низких частот, т.е. в области существенных частот спектра полезного сигнала. Это ослабление тем интенсивнее, чем большее опережение должно обеспечить дифференцирующее звено. Для компенсации этого ослабления необходимо увеличивать коэффициент усиления системы за счет других ее элементов [6].

Высокие частоты дифференцирующее звено пропускает без ослабления. Поэтому, если на полезный сигнал, подлежащий дифференцированию,

накладываются быстроизменяющиеся шумы или помехи, спектр которых расположен в области высоких частот, то эти шумы и помехи будут пропускаться устройством без ослабления. Все это является причиной увеличения динамических ошибок системы.

2.1.2 Интегрирующие корректирующие устройства

При поступлении в систему вместе с задающим воздействием помех, дифференцирующее звено, как правило, не дает желаемых результатов. В данных обстоятельствах система должна наиболее эффективно подавлять помехи и в удовлетворительной степени пропускать сигнал. Задающее воздействие обычно представляет собой медленно изменяющуюся функцию времени и поэтому его частотный спектр является узким, расположенным в области низких частот. Помехи имеют более высокочастотный спектр, потому что изменяются быстрее по времени, чем задающее воздействие. В итоге, при наличии помех для получения минимальных ошибок система должна иметь возможно большой коэффициент усиления, а также узкую полосу пропускания в области низких частот (малую частоту среза). С точки зрения уменьшения уровня шумовых помех систему целесообразно корректировать не дифференцирующим, а интегрирующим звеном, которое позволяет увеличивать коэффициент усиления системы, не увеличивая ее частоты среза. С помощью интегрирующего звена целесообразно осуществлять коррекцию также тех систем, от которых требуется большой коэффициент усиления (высокая динамическая точность) [6].

Передаточная функция звена:

$$W(s) = \frac{T_2 s + 1}{T_1 s + 1}, \quad (2.4)$$

при $T_1 > T_2$, где $\frac{T_2}{T_1} = k$.

ЛАЧХ звена представлена на рисунке 2.2 и построена в соответствии с выражением:

$$L(\omega) = -20 \log \sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1} + 20 \log \sqrt{T_2^2 \omega^2 + 1}. \quad (2.5)$$

В области низких и высоких частот выражение для ЛАЧХ имеет соответственно вид:

$$L_{н.ч}(\omega) = 0; L_{в.ч}(\omega) = -20 \log \omega T_1 + 20 \log \omega T_2 = 20 \log k. \quad (2.6)$$

ЛФЧХ звена построена в соответствии с выражением:

$$\psi(\omega) = -\arctg \omega T_1 + \arctg \omega T_2. \quad (2.7)$$

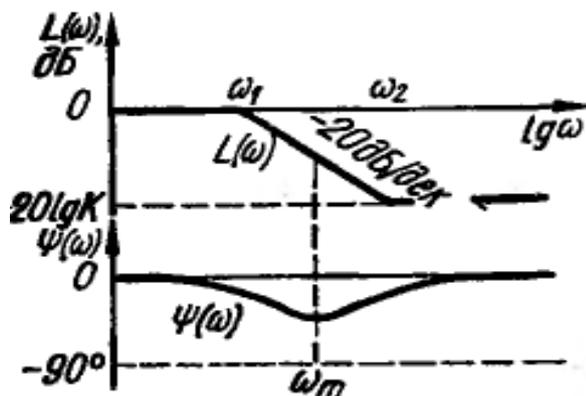


Рисунок 2.2 – ЛЧХ интегрирующего звена

Исходя из представленного ЛЧХ можно сделать вывод, что звено пропускает низкие частоты без ослабления, а высокие с ослаблением $20 \text{ Log } k$. Поэтому данное звено хорошо пропускает спектр полезного сигнала, расположенный в области низких частот, и подавляет высокочастотные помехи.

По ЛФЧХ можно определить, что интегрирующее звено вносит в определенной области частот отставание колебаний по фазе. Частота, соответствующая максимальному углу отставания, определяется, как:

$$\omega_m = \frac{1}{T_1 \sqrt{k}}. \quad (2.8)$$

Максимальный угол отставания определяется по формуле:

$$\psi_{\max}(\omega_m) = -\arctg\left(\frac{1}{\sqrt{k}}\right) + \arctg \sqrt{k}. \quad (2.9)$$

Это обстоятельство и является его недостатком. Однако, область отставания может быть смещена в диапазон низких частот значительно левее частоты среза системы при соответствующем выборе параметров звена. Поэтому запас устойчивости системы при включении звена практически не уменьшается. При этом происходит незначительное ухудшение переходного процесса.

К достоинству данных корректирующих устройств можно отнести значительное повышение усиления системы в области низких частот без увеличения частоты среза системы. Благодаря этому достигается существенное уменьшение установившейся ошибки системы и снижение уровня ошибок, вызываемых быстро изменяющимися помехами.

К недостаткам коррекции САУ подобным устройством является то, что наряду с уменьшением установившейся ошибки ухудшается переходный процесс системы [1, 6].

2.1.3 Интегро-дифференцирующие корректирующие устройства

При коррекции САУ с помощью последовательного интегро-дифференцирующего звена в некоторой степени компенсируются недостатки коррекции с помощью дифференцирующего и интегрирующего звеньев в отдельности. Интегро-дифференцирующее звено дает возможность существенного повышения коэффициента усиления системы и в то же время улучшения переходного процесса за счет увеличения частоты среза системы.

Его передаточная функция:

$$W(s) = \frac{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}{(T_3 s + 1)(T_4 s + 1)}, \quad (2.10)$$

при $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$.

ЛЧХ контура отображены на рисунке 2.3. Частоты сопряжения ЛАХ контура соответственно равны: $\omega_1 = \frac{1}{T_3}$, $\omega_2 = \frac{1}{T_1}$, $\omega_3 = \frac{1}{T_2}$, $\omega_4 = \frac{1}{T_4}$.

ЛФЧХ контура построена в соответствии со следующим выражением:

$$\psi_k(\omega) = \arctg \omega T_1 + \arctg \omega T_2 - \arctg \omega T_3 - \arctg \omega T_4. \quad (2.11) \quad \lg \omega$$

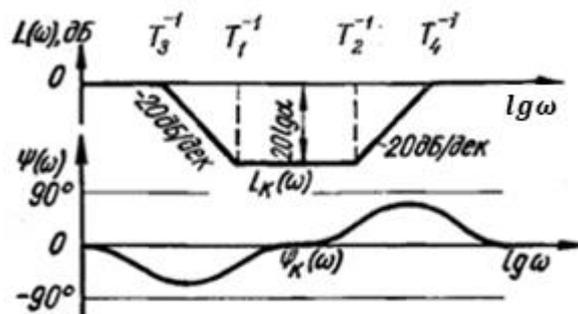


Рисунок 2.3 – ЛЧХ интегро-дифференцирующего звена

Исходя из представленного выше ЛЧХ, интегро-дифференцирующее звено ведет себя в области низких частот как интегрирующее, а в области высоких частот как дифференцирующее.

С помощью последовательного интегро-дифференцирующего контура можно достичь повышения коэффициента усиления системы и увеличения частоты среза, и как следствие, повышение точности системы как в установившемся, так и в переходном режимах [1, 6].

2.2 Нелинейные корректирующие устройства

Коррекция с помощью нелинейных корректирующих устройств обладает рядом преимуществ, по сравнению с линейной [10, 12, 13]. Она предоставляет большее разнообразие форм частотных характеристик, а также она обеспечивает возможность изменять форму частотных характеристик в зависимости от величины амплитуды сигнала.

Нелинейные корректирующие устройства можно классифицировать следующим образом:

- по характеру действия: статические и динамические;
- по способу включения: последовательные, параллельные и устройства, которые представляют собой корректирующие обратные связи;

Также нелинейные корректирующие устройства можно поделить на нелинейные фильтры, нелинейные динамические переключающиеся устройства и нелинейные компенсационные устройства [11].

Нелинейные фильтры представляются как совокупность линейных звеньев, которые разделены безынерционными элементами. Включение данных устройств в систему дает возможность улучшение таких характеристик, как быстродействие, точность и качество переходных процессов.

Нелинейные динамические переключающиеся устройства используют, чтобы улучшить динамические характеристики автоматических систем. Принцип действия данных устройств заключается в том, что во время

колебательного переходного процесса в системе управления реальный управляющий сигнал на некоторых, как правило, небольших интервалах времени заменяется специально сформированным сигналом. Таким образом, управление в системе на этих интервалах времени переключаются с управляющего на корректирующий сигнал.

Компенсационные нелинейные корректирующие устройства предоставляют возможность полной компенсации вредного влияния сопутствующей нелинейности (или как минимум существенного его ослабления).

Для наглядной иллюстрации эффективности нелинейных корректирующих устройств относительно линейных, рассмотрим следующий пример.

Для того, чтобы повысить быстродействие линейной системы (уменьшения времени установления t_y), увеличим коэффициент усиления разомкнутой системы k_p . Это приведет к увеличению колебательности переходного процесса и уменьшению запаса устойчивости. Для демонстрации сказанного на рисунке 2.4 приведены кривые 1 и 2 переходных процессов линейной САУ при коэффициентах усиления k_{p1} и k_{p2} соответственно ($k_{p2} > k_{p1}$).

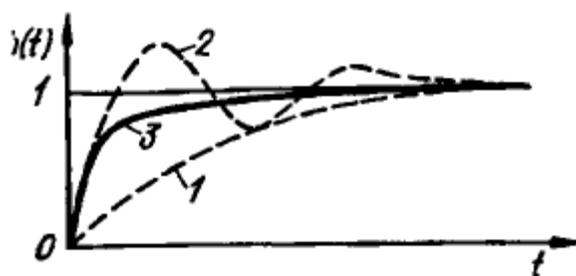


Рисунок 2.4 – Переходные процессы САУ при линейной (1 и 2) и нелинейной (3) коррекции.

Применение линейных корректирующих устройств позволяет повысить в некоторых пределах значение коэффициента усиления системы, однако это не снимает указанного противоречия и необходимости компромиссного решения

при выборе коэффициента усиления системы и настройке корректирующего устройства.

Указанное противоречие можно устранить применением нелинейных корректирующих устройств, изменяющих свое влияние на систему в зависимости от величины отклонения от установившегося режима (ошибки системы).

В результате применения нелинейной коррекции желаемый процесс (представленный кривой 3 на рисунке 2.4) может быть получен. Как видно из рисунка, он сочетает полезные свойства процессов 2 и 1: начальная часть процесса 3 совпадает с процессом 2 линейной системы, благодаря чему обеспечивается большое быстродействие системы, а окончание процесса 3 подобно окончанию процесса 1, т. е. является монотонным. Такой процесс может быть достигнут, например, изменением коэффициента усиления разомкнутой системы k_p , в зависимости от величины ошибки θ . При больших θ значение k_p должно быть большим, чтобы обеспечить быстрое уменьшение ошибки (начальный участок кривой 3), а по мере уменьшения θ значение k_p должно уменьшаться для завершения переходного процесса без перерегулирования. Такое изменение k_p может быть реализовано, например, с помощью простейшего последовательного нелинейного корректирующего устройства (Рисунок 2.5).

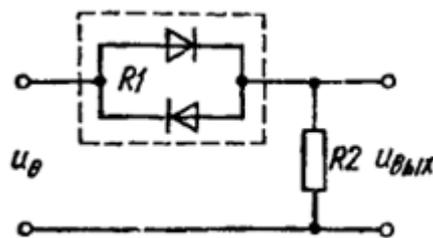


Рисунок 2.5 – Последовательное нелинейное корректирующее устройство

При больших значениях напряжения ошибки u_θ нелинейное сопротивление R_1 мало и поэтому коэффициент усиления цепи $k_1 = R_2 / (R_1 + R_2)$ велико. По мере уменьшения u_θ нелинейное сопротивление R_1 увеличивается, а коэффициент усиления k_1 уменьшается. Примерный график зависимости k_1 от

u_θ представлен на рисунке 2.6. По такому же графику будет изменяться и коэффициент усиления системы k_p . Недостаток коррекции с помощью рассматриваемого корректирующего устройства состоит в том, что оно изменяет лишь k_p системы, не компенсируя при этом вредное влияние инерционностей ее элементов. Из-за этого получаются малые значения k_p в установившихся динамических режимах, следовательно, большие динамические ошибки системы.

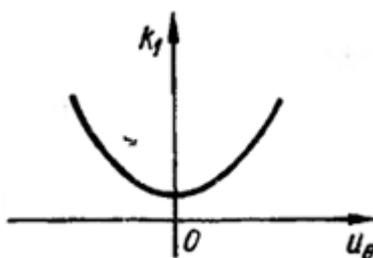


Рисунок 2.6 – Характеристика $k_1 = f(u_\theta)$ последовательного нелинейного корректирующего устройства

Использование нелинейных корректирующих устройств позволяет удовлетворить повышенные требования к показателям качества САУ. С их помощью можно решить задачу компенсации вредных естественных нелинейностей. Однако нелинейная коррекция является более специализированной (менее универсальной) по отношению к внешним воздействиям [6].

2.3 Псевдолинейные корректирующие устройства

Среди нелинейных корректирующих устройств можно выделить класс таких устройств, эквивалентные амплитудно-фазовые характеристики которых не зависят от амплитуды входного сигнала и являются только функциями частоты. У этих устройств отсутствует жесткая связь между амплитудной и фазовой характеристиками, как это имеет место у линейных корректирующих устройств. На этом основании нелинейные корректирующие устройства данного класса можно рассматривать как псевдолинейные. Возможность формирования амплитудной и фазовой характеристик псевдолинейных корректирующих

устройств независимо друг от друга открывает широкие возможности изменения частотных характеристик САУ в желаемом направлении [9].

Псевдолинейные корректирующие устройства состоят из линейных фильтров, создающих фазовое опережение или запаздывание, и блоков, выполняющих различные математические операции, такие как взятие модуля, определение знака величины, умножения, деления.

Данные корректирующие устройства могут быть реализованы в виде двух- и трехканальных нелинейных фильтров, в которых каналы для амплитуды и фазы являются независимыми.

Выходной сигнал в этих корректирующих устройствах формируется в виде произведения сигналов с выхода каждого из каналов. Канал с блоком абсолютной величины амплитудное соотношение, а канал с релейным блоком формирует фазовое соотношение. Для подбора надлежащих значений амплитудных и фазовых соотношений применяются линейные фильтры.

Наиболее широкое распространение получили следующие псевдолинейные корректирующие устройства:

- корректирующие устройства с амплитудным подавлением (ослаблением);
- корректирующие устройства с фазовым опережением;
- корректирующие устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы.

Рассмотрим подробнее принцип работы вышеуказанных устройств.

2.3.1 Корректирующие устройства с амплитудным подавлением.

Псевдолинейное корректирующее устройство, позволяющее получить ослабление амплитуды с ростом частоты без изменения фазы, может быть выполнено по схеме, показанной на рисунке 2.7.

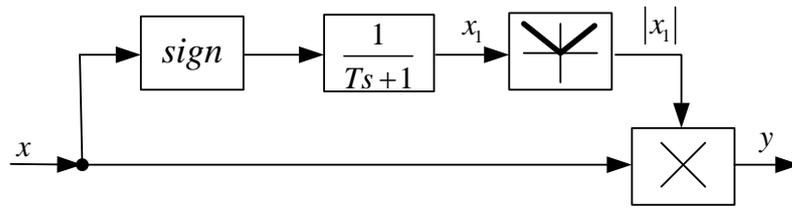


Рисунок 2.7 – Схема псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением

Входной сигнал, разветвляясь, проходит по двум каналам. Верхняя ветвь устройства состоит из блока сигнатуры, фильтра низких частот, блока взятия модуля. По нижней ветви входной сигнал следует без изменения. Сигнал на выходе устройства получается как произведение выходных сигналов обеих ветвей $y = |x_1|x$, причем x_1 определяется по следующему выражению:

$$Tx_1 + x_1 = \text{sign}(x). \quad (2.12)$$

Линейный фильтр имеет следующую передаточную функцию:

$$W_A(s) = \frac{k}{T_2s+1}. \quad (2.13)$$

Коэффициенты гармонической линеаризации нелинейного фильтра определяются по следующим формулам:

$$a(\omega) = \frac{8}{\pi^2\sqrt{1+\omega^2T^2}} \left(1 + \frac{1}{3} \cos 2\theta\right), \quad (2.14)$$

$$b(\omega) = \frac{8}{\pi^2\sqrt{1+\omega^2T^2}} \left(\frac{1}{3} \cos 2\theta\right), \quad (2.15)$$

$$\text{где } \theta(\omega) = -\arctg \omega T. \quad (2.16)$$

Коэффициенты гармонической линеаризации зависят только от частоты, поэтому амплитудная и фазовая характеристики данного корректирующего устройства, определяются по формулам:

$$q(\omega) = \sqrt{[a(\omega)]^2 + [b(\omega)]^2}, \quad (2.17)$$

$$\mu(\omega) = \arctg \frac{b(A,\omega)}{a(A,\omega)}. \quad (2.18)$$

На рисунке 2.8 представлены логарифмические частотные характеристики псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением.

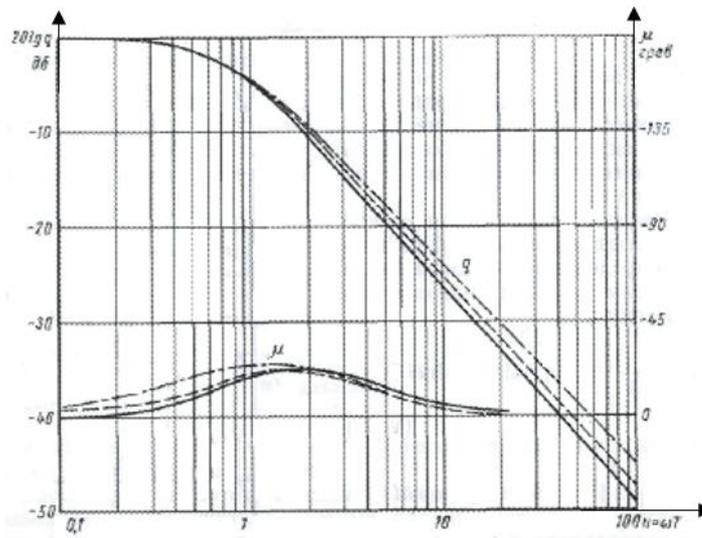


Рисунок 2.8 – ЛАЧХ и ЛФЧХ псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением

Рассмотренная схема псевдолинейной коррекции может быть использована для увеличения запасов устойчивости в системах автоматического управления, в которых возможно применение способа демпфирования.

2.3.2 Корректирующие устройства с фазовым опережением

Примером схемы псевдолинейной коррекции, позволяющей получить фазовое опережение без изменения амплитуды, может служить схема, приведенная на рисунке 2.9.

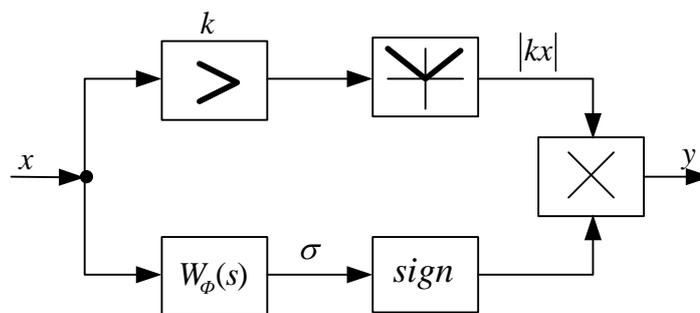


Рисунок 2.9 – Схема псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением

Входной сигнал, разветвляясь, также проходит по двум каналам. Верхняя ветвь устройства состоит из усилителя и блока взятия модуля. Нижняя ветвь – из линейного фильтра и блока сигнатуры. Сигнал на выходе получается как произведение модуля сигнала kx на функцию знака $sign(x)$, где σ является выходом линейного фильтра $W_\phi(s)$, создающего опережение.

Передаточная функция интегро-дифференцирующего звена определяется как:

$$W_{\phi}(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{Ts+1}{T_1s+1}. \quad (2.19)$$

Фазовое опережение, создаваемое этим звеном, определяется как:

$$\alpha(\omega) = \text{arctg} \left(\frac{T\omega(1-\nu)}{1+\omega^2 T^2 \nu} \right), \quad (2.20)$$

где $\nu = \frac{T_1}{T}$. (2.21)

Коэффициенты гармонической линеаризации зависят только от частоты и вычисляются по следующим формулам:

$$a(\omega) = \frac{K}{\pi} [\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha)], \quad (2.22)$$

$$b(\omega) = \frac{K}{\pi} [1 - \cos(2\alpha)]. \quad (2.23)$$

Логарифмические частотные характеристики псевдолинейного фильтра при значении $k=1$ отображены на рисунке 2.10.

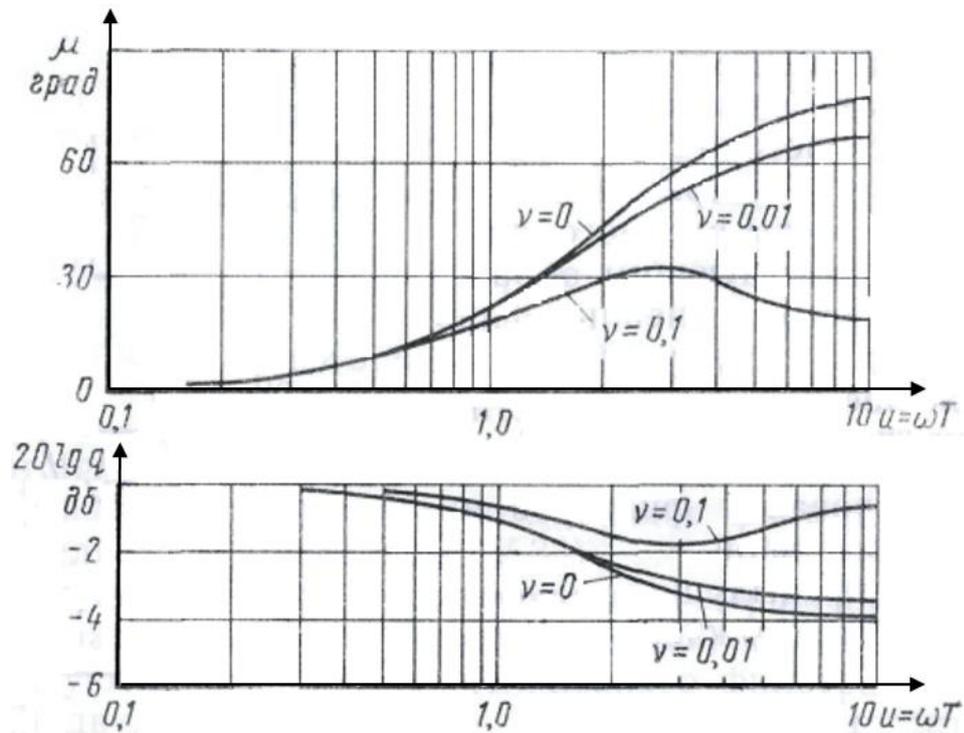


Рисунок 2.10 – ЛАЧХ и ЛФЧХ псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением

Характерным свойством этого звена является независимость частотных характеристик звена от амплитуды входного сигнала. Не учитывая создаваемого

псевдолинейным фильтром ослабления, максимальное значение которого не превышает -4дБ , можно считать, что его частотные характеристики обеспечивают фазовое опережение с ростом частоты без изменения амплитуды. Схема может использоваться вместо линейной схемы коррекции в системах, где для демпфирования требуется вводить фазовое опережение.

2.3.3 Корректирующие устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Схема псевдолинейной коррекции, представленная на рисунке 2.11, позволяет получить различные амплитудно-фазовые соотношения, т.е. относительно независимо формировать амплитудную и фазовую характеристики. Эти характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала. Соответствующим образом, изменяя параметры линейных фильтров, входящих в схему, можно получить желаемые характеристики любого из видов. Поэтому предложенная схема формирования корректирующих устройств является универсальной. Для общего случая линейный фильтр в фазовой ветви является форсирующим звеном, а фильтр в амплитудной ветви – элементом, создающим ослабление амплитуды и отставание по фазе.

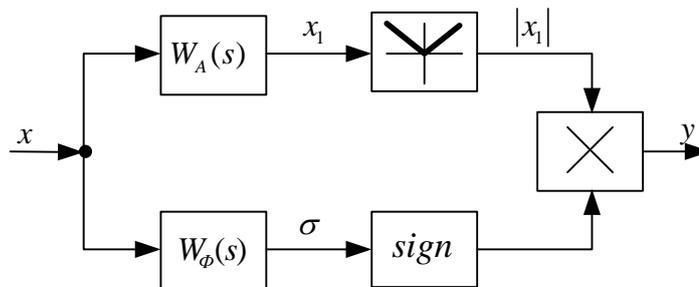


Рисунок 2.11 – Схема псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Входной сигнал, разветвляясь, проходит по двум каналам. Верхний канал называется амплитудным и служит для формирования амплитудной характеристики, нижний канал называется фазовым и формирует фазовую характеристику устройства.

Амплитудный канал состоит из линейного элемента с передаточной функцией $W_A(s)$ и модульного элемента (например, двухполупериодного

выпрямителя). Амплитудная характеристика линейного элемента определяет амплитудную характеристику всего корректирующего устройства. Модульный элемент дает на выходе величину, пропорциональную амплитуде колебания на его входе и исключает прохождение информации о фазе входного сигнала x . Фильтр служит для выделения постоянной составляющей выпрямленного напряжения.

В фазовый канал входят линейный элемент с передаточной функцией $W_{\phi}(s)$ и блок сигнатуры (блок знака). Фазовая характеристика линейного элемента определяет фазовую характеристику всего корректирующего устройства. Блок сигнатуры исключает прохождение информации об амплитуде через фазовый канал и представляет собой релейное устройство с характеристикой, близкой к идеальной. При изменении знака сигнала на входе изменяется знак выходного сигнала блока сигнатуры, а величина его принимает лишь два фиксированных значения ± 1 , независимо от значения амплитуды входного сигнала. Выходная величина y корректирующего устройства получается в результате перемножения выходных величин амплитудного и фазового каналов в блоке умножения.

Передаточная функция линейного элемента амплитудного канала определяется как:

$$W_A(s) = \frac{K}{T_2 s + 1}. \quad (2.24)$$

Передаточная функция линейного элемента фазового канала определяется как:

$$W_{\phi}(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{T s + 1}{T_1 s + 1}, \quad (2.25)$$

где при $T > T_1$ звено обладает дифференцирующими свойствами; при $T < T_1$ звено обладает интегрирующими свойствами.

Коэффициенты гармонической линеаризации зависят только от частоты и определяются по формулам:

$$a(\omega) = \frac{K}{\pi\sqrt{1+\omega^2T^2\gamma^2}} \cdot [(\pi - 2\alpha - 2\theta) \cdot \cos(\theta) + \sin(\theta) + \cos(\alpha) \cdot \sin(\alpha + \theta) + \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha + \theta)], \quad (2.26)$$

$$b(\omega) = \frac{K}{\pi\sqrt{1+\omega^2T^2\gamma^2}} \cdot [(-\pi + 2\alpha + 2\theta) \cdot \sin(\theta) + \cos(\theta) + \sin(\theta) \cdot \sin(2\alpha) + \cos(\theta) \cdot \cos(2\alpha)], \quad (2.27)$$

где $\gamma = \frac{T_2}{T}$; $\nu = \frac{T_1}{T}$; α – фазовое опережение интегро-дифференцирующего звена $W_\Phi(s)$, определенное ранее формулой (2.19); θ – фазовое запаздывание, вносимое фильтром низких частот $W_A(s)$, которое определяется по формуле:

$$\theta(\omega) = \text{arctg}(\omega \cdot \gamma \cdot T). \quad (2.28)$$

Данное корректирующее целесообразно применять в системах управления, где для улучшения качества переходных процессов требуется вводить фазовое опережение с одновременным подавлением амплитуды входного сигнала.

2.4 Выбор корректирующих устройств

Линейные корректирующие устройства имеют ряд достоинств и широко применяются для улучшения динамических свойств как линейных, так и нелинейных автоматических систем. Однако недостатком этих корректирующих устройств является жесткая зависимость между амплитудными и фазовыми частотными характеристиками.

Необходимо выбрать корректирующие устройства, позволяющие формировать амплитудную и фазовую частотные характеристики независимо друг от друга.

Использование псевдолинейных корректирующих устройств позволяет менять АЧХ и ФЧХ независимо друг от друга, а также позволяет достаточно просто реализовать процесс адаптации благодаря отсутствию зависимости частотных характеристик от амплитуды входного сигнала.

В промышленных объектах управления, находящихся в процессе работы, возможно изменение только АЧХ или только ФЧХ независимо друг от друга. Поэтому в данной работе для исследования были выбраны псевдолинейные

корректирующие устройства с фазовым опережением и амплитудным подавлением.

3 Исследование свойств псевдолинейных корректирующих устройств

3.1 Исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением.

3.1.1 Анализ свойств ПКУ при изменении постоянной времени объекта регулирования

Для анализа свойств псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением рассмотрим работу следующей САУ:

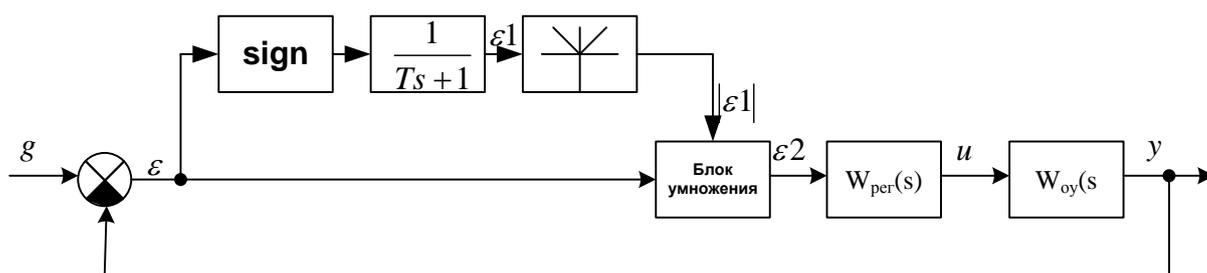


Рисунок 3.1 – Структурная схема САУ с псевдолинейным КУ с амплитудным подавлением

Объектом управления примем звено второго порядка с передаточной функцией:

$$W(s) = \frac{k}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}. \quad (3.1)$$

Данная функция описывает большое количество всевозможных технологических объектов. При $T_1 \geq 2T_2$ функция (3.1) описывает аperiodическое звено. Данное звено описывает температуру печи, напряжение генератора, число оборотов двигателя. При $T_1 < 2T_2$ функция (3.1) описывает колебательное звено. Звено описывает число оборотов крупного электродвигателя, а также курс корабля [1, 25].

Начальными параметрами объекта управления примем: $T_2 = 1$, $T_1 = 5$, $k=1$.

Передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = \left[K_{\text{П}} + \frac{1}{T_{\text{и}} s} + T_{\text{д}} \left(\frac{Ns}{s+N} \right) \right]. \quad (3.2)$$

Находим параметры регулятора, используя встроенные методы пакета Optimization Toolbox среды Matlab.

По окончании процесса оптимизации параметры ПИД-регулятора равны: $K_{\text{П}} = 12.47$; $T_{\text{Д}} = 7.05$; $T_{\text{И}} = 2.064\text{с}$ при параметре сглаживающего фильтра $N=100$.

Переходный процесс после настройки ПИД-регулятора для данной системы представлен на рисунке 3.2.

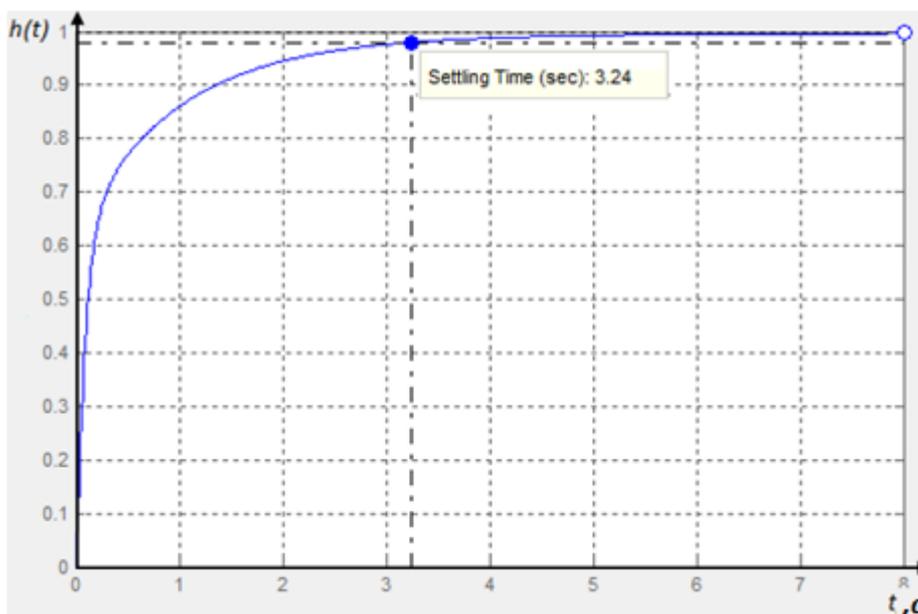


Рисунок 3.2 – Переходный процесс рассматриваемой САУ после настройки параметров регулятора.

Для введения нестационарности изменим постоянную T_2 объекта с 1 до 15 секунд. При этом настройки ПИД-регулятора оставим прежними. Переходная характеристика САУ с изменившимся объектом и ранее настроенным регулятором отображена на рисунке 3.3.

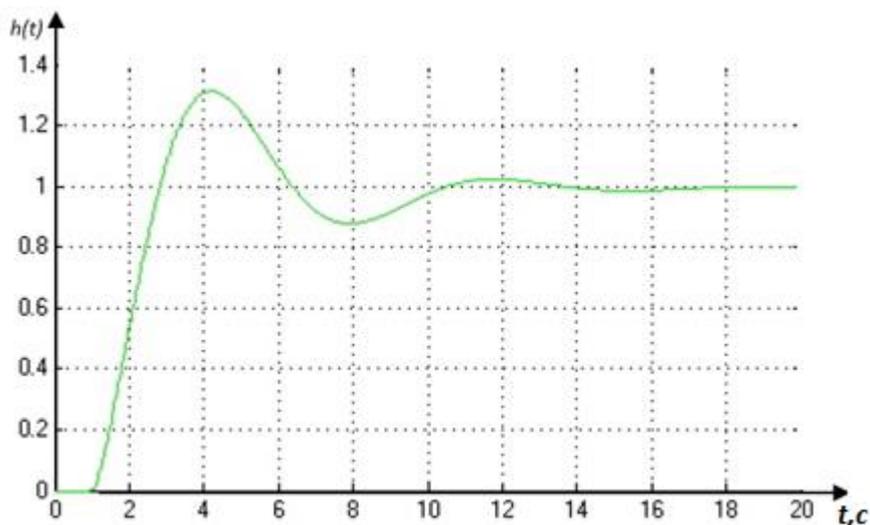


Рисунок 3.3 – Переходный процесс рассматриваемой САУ после изменения ОУ.

По полученной характеристике можно отметить, что процесс из апериодического перешел в колебательный, ранее отсутствовавшее перерегулирование стало равным около 30%, а время регулирования составляет 14 секунд. Таким образом, ранее настроенный регулятор перестал справляться с задачей регулирования.

По структурной схеме, представленной ранее на рисунке 3.1, реализуем модель САУ с объектом второго порядка с корректирующим устройством с амплитудным подавлением в среде Matlab (рисунок 3.4).

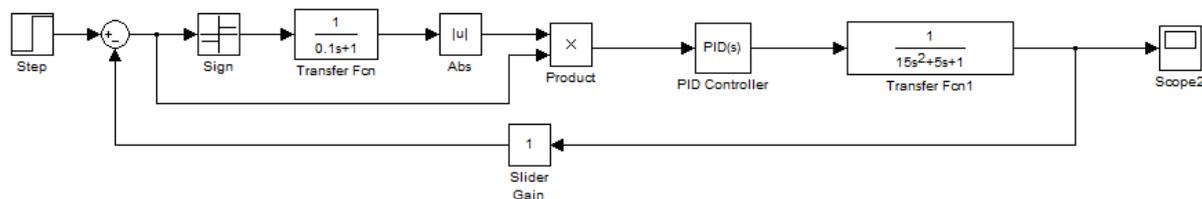


Рисунок 3.4 – Модель САУ с корректирующим устройством с амплитудным подавлением

Проведем исследование реакции системы на единичное задающее ступенчатое воздействие при одинаковых параметрах объекта управления и разных параметрах псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением.

На рисунке 3.5 продемонстрировано семейство кривых переходного процесса на задающие ступенчатое воздействие при вариации постоянной времени корректирующего устройства $T=0,1с, 1с, 10с, 50с, 100с, 200с$.

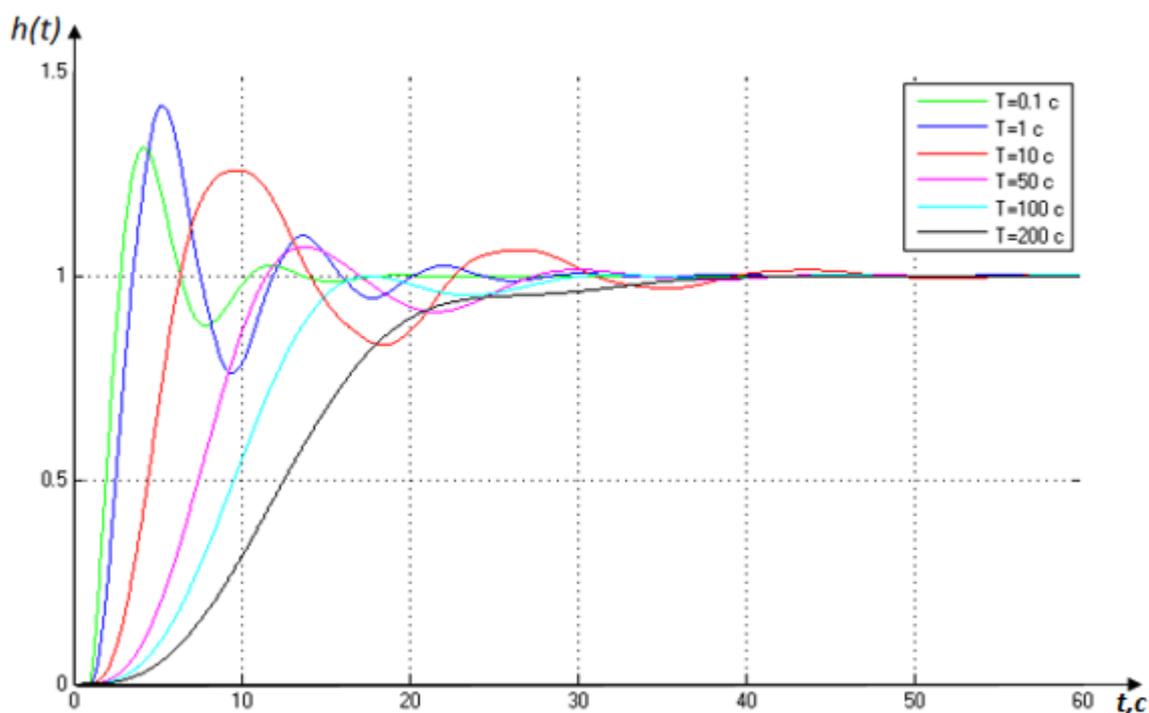


Рисунок 3.5 – Семейство кривых переходного процесса при изменении постоянной времени от 0,1 до 200 сек

Анализируя представленное семейство можно прийти к выводу, что характер переходного процесса САУ существенно зависит от значения постоянной времени T корректирующего устройства. При малом значении T переходный процесс становится еще более колебательным и перерегулирование достигает 30%. При $T=50$ с перерегулирование составляет менее 10% и колебательность переходного процесса заметно уменьшается. При $T=200$ с переходный процесс становится аperiodическим, но существенно увеличивается время регулирования и становится равным 35 сек.

Таким образом увеличение постоянной времени КУ уменьшает величину перерегулирования, увеличивается затухание, но при этом снижается быстродействие системы.

3.2.2 Анализ свойств ПКУ при изменении времени запаздывания объекта управления

Многие объекты управления в той или степени обладают инерционностью, вызывающей как запаздывание во времени и тем самым

изменение управляемой величины от управляющего воздействия. Это запаздывание может быть переходным (емкостным) или же транспортным (чистым) [7].

Переходное запаздывание присуще объектам, в которых есть емкости, индуктивности, вращающиеся массы. Оно возникает при преодолении потоком вещества или энергии сопротивлений, разделяющих тепловые, гидравлические и другие емкости объекта.

Транспортное запаздывание присуще объектам, имеющим передаточные органы (такие, как трубопроводы, транспортеры, ЛЭП) между управляющим органом и выходом объекта.

Примером объекта с транспортным запаздыванием является стан холодной прокатки металла, где датчик толщины листа по конструктивным соображениям не может находиться непосредственно под валками, а только на некотором удалении от них. Вследствие этого выходная величина объекта – толщина листа – имеет транспортное или «чистое» запаздывание относительно регулирующего воздействия – степени обжима металла валками.

Наличие чистого запаздывания в технологическом процессе приводит к тому, что сигнал на выходе объекта в течении некоторого времени после применения входного сигнала остается неизменным.

Если в объекте присутствует какой-либо из видов запаздывания, это сильно влияет на характер протекания переходных процессов в оптимальных по быстродействию системах управления, поэтому во многих случаях данные системы оказываются непригодными для практического применения. Отсюда возникает задача компенсации запаздывания путем соответствующего выбора алгоритма управления.

Для анализа поведения псевдолинейных корректирующих устройств при изменении времени запаздывания системы примем за объект управления передаточную функцию второго порядка с запаздыванием следующего вида:

$$W(s) = \frac{k}{T_2s^2 + T_1s + 1} e^{-\tau s} \quad (3.3)$$

Начальные параметры объекта управления равны $T_2 = 1\text{с}$, $T_1 = 5\text{с}$, $k=1$, $\tau=0,5\text{с}$. Параметры регулятора были определены в предыдущем пункте и равны $K_{\text{П}} = 12.47$; $T_{\text{Д}} = 7.05$; $T_{\text{И}} = 2.064\text{с}$.

Модель в среде Matlab Simulink, позволяющая провести анализ адаптивных свойств корректирующего устройства с амплитудным подавлением при различных значениях времени запаздывания объекта изображена на рисунке 3.6

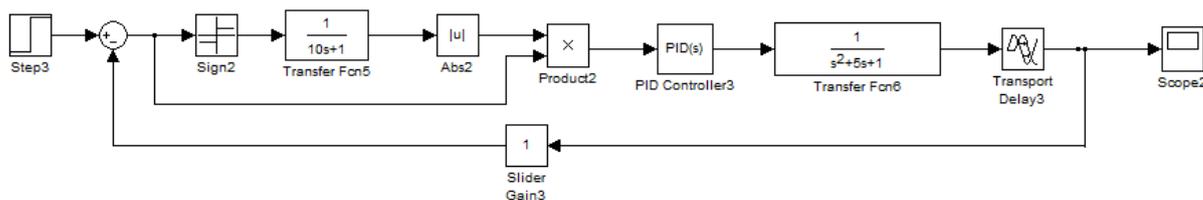


Рисунок 3.6 – Модель САУ с корректирующим устройством с амплитудным подавлением

Предположим, что значение времени запаздывания ОУ изменилось от начального $\tau=0,5$ до 5с . График переходного процесса САУ без учета влияния корректирующего устройства:

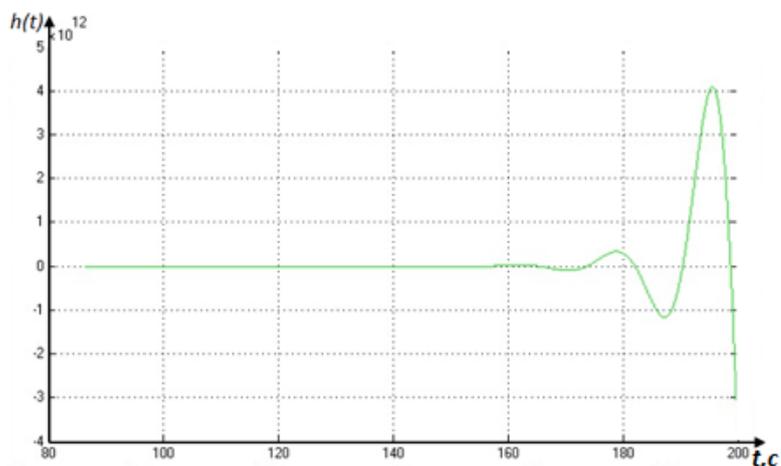


Рисунок 3.7 – График переходного процесса САУ после изменения времени запаздывания объекта управления

Из рисунка 3.7 видно, что переходный процесс стал расходящимся, и система потеряла устойчивость. Из этого следует, что начальные настройки ПИД-регулятора не способны компенсировать влияние изменения τ объекта.

Построим семейство переходных процессов САУ, меняя постоянную времени T корректирующего устройства с амплитудным подавлением. На рисунке 3.8 представлены графики при значениях $T=10, 25, 50, 100, 500$ с:

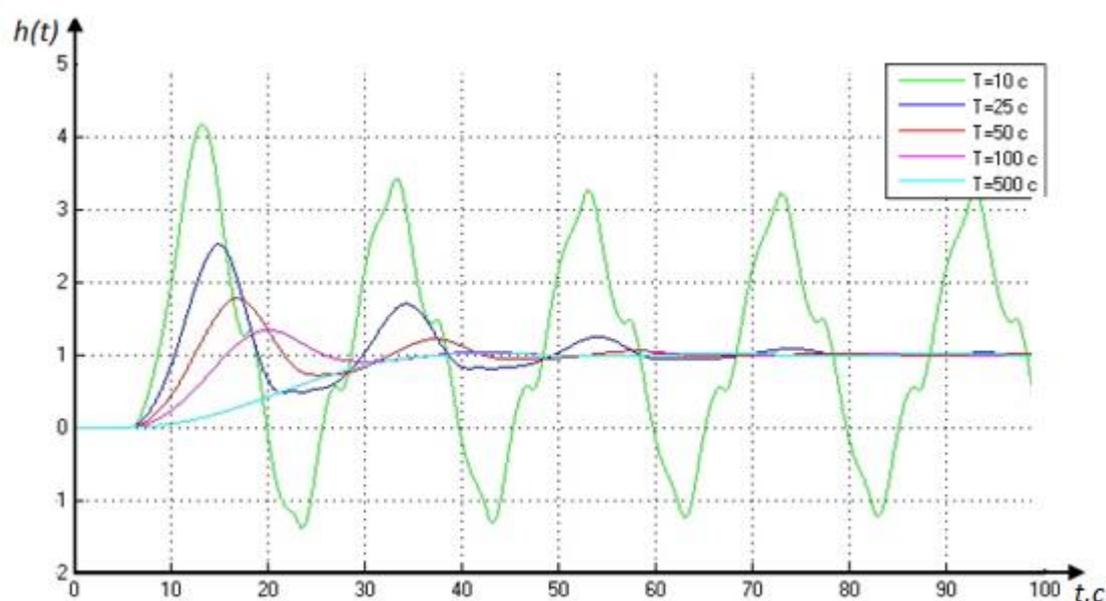


Рисунок 3.8 – Семейство переходных процессов САУ при изменении параметра T от 10 до 500 сек

Анализируя характеристики приходим к выводу, что при увеличении постоянной времени T корректирующего устройства САУ из неустойчивого состояния переходит в устойчивое, при этом уменьшается перерегулирование и увеличивается затухание. Также при $T=500$ с удастся избавиться от колебательности и достичь апериодического переходного процесса.

При малых значениях T корректирующее устройство не существенно влияет на изменение качества регулирования, однако при увеличении T корректирующее устройство способно обеспечить устойчивость системы и хорошие показатели качества (величину перерегулирования меньше 10%) даже при увеличении времени задержки до $\tau = 10$. Но время переходного процесса при этом достигает около 100 секунд (рисунок 3.9).

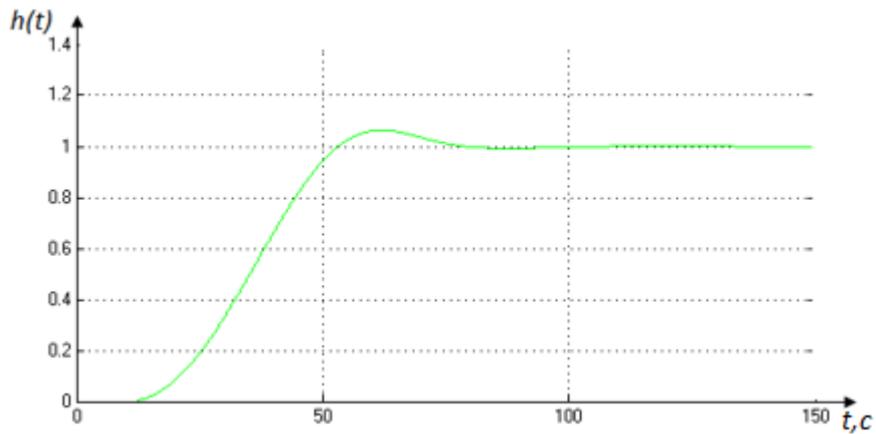


Рисунок 3.9 – Переходный процесс САУ с Т корректирующего устройства, равной 1200с и τ ОУ, равной 10с

3.2 Исследование свойств псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением.

3.2.1 Анализ свойств ПКУ при изменении постоянной времени объекта регулирования

Для анализа адаптивных свойств псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением рассмотрим работу САУ, представленной на рисунке 3.10:

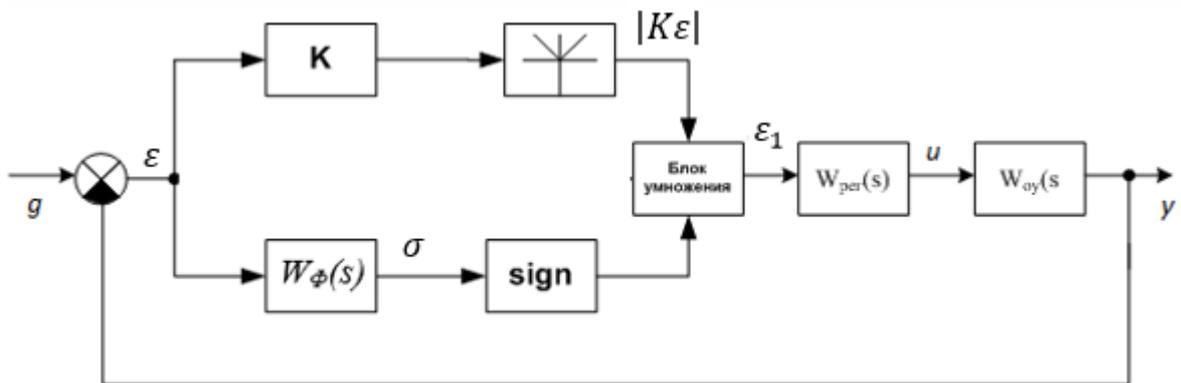


Рисунок 3.10 – Структурная схема САУ с псевдолинейным КУ с фазовым опережением

Объектом управления примем звено второго порядка с передаточной функцией $W(s) = \frac{k}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}$. Начальные параметры объекта управления: $T_2 = 1$, $T_1 = 5$, $k=1$. Значение параметров ПИД-регулятора возьмем из предыдущего

пункта: $K_{\Pi} = 12.47$; $T_{\text{д}} = 7.05$; $T_{\text{и}} = 2.064\text{с}$. Коэффициент усиления КУ примем $K=1$.

Передаточная функция интегро-дифференцирующего звена, входящего в КУ имеет вид

$$W_{\phi}(s) = \frac{T_1}{T} \cdot \frac{T_1s+1}{T_1s+1}. \quad (3.3)$$

Проведем исследование реакции системы на единичное задающее ступенчатое воздействие при одинаковых параметрах объекта управления и разных постоянных времени T корректирующего устройства. Значение постоянной времени T_1 КУ примем равным $0,1\text{с}$.

По структурной схеме, представленной ранее на рисунке 3.10, реализуем модель САУ с объектом второго порядка с корректирующим устройством с амплитудным подавлением в среде Matlab (рисунок 3.11).

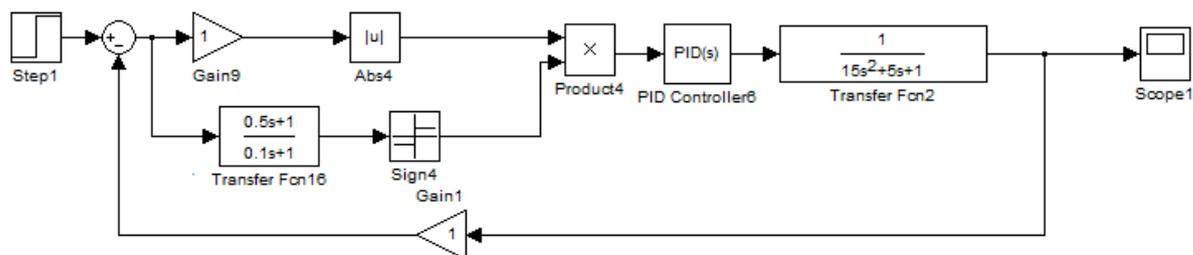


Рисунок 3.11 – Модель САУ с корректирующим устройством с фазовым опережением

Проведем исследование реакции системы на единичное задающее ступенчатое воздействие при одинаковых параметрах объекта управления и разных параметрах псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением.

На рисунке 3.12 продемонстрировано семейство кривых переходного процесса на задающие ступенчатое воздействие, полученных при вариации постоянной времени корректирующего устройства $T=0.1, 0.5, 1, 2, 5\text{с}$.

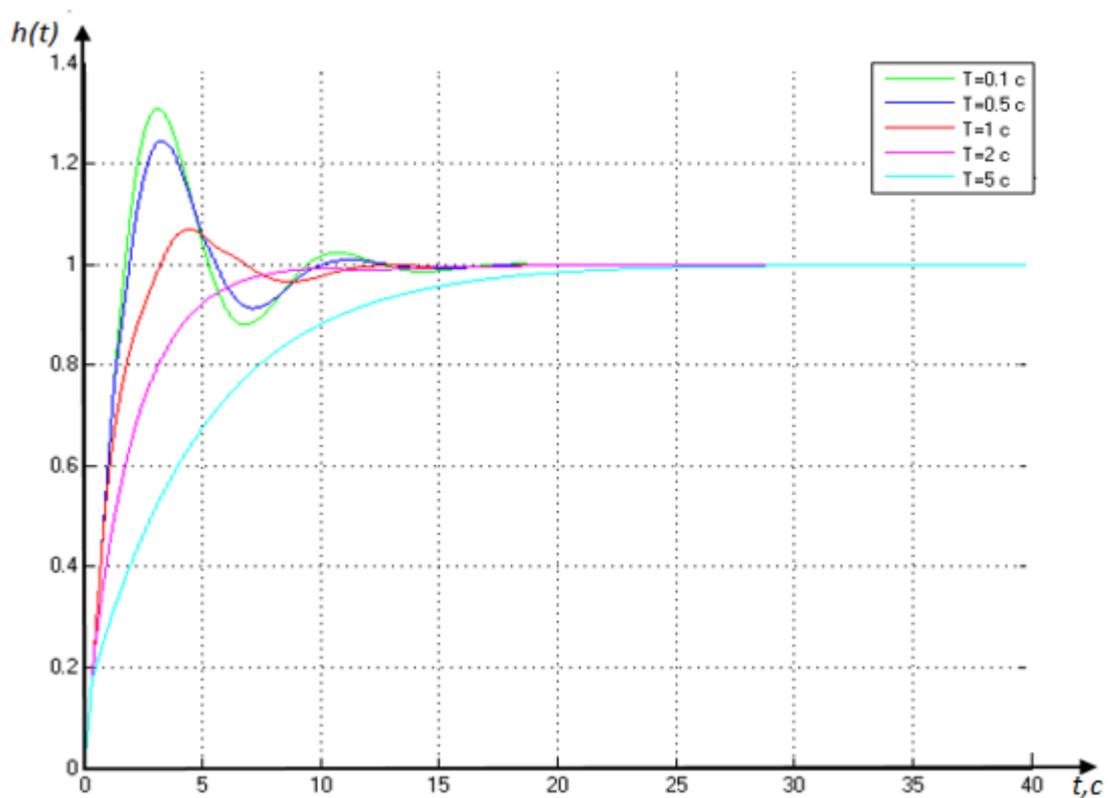


Рисунок 3.12 – Семейство кривых переходного процесса при изменении постоянной времени T от 0.1 до 5 с.

Моделирование показало, что уже при постоянной времени T , равной 2с, переходный процесс становится аperiodическим со временем регулирования 10 секунд. Дальнейшее увеличение T приводит к затягиванию процесса и, соответственно, к увеличению времени регулирования.

Таким образом, характер кривых переходного процесса САУ существенно зависит от постоянной времени T корректирующего устройства. С увеличением постоянной T при одном и том же значении T_1 устраняется перерегулирование (с 30 до 0%), увеличивается затухание и меняется быстродействие.

При этом следует отметить, что в отличие от псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением, данное КУ существенно быстрее уменьшает перерегулирование, при этом незначительно увеличивая время регулирования. Но параметр T стоит выбирать как можно точнее. Завышенное значение данного параметра все же устранил перерегулирование, но при этом существенно затянет переходный процесс.

3.2.2 Анализ свойств ПКУ при изменении времени запаздывания объекта управления

Для анализа поведения псевдолинейных корректирующих устройств при изменении времени запаздывания системы примем за объект управления ту же передаточную функцию второго порядка с запаздыванием, что использовали в предыдущем пункте (формула 3.2).

Начальные параметры объекта управления равны $T_2 = 1\text{с}$, $T_1 = 5\text{с}$, $k=1$, $\tau=0,5\text{с}$. Параметры регулятора были определены в предыдущем пункте и равны $K_{\text{П}} = 12.47$; $T_{\text{Д}} = 7.05$; $T_{\text{И}} = 2.064\text{с}$.

Модель в среде Matlab Simulink, позволяющая провести анализ адаптивных свойств корректирующего устройства с амплитудным подавлением при различных значениях времени запаздывания объекта представлена на рисунке 3.13.

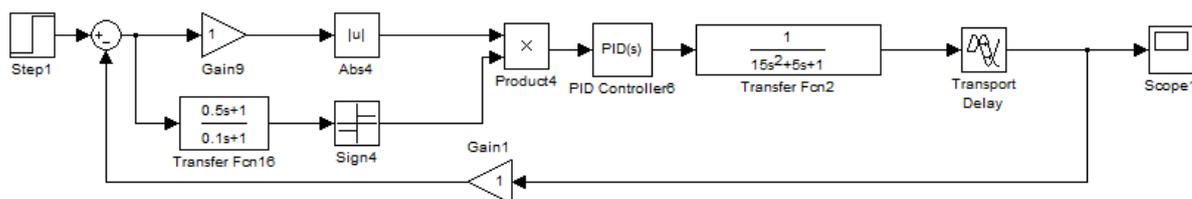


Рисунок 3.13 – Модель САУ с корректирующим устройством с фазовым опережением

Предположим, что значение времени запаздывания ОУ изменилось от начального $\tau=0,5$ до 5с .

Меняя параметр T в пределах от 1 до 100с , при неизменном $T_1 = 0,1\text{с}$ приходим к выводу, что корректирующее устройство с фазовым опережением не способно существенно улучшить качество САУ при τ равной 5с . На рисунке 3.14 приведены реакции САУ на входное ступенчатое воздействие при $T=10\text{с}$ и $T=100\text{с}$.

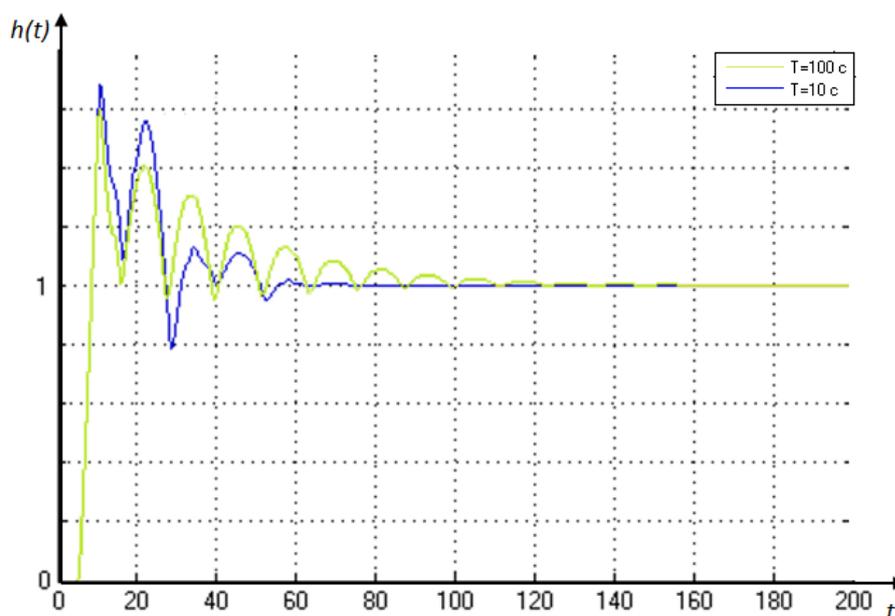


Рисунок 3.14 – Переходные процессы САУ при постоянной времени корректирующего устройства с фазовым опережением $T=10$ с и $T=100$ с

Из рисунка видно, что перерегулирование составляет более 60%, а время регулирования около 140 секунд. Таким образом, необходимо найти величину τ объекта, при которой корректирующее устройство способно обеспечить улучшение качества САУ. Исследования показали, что максимальное значение времени запаздывания объекта, при котором КУ может улучшить показатели качества САУ равно трем секундам. Постоянной времени КУ при этом равна $T=5$ с. Переходный процесс САУ при этих условиях представлен на рисунке 3.15

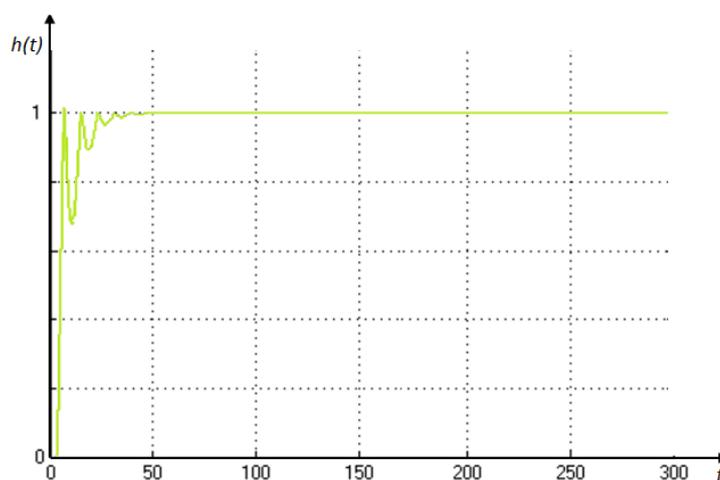


Рисунок 3.15 – Переходный процесс САУ с параметром ОУ $\tau = 3$ с и постоянной времени КУ $T=5$ с

В заключении можно сделать вывод, что возможности по улучшению показателей САУ при изменяющемся времени запаздывания объекта управления шире у псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением. Данное устройство способно улучшить показатели качества САУ при максимальном изменении τ ОУ до 10 с, в то время как псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением только до τ , равной 3 секундам.

Таким образом, можно реализовать САУ с псевдолинейными корректирующими устройствами, значения постоянных времени которых будут изменяться при изменении значений τ объекта управления. При выборе КУ предпочтение следует отдавать псевдолинейному корректирующему устройству с амплитудным подавлением.

4 Разработка и исследование в среде Matlab свойств системы управления с нечетким регулятором

4.1 Выбор метода настройки ПИД регулятора

В настоящее время около 90-95% регуляторов, которые находятся в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм. Причинами такой высокой распространенности данного закона управления стали простота и легкая техническая реализация.

Качество регулирования ПИД-регулятора определяется тем, насколько точно настроены его параметры. Существует много различных методик настройки ПИД регуляторов. Попытаемся классифицировать их и привести основные принципы этих методов [18]:

- графические;
- аналитические;
- на основе определенных правил;
- оптимизационные.

4.1.1 Графические методы

Сутью большинства графических методов является построение области устойчивости в координатах параметров регуляторов. Далее осуществляется построение в этих координатах новой области рассчитанных по определенному (заранее заданному) критерию параметров, и, основываясь на дополнительных правилах, выбираются оптимальные параметры настройки регуляторов. Самым известным правилом выбора оптимальных параметров для данного подхода является рекомендация Астрема и Хагlundа [26] о том, что интегральная составляющая должна быть максимальной, потому что при подаче возмущающего воздействия это обеспечивает минимальное время установления.

Для иллюстрации принципа работы графических методов рассмотрим следующую замкнутую САУ (представленную на рисунке 4.1), в которой предполагается задание желаемого запаса по амплитуде и фазе.

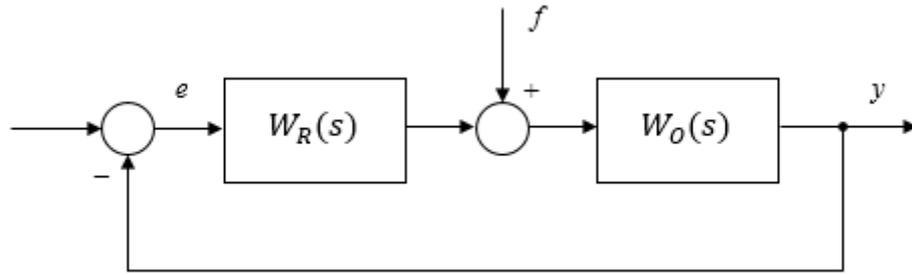


Рисунок 4.1 – Обобщенная структурная схема САУ

Передаточные функции регулятора и объекта управления представим в виде:

$$W_R(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d s = \frac{k_p s + k_i + k_d s^2}{s}, \quad (4.1)$$

$$W_O(s) = \tilde{W}(s)e^{-\tau s} = \frac{N(s)}{D(s)} e^{-\tau s}. \quad (4.2)$$

Затем выделим действительную и мнимую часть числителя $N(s)$ и знаменателя $D(s)$:

$$W_O(j\omega) = \frac{N_{re}(-\omega^2) + j\omega N_{im}(-\omega^2)}{D_{re}(-\omega^2) + j\omega D_{im}(-\omega^2)}. \quad (4.3)$$

Таким образом, знаменатель передаточной функции нашей замкнутой системы можно представить в виде:

$$\begin{aligned} & [(k_i N_{re} - \omega^2 k_d - \omega^2 k_p N_{im}) \cos(\omega\tau) + (\omega^3 k_d N_{im} - \omega k_p N_{re} - \\ & - \omega k_i N_{im}) \sin(\omega\tau) - \omega^2 D_{im}] + j[(\omega k_p N_{re} + \omega k_i N_{re} - \\ & - \omega^3 k_d N_{im}) \cos(\omega\tau) + (\omega^2 k_d - k_i N_{re} + \omega^2 k_p N_{im}) \sin(\omega\tau) + \omega D_{re}] = R_D + \\ & + jI_D = 0. \end{aligned} \quad (4.4)$$

Выразим параметры k_p , k_i через k_d :

$$k_p = \frac{(N_{re} D_{re} + D_{im} N_{im} \omega^2) \cos(\omega\tau) + \omega(N_{re} D_{im} - N_{im} D_{re}) \sin(\omega\tau)}{(N_{re}^2 + \omega^2 N_{im}^2) \cos^2(\omega\tau) + (N_{re}^2 + 2\omega^2 N_{im}^2) \sin^2(\omega\tau) - N_{re} \omega \cos(\omega\tau) \sin(\omega\tau)}, \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned}
k_i = & \frac{\omega \sin(\omega\tau)[D_{im}\omega^2 + N_{re}D_{re} + N_{re}D_{re}\omega^2 - k_d N_{re}\omega^2 \cos(\omega\tau)]}{N_{re}^2 + N_{im}^2\omega^2 + N_{im}\omega^2 \sin^2(\omega\tau) - N_{re}\omega \cos(\omega\tau)\sin(\omega\tau)} + \\
& + \frac{\omega^2 \sin^2(\omega\tau)[k_d N_{re}^2 + 2k_d N_{im}^2\omega^2]}{N_{re}^2 + N_{im}^2\omega^2 + N_{im}\omega^2 \sin^2(\omega\tau) - N_{re}\omega \cos(\omega\tau)\sin(\omega\tau)} + \\
& + \frac{\omega^2 \cos(\omega\tau)[N_{re}D_{re} - D_{im}N_{re}] + \omega^2 \cos^2(\omega\tau)[k_d N_{re}^2 + k_d N_{im}^2\omega^2]}{N_{re}^2 + N_{im}^2\omega^2 + N_{im}\omega^2 \sin^2(\omega\tau) - N_{re}\omega \cos(\omega\tau)\sin(\omega\tau)}. \quad (4.6)
\end{aligned}$$

Введем в прямой участок цепи звено запаздывания для обеспечения заданных запасов по амплитуде и фазе с передаточной функцией:

$$G(s) = A e^{-j\varphi}. \quad (4.7)$$

Аналогично, определим параметры k_p и k_i :

$$k_p = \frac{(N_{re}D_{re} + D_{im}N_{im}\omega^2) \cos(\omega\tau + \varphi) + \omega(D_{im}N_{re} - N_{im}D_{re})\sin(\omega\tau + \varphi)}{A(N_{re}^2 + \omega N_{im}^2)}, \quad (4.8)$$

$$k_i = \frac{\omega(D_{re}N_{im} - D_{im}N_{re}\omega) \cos(\omega\tau + \varphi) + \omega(D_{re}N_{re} + D_{im}N_{im})\sin(\omega\tau + \varphi)}{A(N_{re}^2 + \omega N_{im}^2)} + k_d. \quad (4.9)$$

Для того, чтобы найти параметр k_d , можно использовать критерий Гурвица, позволяющий определить границы параметра k_d (который обеспечит устойчивое состояние системы).

Таким образом, сначала определяется глобальная область устойчивости системы в координатах параметров настройки регулятора (представлена на рисунке 4.2).

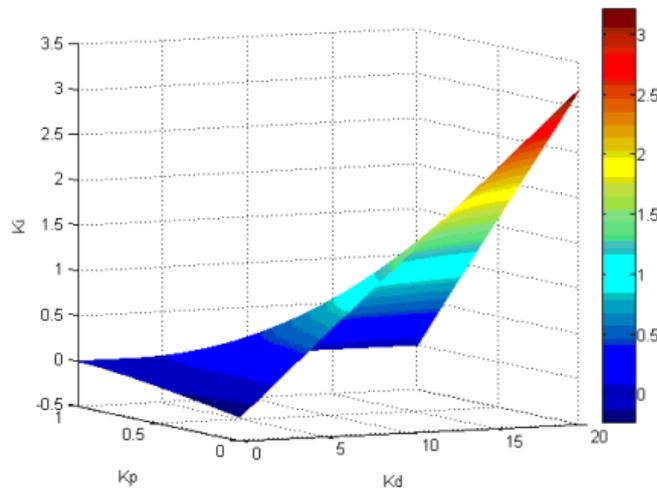


Рисунок 4.2 – Глобальная область устойчивости системы с ПИД-регулятором

Далее эту область объединяется с областью, которая будет гарантировать заданные запасы устойчивости по амплитуде и фазе (представлена на рисунке 4.3).

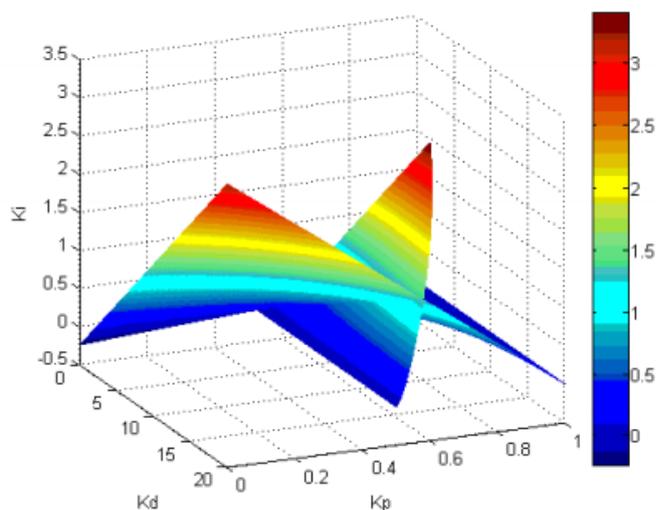


Рисунок 4.3 – Области устойчивости системы с ПИД-регулятором

Из полученного графика можно выбрать обеспечивающие заданные запасы устойчивости параметры настройки ПИД-регулятора и при этом гарантировать устойчивость системы.

Как мы видим, трудоемкий процесс построения областей – это существенный недостаток методов данного типа. Также к недостаткам можно отнести лишь приблизительную возможность определить набор параметров настройки регулятора.

4.1.2 Аналитические методы

Аналитические методы настройки параметров ПИД-регулятора базируются на обеспечение определенных критериев (например, достижение максимальной степени устойчивости САУ, заданных запасы устойчивости по амплитуде и фазе, соблюдение критерия оптимального модуля и т.п.) в настраиваемой системе.

Для иллюстрации принципов работы аналитических методов рассмотрим метод оптимального модуля.

Критерий оптимального модуля может быть сформулирован в следующих требованиях:

- для полезного сигнала полоса пропускания системы должна быть как можно более широкой;
- амплитудная характеристика должна быть монотонной и убывающей, т.е. не должна иметь резонансного пика. Условия этого требования могут быть математически записаны в виде:

$$\frac{d^k}{d\omega^k} \left[\left| \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} \right| \right]_{\omega=0} = 0, \quad (4.10)$$

где $G(j\omega)$ – передаточная функция разомкнутой САУ; $k = 1, 2, \dots, l$ – число настраиваемых параметров регулятора.

Недостатком этого метода является невозможность задания каких-либо желаемых характеристик системы.

4.1.3 Методы, основанные на правилах

Самыми распространенными методами при настройке регуляторов в промышленности стали методы, основанные на правилах, за счет простоты настройки [17].

Зиглером и Никольсом был предложен метод настройки регуляторов, основанный на параметрах отклика объекта на единичное ступенчатое воздействие.

Определение параметров происходит следующим образом. Работающая система переводится в пропорциональный закон регулирования, т.е. интегральная и дифференциальная составляющие регулятора отключаются. Далее увеличиваем пропорциональный коэффициент k_P до тех пор, пока не возникнут незатухающие колебания при $k_P = k_{kP}$ с периодом колебаний $T_{кр}$. И затем по полученным значениям k_{kP} и $T_{кр}$ рассчитываются все параметры регулятора согласно значениям в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры настройки регулятора по методу Зиглера-Никольса

Регулятор	k_p	k_i	k_d
П-регулятор	$T/k\tau$		
ПИ-регулятор	$0,9T/k\tau$	$0,3T/k\tau^2$	
ПИД-регулятор	$1,2T/k\tau$	$0,6T/k\tau^2$	$0,6T/k$

Недостатком данного метода является обеспечение не очень высоких показателей качества (таких как большое значение перерегулирования и времени регулирования). Это объясняется использованием в качестве критерия качества настройки значение декремента затухания (который равен 4), и, как следствие, медленное затухание процесса колебаний и малый запас устойчивости.

Другой не менее популярный метод называется CHR (Chien-Hrones-Reswick). В отличие от предыдущего метода, здесь используется критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии перерегулирования не более 20%.

CHR метод предполагает две различные системы параметров регулятора. Первая система используется при наблюдении отклика на изменение уставки; вторая система используется наблюдении отклика на внешние возмущения.

Таблица 4.2 – Параметры настройки регулятора по методу CHR по отклику на изменение уставки

Регулятор	Без перерегулирования			С 20%-м перерегулированием		
	k	T_i	T_d	k	T_i	T_d
П	$0,3/\alpha$	-	-	$0,7/\alpha$	-	-
ПИ	$0,35/\alpha$	$1,2L/k$	-	$0,6/\alpha$	L/k	-
ПИД	$0,6/\alpha$	L/k	$0,5L/k$	$0,95/\alpha$	$1,4L/k$	$0,47L/k$

Таблица 4.3 Параметры настройки регулятора по методу CHR по отклику на внешние возмущения

Регулятор	Без перерегулирования			С 20%-м перерегулированием		
	k	T_i	T_d	k	T_i	T_d
П	$0,3/\alpha$	-	-	$0,7/\alpha$	-	-
ПИ	$0,6/\alpha$	$4L/k$	-	$0,/\alpha$	$2,3L/k$	-
ПИД	$0,95/\alpha$	$2,4L/k$	$0,42L/k$	$1,2/\alpha$	$2L/k$	$0,42L/k$

Параметры L и α определяются по переходной характеристике объекта, как показано на рисунке 4.4

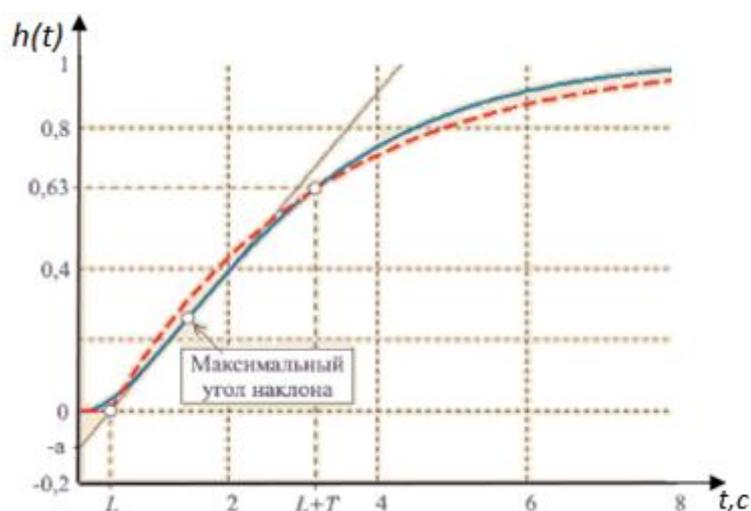


Рисунок 4.4 – Демонстрация определения параметров L и α по переходной характеристике объекта

Исходя из целей конкретного регулятора (поддерживать качество регулирования или же ослабление внешних воздействий), выбирают необходимую систему параметров.

Как было уже отмечено выше, главный недостаток подобных методов – низкая точность настройки. Для повышения точности после применения правил проводится ручная коррекция.

4.1.4 Оптимизационные методы

Судить об определенной оптимальности процессам можно по интегральным показателям качества. Однако эти функционалы не допускают нахождения параметров настройки ПИД-регуляторов напрямую.

Есть много примеров методов настройки ПИД-регуляторов на основе лишь интегральных показателей, но данные методы являются лишь уточняющими средствами, т.к. зависят от начальных условий, выбираемых путем расчета параметров настройки другим методом.

Для достижения требуемого переходного процесса и оптимизации настраиваемых параметров в среде Matlab (Simulink) предназначен специальный пакет расширения Optimisation Toolbox. Для его использования необходимо

лишь включить в схему модели блок Signal Constraint. Данный блок предоставляет в распоряжения пользователя графический интерфейс для настройки параметров динамических объектов. В качестве средства для достижения указанной цели принимается оптимизационный подход, обеспечивающий минимизацию функции штрафа за нарушение динамических ограничений. Задание динамических ограничений осуществляется в визуальном режиме. На базе этих ограничений блок автоматически генерирует задачу конечномерной оптимизации так, чтобы точка экстремума в пространстве настраиваемых параметров соответствовала выполнению всех требований, предъявляемых к качеству процесса. Эта задача решается с привлечением специализированной процедуры квадратичного программирования из пакета Optimization Toolbox. Ход оптимизации контролируется на экране с помощью отображения графика контролируемого процесса и текущих значений минимизируемой функции. По завершению процесса его результат фиксируется в рабочем пространстве.

Данный метод определения параметров прост в реализации и одновременно с этим обеспечивает высокие показатели качества системы, поэтому именно его мы выбираем для нахождения параметров ПИД-регулятора.

4.2 Выбор критерия качества регулирования

Перед тем, как приступить к расчету параметров регулятора, нужно сформулировать цель регулирования и выбрать соответствующий критерий качества регулирования. Для тех или иных задач наиболее значимыми могут быть такие факторы, как отклик системы на внешнее возмущение (время установления, перерегулирование), реакция на сигнал уставки, робастность по отношению к разбросу параметров и т.п.

Для оценки качества регулирования замкнутой системы с ПИД-регулятором удобно использовать входное ступенчатое воздействие и набор критериев, описывающих переходный процесс, таких как [27]:

- перерегулирование (σ);

- время регулирования (t_p);
- декремент затухания ε ;
- число колебаний (n) за время регулирования t_p ;
- время нарастания переходного процесса (t_H);
- время достижения первого максимума (t_{max}).

Также для оценки качества используются интегральные критерии. Эти оценки представлены следующими соотношениями:

$$I_0 = \int_0^{t_p} (y_{зад} - y) dt, \quad (4.11)$$

где I_0 – линейная интегральная оценка.

$$I^2 = \int_0^{t_p} (y_{зад} - y)^2 dt, \quad (4.12)$$

где I^2 – квадратичная интегральная оценка.

Квадратичную интегральную оценку можно применять как при монотонных, так и при колебательных переходных процессах. Выберем эту оценку в качестве критерия для дальнейшего анализа САУ. Она также характерна простой реализацией при моделировании нечеткой адаптивной системы в среде Matlab Simulink и на промышленных контроллерах.

4.3 Исследование САУ с нечетким псевдолинейным корректирующим устройством с фазовым опережением.

Рассмотрим структуру системы управления с коорректирующим устройством, работающим на основе аппарата нечеткой логики, представленную на рисунке 4.5.

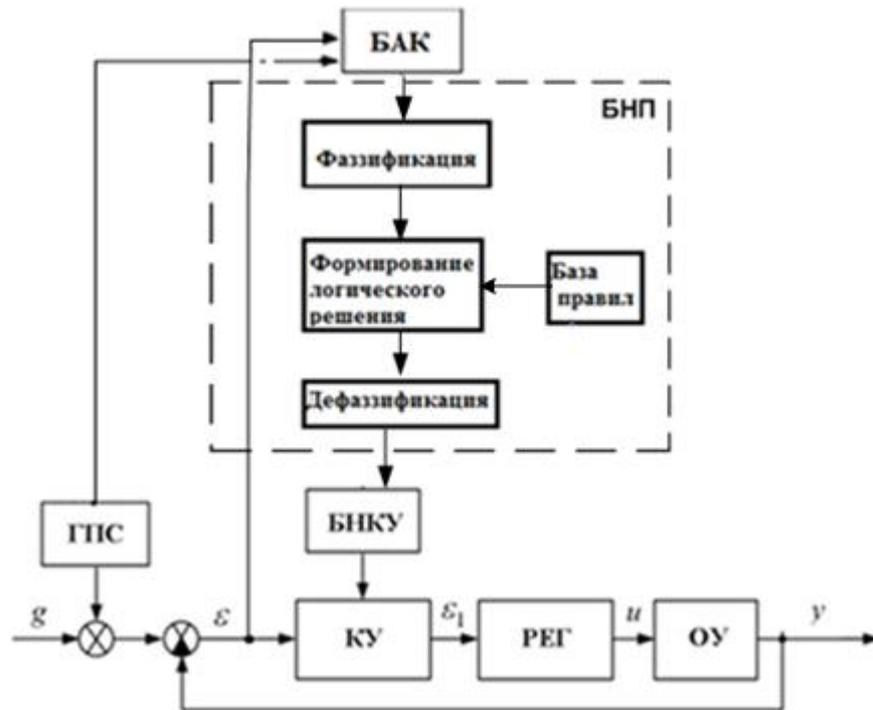


Рисунок 4.5 – Структурная схема САУ с нечетким корректирующим устройством

На рисунке 4.5 использованы следующие обозначения: БАК – блок анализа интегрального квадратичного критерия; БНП – блок нечетких преобразований; БНКУ – блок настройки корректирующего устройства; ГПС – генератора пробного сигнала; ОУ – объект управления; КУ - корректирующее устройство; РЕГ – ПИД-регулятор.

Покажем реализацию нечеткого регулятора с одним из выбранных корректирующих устройств, так как их разработка не имеет принципиальной разницы.

В качестве корректирующего устройства будем использовать корректирующее устройство с фазовым опережением, потому что как показали исследования, в отличие от псевдолинейного корректирующего устройства с амплитудным подавлением, данное КУ существенно быстрее уменьшает перерегулирование в системе с нестационарным объектам управления второго порядка.

Подстройка осуществляется изменением значения постоянной времени T при неизменном T_1 корректирующего устройства. В качестве критерия

подстройки, как было сказано ранее, выбран интегральный квадратичный критерий.

Принцип работы данной системы можно описать следующим образом. После запуска САУ в работу и окончании переходного процесса блок ГПС посылает в САУ импульс заданной длины и амплитуды. После чего в блоке БАК происходит подсчет оценки интегрального квадратичного критерия, который запоминается в качестве эталонной оценки. По прошествии некоторого времени ГПС вновь посылает пробный импульс в САУ и вновь происходит подсчет текущего интегрального квадратичного критерия, после чего текущая оценка сравнивается с эталонной и результат сравнения поступает в БНП. Выходной величиной БНП является значение постоянной времени T корректирующего устройства, которое поступает в КУ и запоминается в нем.

В качестве объекта управления выберем звено второго порядка с передаточной функцией $W(s) = \frac{k}{T_2 s^2 + T_1 s + 1}$, при $k=1$, $T_2=1$ с, $T_1=5$ с. Параметры ПИД-регулятора определены с помощью встроенных методов специального пакет расширения Optimisation Toolbox среды Matlab.

После завершения процесса настройки, параметры ПИД-регулятора равны $K_P = 12.47$; $T_D = 7.05$; $T_I = 2.064$ с.

Для составления входных и выходных переменных функций принадлежности будем полагать, что параметры объекта в течении работы могут меняться в пределах $T_2 = 2 \div 20$ с. Функции принадлежности формируются по следующему алгоритму. Меняем постоянные времени корректирующего устройства, определяя при каждой значении интегрального квадратичного критерия. Вместе с этим подбираем постоянную времени КУ так, чтобы после коррекции САУ перерегулирование составляло не более 10%, а время регулирования было минимальным. Для этого построим модель в Simulink, которая представлена на рисунке 4.6.

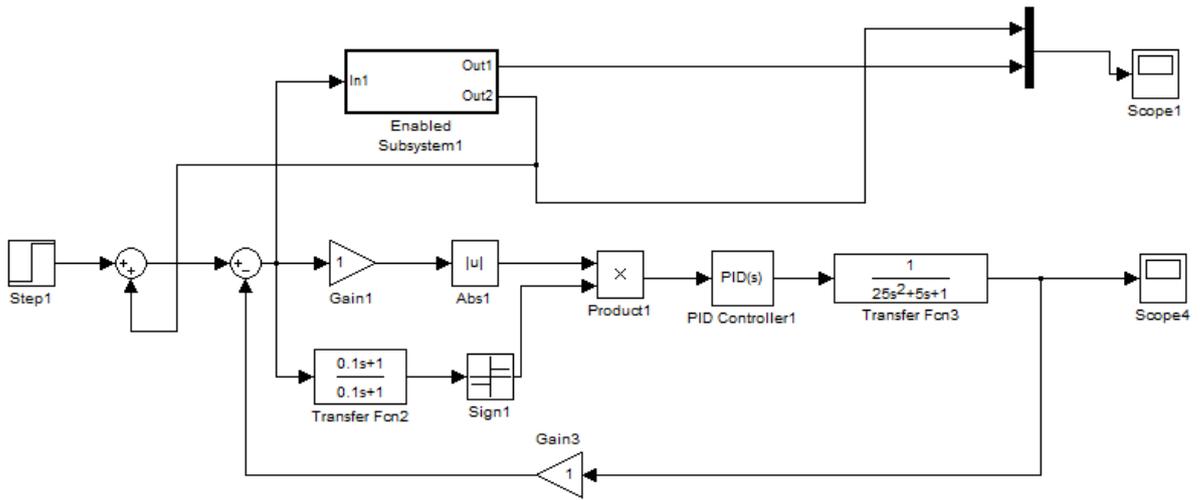


Рисунок 4.6 – Модель для составления функции принадлежности

В качестве примера рассмотрим случай, когда постоянная времени объекта T_2 изменилась с одной секунды до одиннадцати. Корректирующее устройство настроено таким образом, что не оказывает влияние на систему. Строя функцию изменения интегрального квадратичного критерия при подаче в систему единичного ступенчатого воздействия, находим значение критерия в тот момент, когда график приходит к установившемуся значению, т.е. в тот момент, когда динамическая ошибка системы становится равной нулю. Таким образом, значение критерия равно $I = 0,57$. Переходный процесс САУ на единичное задающее воздействие по каналу задания представлен на рисунке 4.7.

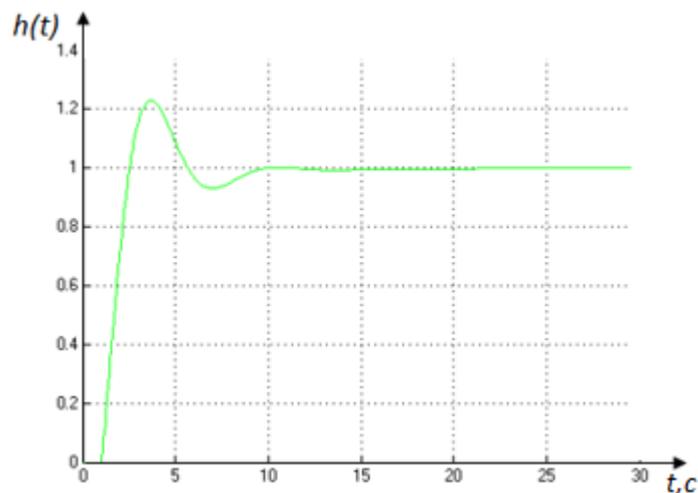


Рисунок 4.7 – Отклик САУ на единичное ступенчатое воздействие по каналу задания

Из рисунка 4.7 видно, что система не удовлетворяет заданным показателям качества, так как перерегулирование больше 20%. Поэтому

требуется настройка корректирующего устройства. При параметре $T=1\text{с}$ корректирующего устройства добиваемся улучшения качества САУ. В системе отсутствует перерегулирование и время регулирования равно 5 секундам (рисунок 4.8).

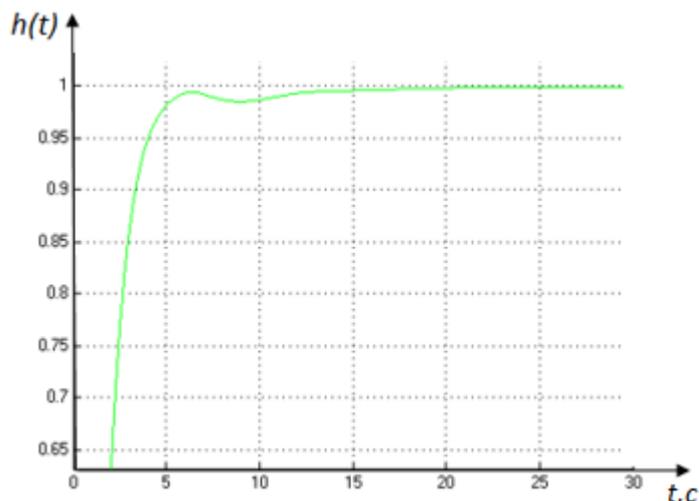


Рисунок 4.8 – Отклик САУ на единичное ступенчатое воздействие по каналу задания с подстроенным корректирующим устройством

Таким образом, при постоянной времени объекта $T_2=11\text{с}$ получаем значение переменной $I=0,57$, которая будет использоваться при формировании функций принадлежности входных переменных I . А значении постоянной времени КУ $T=1\text{ с}$ для формирования функций принадлежности выходной переменной T . Прделав аналогичные действия для всего интервала изменений постоянной времени T_2 объекта управления, находим все значения T КУ и значения интегрального квадратичного критерия I для формирования функций принадлежности входной и выходной лингвистических переменных (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Данные для формирования функций принадлежности

T_2 ОУ(сек.)	2	5	8	11	14	17	20
I	0,17	0,29	0,42	0,57	0,72	0,89	1,08
$T_{ку}$ (сек.)	0,2	0,5	0,8	1	1,2	1.4	1.6

Специальный пакет расширения Fuzzy Logic Toolbox среды MatLab (Simulink) предназначен для того, чтобы реализовывать процесс нечеткого моделирования. Пакет Fuzzy Logic Toolbox (пакет нечеткой логики) – это совокупность прикладных программ, которые относятся к теории размытых или нечетких множеств и позволяют конструировать нечеткие экспертные или управляющие системы. К основным возможностям пакета можно отнести построение адаптивных нечетких систем; построение систем нечеткого вывода (экспертных систем, регуляторов); интерактивное динамическое моделирование в MatLab Simulink.

Графический пользовательский интерфейс системы нечеткого вывода состоит из редактора системы нечеткого вывода Fuzzy Inference System Editor (FIS Editor или FIS-редактор), редактора функций принадлежности (The Membership Function Editor), редактора правил (The Rule Editor), подсистем для просмотра правил и схем нечетких выводов (The Rule Viewer), просмотрщика поверхностей (The Surface Viewer).

С помощью fuzzy-библиотеки MatLab (Simulink) дает возможность формировать различные функции принадлежности. Самые простые в реализации – это `trimf` – треугольная и `trapezmf` – трапецеидальная, а также более сложная функция `gaussmf` – функция принадлежности в форме кривой Гаусса [16].

Используемые в данной работе функции принадлежности входной переменной и выходной переменной, составленные по таблице 4.4, представлены на рисунках 4.9 и 4.10 соответственно.

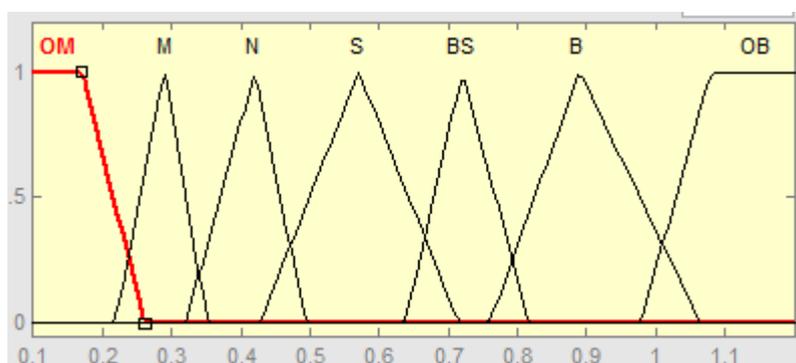


Рисунок 4.9 - Функции принадлежности входной переменной I

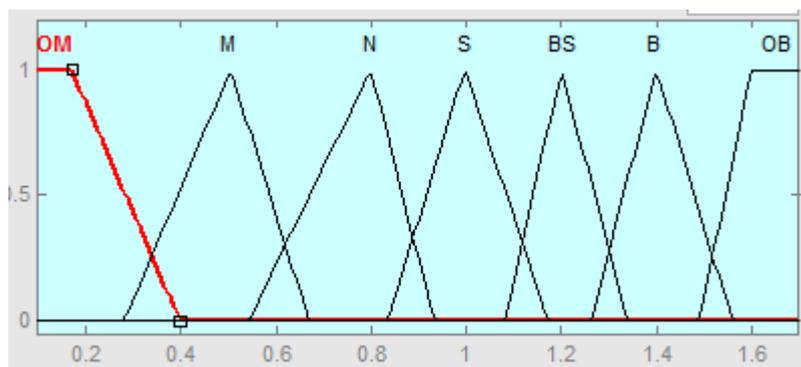


Рисунок 4.10 - Функции принадлежности выходной переменной T

Подстройка корректирующего устройств осуществляется по следующей базе правил:

Правило 1: Если «I» - «очень малое», тогда «T» - «очень малое».

Правило 2: Если «I» - «малое», тогда «T» - «малое».

Правило 3: Если «I» - «небольшое», тогда «T» - «небольшое».

Правило 4: Если «I» - «среднее», тогда «T» - «среднее».

Правило 5: Если «I» - «больше среднего», тогда «T» - «больше среднего».

Правило 6: Если «I» - «большое», тогда «T» - «большое».

Правило 7: Если «I» - «очень большое», тогда «T» - «очень большое».

На рисунке 4.11 показана модель САУ с объектом второго порядка с нечетким псевдолинейным корректирующим устройством с фазовым опережением.

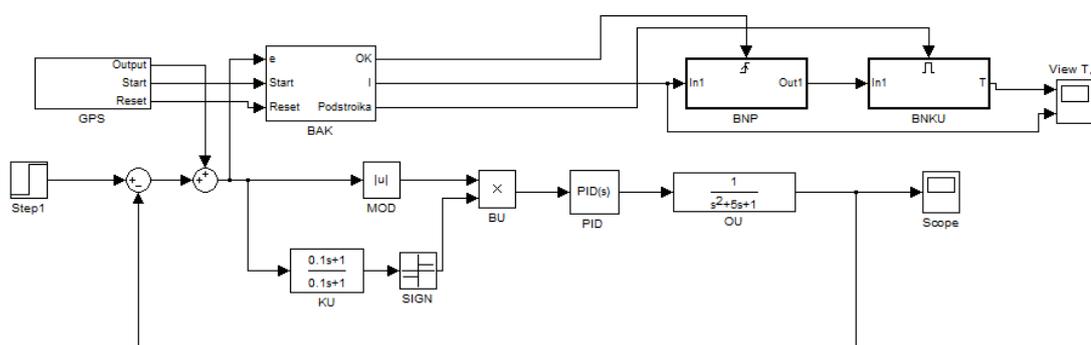


Рисунок 4.11 – модель САУ с объектом второго порядка с нечетким псевдолинейным корректирующим устройством

В блоке БНП на основе процедуры фаззификации определяется значение функций принадлежности лингвистической переменной интегрального квадратичного критерия «I».

На основе базы правил определяется выходная лингвистическая переменная «Г», которая будет использоваться в дальнейшем на основе процедуры логического вывода и дефазификации чтобы подстроить корректирующее устройство.

Алгоритм вывода в блоке БНП является алгоритм «Mamdani». В этом алгоритме значение выходной переменной определяется методом центра массы фигуры.

На рисунке 4.12 приведена иллюстрация процесса подстройки САУ с объектом второго порядка. Начальные параметры объекта управления приняты равными $T_2=1с$; $T_1=5с$; $K=1$. Параметры КУ, с которыми САУ запускается в работу приняты равными $T=0,1с$, $T_1=0,1с$.

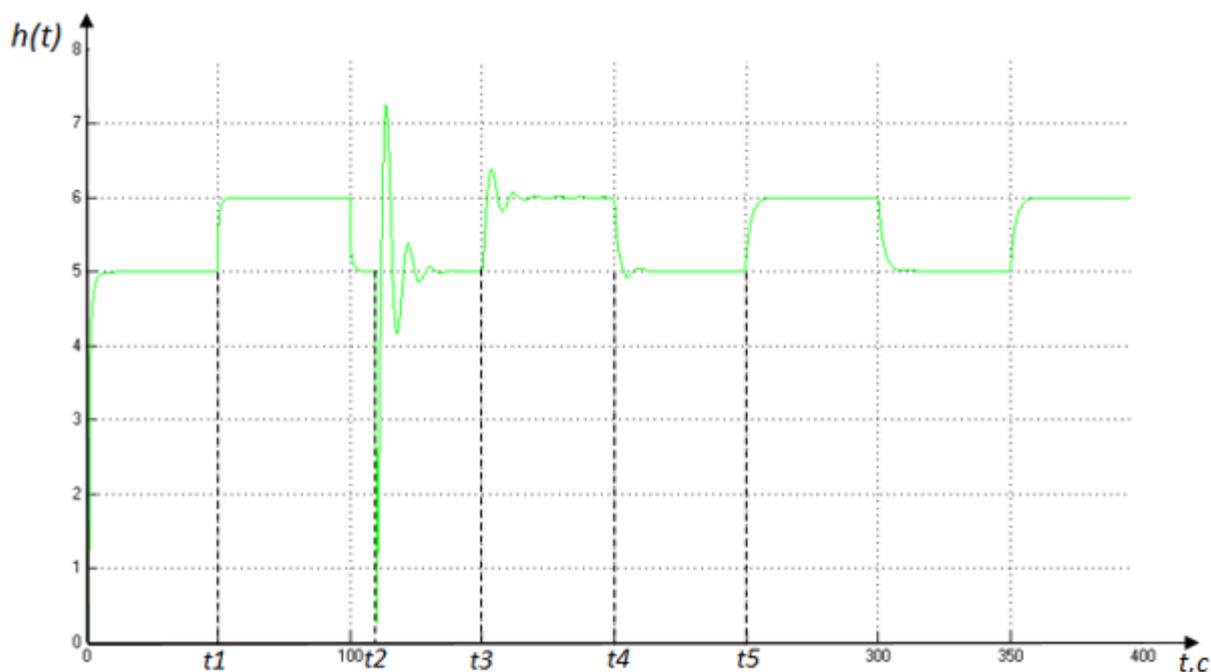


Рисунок 4.12 – Процесс подстройки САУ нечетким корректирующим устройством

Первоначальные настройки регулятора справляются с задачей управления и переходный процесс САУ является аperiodическим с малым временем регулирования. В момент времени t_2 в САУ меняется значение постоянной времени T_2 объекта управления с $T_2=1с$ до $T_2=18с$. При этом процесс стал колебательным с большим перерегулированием (около 30%) и длительным временем регулирования. В момент времени t_3 ГПС посылает в систему импульс, и далее, происходит подсчет текущей оценки интегрального

квадратичного критерия, которая подается в БНП. После определения значения постоянной времени T корректирующего устройства, в момент времени t_4 , значение постоянной времени поступает в КУ и запоминается в нем. В момент времени t_5 при поступлении в САУ импульса задающего воздействия видно, что после подстройки КУ качество системы управления существенно улучшилось: колебательность исчезла и переходный процесс вновь стал апериодическим, время регулирования также существенно уменьшилось.

Рассмотренная система управления с нечетким корректирующим устройством способна улучшать качество процесса регулирования при изменении параметра T_2 и постоянном параметре T_1 ОУ. Но параметры реального объекта управления могут меняться в различных вариациях. Например, в объекте меняется параметр T_1 при неизменном T_2 , или они изменяются одновременно. В этих случаях требуется составление новых функций принадлежности для интегрального квадратичного критерия и постоянной времени корректирующего устройства, а также новой базы правил. Этапы их составления аналогичны тем, которые были описаны выше.

Реализация нечетких корректирующих устройств с амплитудным подавлением и фазовым опережением принципиально не отличаются, поэтому в работе был рассмотрен вопрос реализации нечеткого корректирующего устройства с фазовым опережением.

Основываясь на построенных функциях принадлежности и базы правил данного устройства, реализуем нечеткое корректирующее устройство с фазовым опережением на промышленном микроконтроллере КРОСС-500.

4.4 Рекомендация по использованию нечетких корректирующих устройств.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие заключения.

Подстройка САУ с нечетким корректирующим устройством осуществляется весьма быстро. При этом не требуется постоянная идентификация объекта управления в процессе работы системы.

Периоды появления и паузы пробных импульсов, поступающих в систему, следует выбирать таким образом, чтобы переходные процессы по пробному сигналу и по каналу задания успевали закончиться. При поступлении пробного импульса происходит изменение интегрального квадратичного критерия. Съем величины критерия необходимо производить в тот момент, когда функция интегрального квадратичного критерия перестает изменяться. Это означает, что ошибка стала равной нулю и переходный процесс по пробному сигналу закончился.

Величина постоянной времени корректирующего устройства, которая формируется на выходе блока нечетких преобразований существенно влияет на качество регулирования. В свою очередь данная величина зависит от того, каким образом построены функции принадлежности входных и выходных переменных. В этой связи можно утверждать, что качество системы можно повысить, увеличивая число термов функций принадлежности. Но при этом также усложняется программная реализация.

Недостатком использованной в данной работе интегральной квадратичной оценки является то, что различные по характеру переходные процессы могут иметь одну и ту же величину оценки. В этой связи для большей достоверности оценки качества САУ необходимо использовать дополнительные лингвистические переменные в блоке фаззификации. В качестве таких переменных могут выступать величина перерегулирования, декремент затухания и т.д. При этом усложняется база нечетких правил, как следствие и программная реализация.

Наиболее эффективно рассмотренный выше способ подстройки корректирующего устройства может быть применен для систем управления, не допускающих длительную подстройку корректирующего устройства, а также в системах, эксплуатация которых не допускает перерегулирования.

5 Программная реализация регулятора в среде ISAGRAF для промышленного контроллера КРОСС-500

5.1 Программный пакет Isagraf

В ISaGRAF заложена методология структурного программирования, которая дает возможность пользователю описать автоматизируемый процесс в наиболее легкой и понятной форме. Интерфейс пользователя системы ISaGRAF соответствует международному стандарту GUI (Graphical User Interface), включающему многооконный режим работы, работу с мышью и т.п. Если попытаться сгруппировать основные возможности описываемой интегрированной системы, то их можно представить в следующем виде:

1. Поддержка всех пяти стандартных языков программирования PLC (в соответствии со стандартом IEC 1131-3):
 - язык последовательных функциональных схем (Sequential Function Charts), описывающий логику программы на уровне чередующихся процедурных шагов и транзакций (условных переходов);
 - язык функциональных блоковых диаграмм (Function Block Diagrams), позволяющий пользователю построить комплексную процедуру, состоящую из различных функциональных библиотечных блоков;
 - язык релейных диаграмм, или релейной логики (Ladder Diagrams), используемый для описания логических выражений различного уровня сложности;
 - язык структурированного текста (Structured Text), относящийся к классу языков высокого уровня и по мнемонике похожий на Pascal;
 - язык инструкций (Instruction List), относящийся к классу языков низкого уровня и позволяющий создавать эффективные, оптимизированные процедуры.

К пяти стандартным языкам ISaGRAF добавляет еще один графический язык потоковых диаграмм (Flow Chart), описывающий логику программы в виде блок-схемы.

Если пользователю недостаточно вышеперечисленных языков, то ISaGRAF для этих целей поддерживает интерфейс к функциям, написанным на языке «ANSI C», но в этом случае требуется компилятор для соответствующей платформы.

ISaGRAF позволяет широко смешивать программы и процедуры, написанные на разных языках, а также вставлять кодовые последовательности из одного языка в коды, написанные на другом языке.

2. Также ISaGRAF обладает следующими достоинствами:

- наличие мощного отладчика, позволяющего во время работы прикладной задачи просматривать состояние программного кода, переменных, программ и многое другое;
- поддержка основных функций протокола MODBUS (RTU, SLAVE);
- наличие дополнительных интерактивных редакторов для описания переменных, определений и конфигураций ввода/вывода;
- встроенные средства контроля над внесением изменений в программный код ISaGRAF-приложения и печати отчетов по разработанному проекту с большой степенью детализации, включая печать таблиц перекрестных ссылок для программ и отдельных переменных;
- открытость системы для доступа извне к внутренним структурам данных прикладной ISaGRAF-задачи, возможностью разработки драйверов на модули ввода/вывода самим пользователем и портации ISaGRAF-ядра под любую аппаратно-программную платформу (зависит от заказанной версии системы);
- полное документирование системы разработки и языков программирования (в том числе и на русском языке).[23]

Система ISaGRAF состоит из двух частей: система разработки ISaGRAF Workbench и система исполнения ISaGRAF Target (Рисунок 5.1). Система разработки представляет собой набор Windows-приложений, интегрированных в единую инструментальную среду.

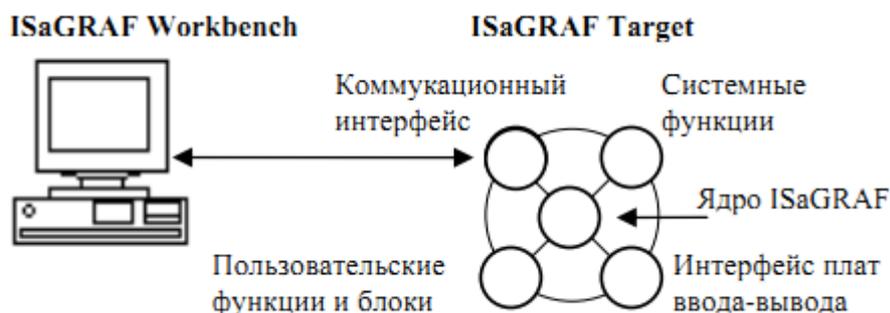


Рисунок 5.1. – Система ISaGRAF

Основу системы исполнения составляет набор программных модулей (для каждой целевой системы свой), которые выполняют самостоятельные задачи под управлением так называемого ядра системы ISaGRAF (Рисунок 5.1).

Ядро ISaGRAF реализует поддержку стандартных языков программирования, выполняя программы на этих языках в режиме интерпретации, типового набора функций и функциональных блоков и драйверов ввода/вывода. Задача связи обеспечивает поддержку процедуры загрузки пользовательского ISaGRAF-приложения со стороны программируемого контроллера, а также доступ к рабочим переменным этого приложения со стороны отладчика системы разработки ISaGRAF. Взаимодействие систем разработки и исполнения осуществляется по протоколу MODBUS, что дает возможность доступа к данным контроллера не только отладчику ISaGRAF, но и любой системе визуализации и управления данными (SCADA). Драйверы устройств сопряжения с объектом организуют прозрачный доступ к аппаратуре ввода/вывода. Функции пользователя реализуют процедуры и алгоритмы функций, не представленные в стандартном варианте поставки системы ISaGRAF. Системные функции предназначены для описания специфики конкретной операционной системы, реализованной на данном типе контроллеров [21].

Каждая задача, решаемая с помощью системы ISaGRAF, должна быть оформлена в виде отдельного проекта. Проект ISaGRAF разделен на несколько программных модулей, называемых программами. Программы в проекте выполняются последовательно друг за другом в соответствии с принципом цикличности и могут быть разделены на пять секций:

1. BEGIN;
2. SEQUENTIAL;
3. END;
4. секция функций;
5. секция функциональных блоков.

Каждая секция имеет свои особенности исполнения программ, расположенных в ней. Кроме того, каждая секция накладывает ограничения на использование языков программирования, поддерживаемых средой ISaGRAF. Так, секции BEGIN и END позволяют использовать в своих программах все языки, кроме FC и SFC. Два указанных языка (и только они) могут быть использованы только в секции SEQUENTIAL. Секции функций и функциональных блоков предназначены для создания функций и функциональных блоков, используемых только внутри данного проекта (в отличие от библиотечных функций и функциональных блоков, которые могут использоваться в любом проекте).

Основным принципом выполнения задач в среде ISaGRAF является принцип синхронизации (цикличности). Он заключается в том, что прикладная задача ISaGRAF работает в синхронном режиме по временным циклам, длительность которых определяется разработчиком. Минимальная продолжительность циклов исполнения прикладной задачи определяется характеристиками аппаратно-программной платформы (ISaGRAF Target), на которой происходит исполнение задачи.

Принцип цикличности выполнения прикладной задачи работает следующим образом: в начале заданного временного цикла выполняются все программы секции BEGIN, в конце цикла – все программы секции END, а в

середине цикла выделяется время для выполнения очередных шагов программ секции SEQUENTIAL. Поэтому секции BEGIN и END называются циклическими, а SEQUENTIAL – последовательной.

Указанная циклическая схема работы задачи позволяет системе:

- гарантировать, что входные переменные сохранят свои значения в течение цикла, и все программы будут работать с одними и теми же значениями указанных переменных;
- гарантировать, что устройства вывода обновляются один раз в течение программного цикла;
- правильно работать с одними и теми же глобальными переменными.

5.2 Программа для системы автоматического регулирования с нечетким регулятором

Для реализации нечеткого регулятора на промышленном контроллере КРОСС-500 в системе ISaGRAF используем языки функциональных блоков FBD и структурированного текста ST.

Для имитации сигнала ошибки используется аналогово-вычислительный комплекс АВК-6, аналоговый сигнал из которого подается на аналоговый вход контроллера.

В разрабатываемую программу ошибка введена с помощью блока craio, который находится в библиотеке пакета ISaGRAF и предназначен для ввода/вывода аналоговых сигналов с модуля УСО КРОСС. На рисунке 5.2 показано, каким образом реализуется подсчет величины интегрального квадратичного критерия.

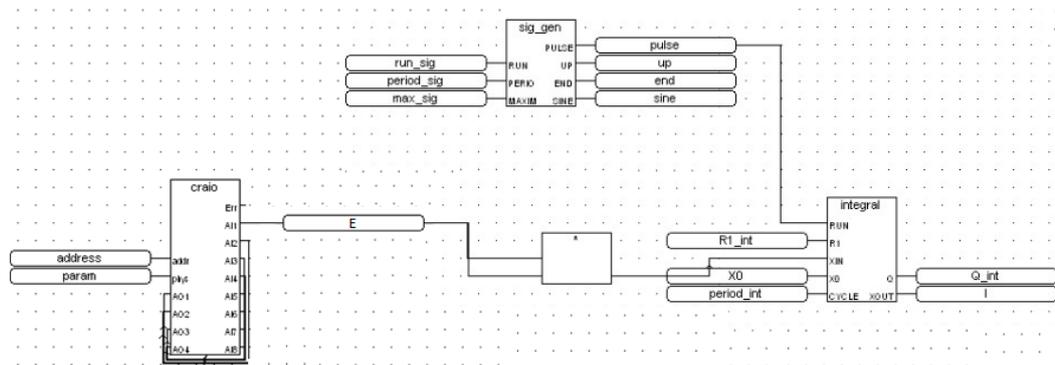


Рисунок 5.2 – Подсчет интегрального квадратичного критерия на языке FBD

Интегрирование начинается тогда, когда на вход RUN поступает единичный импульс с блока sig_gen. Заканчивается интегрирования после снятия импульса. На выходе блока получаем значение интегральной ошибки, посчитанное за период импульса (переменная I).

Библиотеки пакета ISaGRAF не содержат блоков нечеткой логики, поэтому создания аппарата нечеткой логики используем блоки кусочно-линейной функции kus (Рисунок 5.3). Для построения каждого терм-множества функций принадлежности входной лингвистической переменной (рисунок 4.9) в блоке kus задаем координаты. Для треугольной функции принадлежности задаем координаты вершины треугольника и координаты углов его основания; для трапецеидальной функции принадлежности соответственно координаты вершин и основания трапеции.

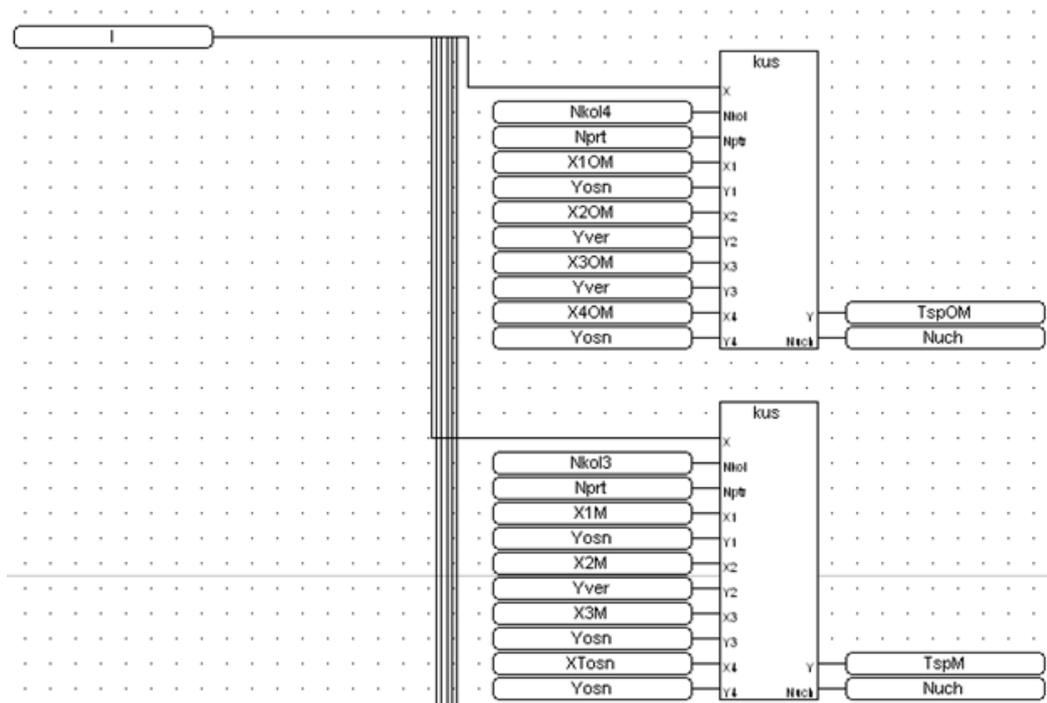


Рисунок 5.3 – Пример формирования терм-множеств для лингвистических переменных «ОМ» и «М» на блоках kus

Входная лингвистическая переменная одновременно поступает на все блоки фаззификации. На выходе каждого блока определяется степень истинности рассматриваемой лингвистической переменной каждому терму в диапазоне [0, 1].

База правил, описанная ранее при построении модели в среде Matlab, имеет вид:

Если «I» - «очень малое», тогда «T» - «очень малое»;

.....

Если «I» - «очень большое», тогда «T» - «очень большое».

В соответствии с приведенной базой правил, выходы из блоков фаззификации, реализующие терм-множества входных функций принадлежности поступают на блоки дефаззификации, реализующие терм-множества выходных функций принадлежности.

Так как процедура дефаззификации предполагает определения четкого значения параметра T на основе степени истинности каждого терма входных функций принадлежности, то задание координат в блоке kus, которое мы использовали ранее невозможно. Для того, чтобы реализовать выходные функции принадлежности, нужно поменять оси X и Y и перевернуть функцию принадлежности, поделив ее пополам (Рисунок 5.4).

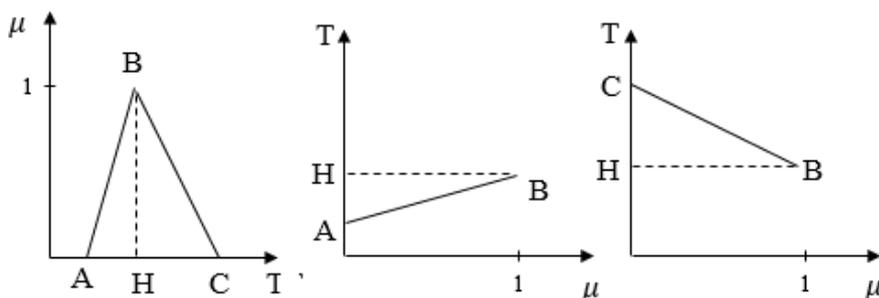


Рисунок 5.4 – Трансформация функции принадлежности выходной переменной

Данная трансформация позволит задавать координаты для блоков kus так, чтобы на вход подавалось значение степени истинности каждого терма, а на выходе получалась четкая переменная.

Программный код, написанный на языке ST, создан для того, чтобы при значении степени истинности терма, равной нулю выходное значение значения T из блоков дефаззификации также равнялось нулю (Приложение Б).

После дефаззификации из всех четких значений T выбирается наибольшее (Рисунок 5.5). Таким образом реализуется метод правого модального значения.

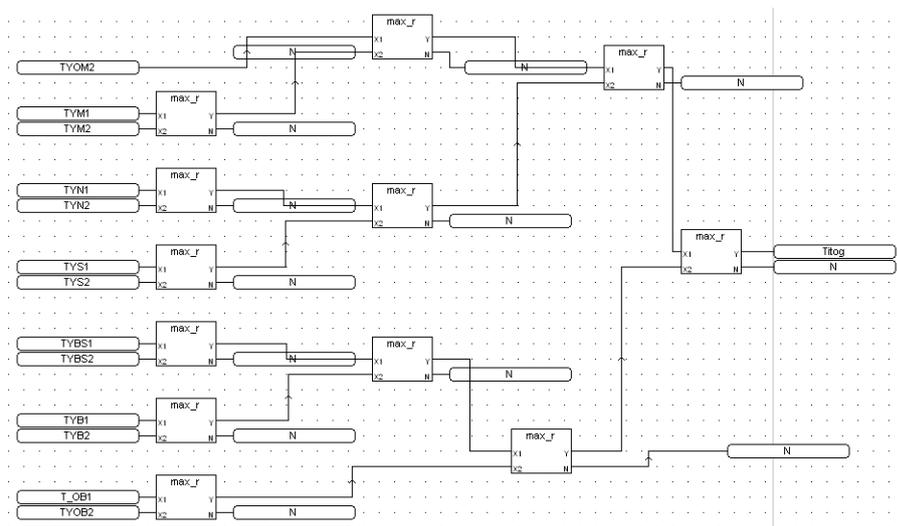


Рисунок 5.5 – Определение постоянной времени T корректирующего устройства

Это максимальное значение постоянной времени T будет новым параметром корректирующего устройства. Результаты запуска программы представлены в приложении А.

6 Социальная ответственность

Целью выпускной квалификационной работы является разработка, исследование и программная реализация на контроллере «КРОСС-500» нечеткого псевдолинейного корректирующего устройства.

Разработка, исследование и реализация корректирующего устройства выполняются с использованием персонального компьютера и промышленного микроконтроллера «КРОСС-500», в замкнутом помещении в условиях искусственного освещения.

6.1 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 могут привести к его заболеванию и снижению работоспособности.

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

Таблица 6.1. Опасные и вредные факторы при разработке нечеткого регулятора

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы (по ГОСТ 12.0.003-74)		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа за персональным компьютером	1. Повышенный уровень шума; 2. Несоответствующий микроклимат рабочего помещения; 3. Повышенный уровень электромагнитных излучений; 4. Недостаточная освещенность рабочего помещения;	1. Электрический ток	1. СанПиН 2.2.4-548-96 [29] 2. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [34]; 3. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03 [35].

Далее более подробно рассмотрим данные опасные и вредные факторы.

6.1.1 Отклонение параметров микроклимата

Требования к параметрам микроклимата определяются согласно СанПиН 2.2.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

Эти нормы устанавливаются в зависимости от времени года, характера трудового процесса и характера производственного помещения (значительные или незначительные тепловыделения). Допустимые параметры микроклимата, приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2. Микроклимат производственных помещений

Период года	Температура воздуха, °С	Скорость движения воздуха, м/с	Относительная влажность воздуха, %
Холодный	22-24	до 0,1	40-60
Теплый	23-25	0,1-0,2	40-60

В рабочем помещении поддержание параметров микроклимата должно обеспечиваться отоплением и кондиционированием, температура воздуха в помещении соответствует норме. В таких условиях человек способен полноценно работать, отдыхать и проводить свободное время.

6.1.2 Недостаточность освещения

Согласно СП 52.13330.2011 «Естественное и искусственное освещение» и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий»:

- Минимальное естественное освещение должно быть $E_n = 1,2$ К.Е.О.
- Минимальная освещенность при работе ПЭВМ составляет $E_t = 300$ лк.
- Освещенность рабочего стола должна быть не менее 300 лк, что может достигаться установкой местного освещения.
- Местное освещение не должно создавать бликов на экране. Следует ограничивать отраженную блескость на рабочих поверхностях (экран, стол, клавиатура) за счет правильного выбора и

расположения светильников, яркость бликов на экране не должна превышать 40 кд/м².

- Светильники местного освещения должны иметь не просвечивающий отражатель.

6.1.3 Повышенный уровень шума

Одним из важнейших параметров, наносящим большой ущерб для здоровья и резко снижающим производительность труда, является шум. Шум – это беспорядочные звуковые колебания разной физической природы, характеризующиеся случайным изменением амплитуды, частоты и др.

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

Шум, возникающий при работе оборудования и превышающий нормативные значения, негативно воздействует на центральную и вегетативную нервную систему человека, органы слуха. Ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок в работе.

На рабочем месте шум создается следующими источниками: охлаждающей системой ПЭВМ и печатающим механизмом принтера.

В таблице 6.3 указаны предельные уровни звука в зависимости от категории тяжести и напряженности труда, являющиеся безопасными в отношении сохранения здоровья и работоспособности.

Таблица 6.3 – Предельные уровни звука, дБ, на рабочих местах

Вид трудовой деятельности, рабочее место	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентного звука (в дБА)
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Проектирование и программирование	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Уровень шума на рабочем месте не должен превышать 50дБА. Для снижения уровня шума стены и потолок помещений, где установлены ПЭВМ, могут быть облицованы звукопоглощающими материалами.

6.1.4 Повышенные уровни электромагнитного поля

ПК при работе излучают электромагнитные радиочастоты, значит, работники подвержены воздействию электромагнитных полей.

Силовые линии электромагнитных полей не ограничиваются экраном монитора, а охватывают всё пространство вокруг, значит, персонал целесообразно размещать вдоль стен, так чтобы панель монитора была обращена к стене.

Предельно допустимые значения излучений от ЭВМ в соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4. Параметры неионизирующих электромагнитных излучений

Наименование параметров	Допустимое значение
<p>Напряжённость электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ВДТ по электрической составляющей должна быть не более:</p> <p>в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;</p> <p>в диапазоне частот 2 – 400 кГц.</p>	<p>25 В/м</p> <p>2,5 В/м</p>
<p>Плотность магнитного потока должна быть не более:</p> <p>в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц;</p> <p>в диапазоне частот 2 – 400 кГц.</p>	<p>250 нТл</p> <p>25 нТл</p>
<p>Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать:</p>	<p>500 В</p>

Возможные способы защиты от ЭМП:

Увеличение расстояния от источника: для избегания последствий экран видеомонитора должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя;

Для снижения воздействия электромагнитного излучения следует применять мониторы с пониженным уровнем излучения, придерживаться регламентированного режима труда и отдыха, а также проводить регулярную гигиеническую уборку помещения.

6.1.5 Электрический ток

Электрические установки представляют для человека большую потенциальную опасность, которая усугубляется тем, что органы чувств человека не могут на расстоянии обнаружить наличие электрического напряжения на оборудовании.

В зависимости от условий в помещении опасность поражения человека электрическим током увеличивается или уменьшается. Не следует работать с компьютером и контроллером «КРОСС-500» в условиях повышенной влажности (относительная влажность воздуха длительно превышает 75%), высокой температуры (более 35°C), наличии токопроводящей пыли, токопроводящих полов и возможности одновременного соприкосновения к имеющим соединение с землёй металлическим элементам и металлическим корпусом электрооборудования.

В помещении используются приборы, потребляющие напряжение 220В переменного тока с частотой 50Гц. Разработка связана с использованием следующих электроприборов: компьютером (дисплей, системный блок, манипулятор «мышь» и клавиатура), контроллером «КРОСС-500» и принтером. В данном случае обязательны следующие меры предосторожности: перед началом работы нужно убедиться, что выключатели и розетка закреплены и не имеют оголённых токоведущих частей;

- при обнаружении неисправности оборудования и приборов, необходимо не делая никаких самостоятельных исправлений сообщить ответственному за оборудование;
- запрещается загромождать рабочее место лишними предметами.

- при возникновении несчастного случая следует немедленно освободить пострадавшего от действия электрического тока и, вызвав врача, оказать ему необходимую помощь.

6.2 Экологическая безопасность

Работа с ПК не влечет за собой негативных воздействий на окружающую среду, поэтому создание санитарно-защитной зоны и принятие мер по защите атмосферы, гидросферы, литосферы не являются необходимыми.

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 полигонах.

6.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Для предупреждения возникновения пожара необходимо соблюдать следующие правила пожарной безопасности:

- применение при строительстве и отделке зданий негорючих или трудно сгораемых материалов.
- эксплуатационные мероприятия, рассматривающие эксплуатацию имеющегося оборудования;

- технические и конструктивные, связанные с правильным размещением и монтажом электрооборудования и отопительных приборов.

Причинами возникновения пожара могут быть:

- неисправности электропроводки, розеток и выключателей которые могут привести к короткому замыканию или пробое изоляции;
- использование поврежденных (неисправных) электроприборов;
- использование в помещении электронагревательных приборов с открытыми нагревательными элементами;
- возникновение пожара вследствие попадания молнии в здание;
- возгорание здания вследствие внешних воздействий;
- неаккуратное обращение с огнем и несоблюдение мер пожарной безопасности.

В лаборатории причинами возникновения пожара 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.

В случае возникновения пожара необходимо отключить электропитание, вызвать по телефону пожарную команду, эвакуировать людей из помещения согласно плану эвакуации и приступить к ликвидации пожара огнетушителями.

6.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочее место должно отвечать требованиям техники безопасности.

Рабочее место - это часть пространства, в котором инженер осуществляет трудовую деятельность, и проводит большую часть рабочего времени. Рабочее место, хорошо приспособленное к трудовой деятельности работника, правильно и целесообразно организованное, в отношении пространства, формы, размера обеспечивает ему 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.

По условиям работы рабочее место относится к индивидуальному рабочему месту для работы сидя. Рабочее место должно занимать площадь не менее 6 м, высота помещения должна быть не менее 4 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека.

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)°.

При разработке корректирующего устройства никаких специальных требований трудового законодательства не предусмотрено.

В организации должна быть сформирована комиссия по чрезвычайным ситуациям (КЧС). В ряде случаев при отсутствии КЧС предусмотрено возложение координирующих функций на руководителя организации.

Основными задачами объектовой КЧС являются:

- руководство разработкой и осуществлением мероприятий по предупреждению ЧС, повышению надежности работы объекта, обеспечению устойчивости его функционирования при возникновении ЧС;
- организация работ по созданию на потенциально опасном объекте локальной системы оповещения, поддержание ее в постоянной готовности;
- обеспечение готовности органов управления, сил и средств к действиям при чрезвычайных ситуациях, руководство их ликвидацией и эвакуацией персонала объекта;

- руководство созданием и использованием резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций;
- организация подготовки руководящего состава.

7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

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.

7.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо оптимально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

На данном этапе составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям, продолжительность выполнения этих работ и сведем их в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этапы работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка задания	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%

Продолжение таблицы 7.1

Создание программного обеспечения для контроллера КРОСС-500	И	И – 100%
Проведение испытаний и их результаты, доработка программного обеспечения	НР, И	НР – 20% И – 100%
Обоснование безопасности и экономичности производства	И	И – 100%
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	И – 100%
Оформление графического материала	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 100% И – 100%

7.1.1 Продолжительность этапов работ

Расчет продолжительности этапов работ осуществляется двумя методами:

- технико-экономическим;
- опытно-статистическим.

В данном случае используется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;
- экспертный.

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

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{min} + 2 \cdot t_{max}}{5}, \quad (7.1)$$

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

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

Для выполнения перечисленных в таблице 7.1 работ требуются специалисты:

- инженер;
- научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести в календарные дни. Расчет продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях ведется по формуле:

$$T_{РД} = \frac{t_{ож}}{K_{ВН}} \cdot K_{Д}, \quad (7.2)$$

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

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

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

Расчет продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{КД} = T_{РД} \cdot T_{К}, \quad (7.3)$$

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:

$$T_{К} = \frac{T_{КАЛ}}{T_{КАЛ} - T_{ВД} - T_{ПД}}, \quad (7.4)$$

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

$T_{ВД}$ – выходные дни ($T_{ВД} = 52$);

$T_{ПД}$ – праздничные дни ($T_{ПД} = 10$).

$$T_{К} = \frac{365}{365 - 52 - 10} = 1,205.$$

В таблице 7.2 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 7.2 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					T _{РД}		T _{КД}	
		<i>t_{min}</i>	<i>t_{max}</i>	<i>t_{ож}</i>	НР	И	НР	И
Постановка задачи	НР	1	2	1,4	1,68	-	2,02	-
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	4	6	4,8	2,88	5,76	3,47	6,93
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,4	1,68	1,68	2,02	2,02
Изучение литературных источников	И	7	10	8,2	-	9,84	-	11,85
Разработка САР с нечетким регулятором	И	10	14	11,6	-	13,92	-	16,76
Создание программного обеспечения для контроллера КРОСС-500	И	14	20	16,4	-	19,68	-	23,69
Проведение испытаний, доработка программного обеспечения	НР, И	5	7	5,8	1,39	6,96	1,67	8,39
Обоснование безопасности и экономичности производства	И	3	5	3,8	-	4,56	-	5,49
Оформление расчетно-пояснительной записки	И	3	5	3,8	-	4,56	-	5,49
Оформление графического материала	И	3	5	3,8	-	4,56	-	5,49
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,4	1,68	1,68	2,02	2,02
Итого:				62,4	9,31	73,2	11,2	88,13

7.1.2 Расчет накопления готовности работ

Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов выполнена работа на каждом этапе. Данная величина вычисляется по формуле:

$$СГ_i = \frac{ТР_i^H}{ТР_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i ТР_k}{ТР_{общ.}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m ТР_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m ТР_{km}}, \quad (7.5)$$

где ТР_{общ.} – общая трудоемкость проекта;

ТР_i (ТР_k) – трудоемкость i-го (k-го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$;

ТР_{iH} – накопленная трудоемкость i-го этапа проекта по его завершении;

ТР_{ij} (ТР_{kj}) – трудоемкость работ, выполняемых j-м участником на i-м этапе, здесь $j = \overline{1, m}$ – индекс исполнителя, $m = 2$.

Результаты вычислений отражены в таблице 7.3.

Таблица 7.3 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	ТР _i , %	СГ _i , %
Постановка задачи	2,03	2,03
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	10,47	12,5
Разработка календарного плана	4,07	16,57
Изучение литературных источников, написание теоретической части работы и математических выкладок	11,93	28,5
Создание адаптивной САР с ПКУ	16,87	45,37
Создание программного обеспечения для контроллера КРОСС-500	23,87	69,21
Проведение испытаний и их результаты, доработка программного обеспечения	10,13	79,34
Обоснование безопасности и экономичности производства	5,53	84,87
Оформление расчетно-пояснительной записки	5,53	90,4
Оформление графического материала	5,53	95,93
Подведение итогов	4,07	100

7.2 Расчет сметы затрат на создание макета КУ

В состав затрат на создание 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;
- отчисления в социальные фонды;
- расходы на электроэнергию;
- амортизационные отчисления;
- работы, выполняемые сторонними организациями;
- прочие расходы.

7.2.1 Расчет затрат на материалы

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам и приведена в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Расходные материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Блокнот	40	1 шт.	40
Бумага для принтера формата А4	150	1 уп.	150
Ручка шариковая	10	2 шт.	20
Карандаш	10	1 шт.	10
Итого:			220

Пусть ТЗР составляет 5% от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны

$$C_{\text{mat}} = 220 \cdot 1,05 = 231 \text{ рубль.}$$

7.2.2 Расчет основной заработной платы

Данная статья расходов включает заработную плату научного руководителя и инженера, а также премии, входящие в фонд заработной платы.

Расчет основной заработной платы выполняется на основе трудоемкости выполнения каждого этапа и величины месячного оклада исполнителя.

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

$$ЗП_{дн-т} = MO/24,83. \quad (7.6)$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 6. При расчете учитывалось, что в году 298 рабочих дня и, следовательно, в месяце 24,83 рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 7.2. Также был принят во внимание коэффициент, учитывающий коэффициент дополнительной заработной платы $K_{ДЗП} = 1,1$; $K_{доп.ЗП} = 1,188$; $K_p = 1,3$. 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 $K_{и} = 1,1 * 1,188 * 1,3 = 1,699$.

Таблица 7.5 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23 264,86	936,97	9	1,699	14327,21
И	7 915	318,77	73	1,699	39536,09
Итого:					53863,3

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили

$$C_{осн} = 53863,3 \text{ руб.}$$

7.2.3 Расчет отчислений от заработной платы

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

Отчисления по заработной плате определяются по следующей формуле:

$$C_{соц} = K_{соц} \cdot C_{осн}, \quad (7.9)$$

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

- 1) отчисления в пенсионный фонд;
- 2) на социальное страхование;
- 3) на медицинское страхование.

Итак, отчисления из заработной платы составили:

$$C_{\text{соц}} = 0,3 * 53863,3 = 16158,99 \text{ руб.}$$

7.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

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:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot Ц_{\text{э}}, \quad (7.10)$$

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

$Ц_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час;

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

Для ТПУ $Ц_{\text{э}} = 5,257 \text{ руб./кВт·час}$ (с НДС).

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 7.2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} * K_{\text{т}}. \quad (7.11)$$

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном}} \cdot K_{\text{с}}, \quad (7.12)$$

где $P_{\text{ном}}$ – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_{\text{с}}$ – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников.

Для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{с}} = 1$.

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 7.6.

Таблица 7.6 – Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты Эоб, руб.
Персональный компьютер	102	0,3	160,86
Струйный принтер	1	0,1	0,53
Итого:			161,39

7.2.5 Расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования ЭВМ по формуле:

$$C_{AM} = \frac{N_A \cdot C_{ОБ}}{F_D} \cdot t_{рф} \cdot n, \quad (7.13)$$

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

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

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

$t_{рф}$ – фактическое время работы оборудования при создании программного продукта, $t_{рф} = 102$ часа;

n – число задействованных ПЭВМ, $n = 1$.

Итак, затраты на амортизационные отчисления составили:

$$C_{AM} = \frac{0,25 \cdot 45000 \cdot 1 \cdot 102}{2384} = 481,33 \text{ руб.}$$

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

$$C_{AM} = \frac{0,5 \cdot 12000 \cdot 1}{500} = 36 \text{ руб.}$$

Итого $C_{AM} = 481,33 \text{ руб} + 36 \text{ руб.} = 517,33 \text{ руб.}$

7.2.6 Расчет прочих расходов

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на разработку проекта, которые не учтены в предыдущих статьях. Их следует принять равными 10% от суммы всех предыдущих расходов

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}}) \cdot 0,1. \quad (7.14)$$

Подставим значения и вычислим:

$$C_{\text{проч.}} = (231 + 53863,3 + 16158,99 + 161,39 + 517,33) \cdot 0,1 = 7093,2 \text{ руб.}$$

7.2.7 Расчет общей себестоимости разработки

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

Таблица 7.7 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
1 Материалы и покупные изделия	$C_{\text{мат}}$	231
2 Основная заработная плата	$C_{\text{очн}}$	53863,3
3 Отчисления в социальные фонды	$C_{\text{соц}}$	16158,99
4 Расходы на электроэнергию	Э	161,39
5 Амортизационные отчисления	$C_{\text{ам}}$	517,33
6 Непосредственно учитываемые расходы	$C_{\text{нр}}$	–
7 Прочие расходы	$C_{\text{проч}}$	7093,2
Итого:		78025,21

Таким образом, расходы на разработку составили $C = 78025,21$ руб.

7.2.8 Прибыль

Примем прибыль в размере 5 - 20 % от полной себестоимости проекта. В нашем случае она составляет 15605,04 руб. (20 %) от расходов на разработку проекта.

7.2.9 НДС

НДС составляет 18% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$(78025,21 + 15605,04) \cdot 0,18 = 16853,45 \text{ руб.}$$

7.2.10 Цена разработки НИР

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

$$C_{\text{НИР(КР)}} = 78025,21 + 15605,04 + 16853,45 = 110483,7 \text{ руб.}$$

7.3 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. адаптивный принцип регулирования, реализованный в ПО, позволяет избежать пауз для перенастройки оборудования под изменившиеся параметры системы. Разрабатываемые метод и программное обеспечение могут быть реализованы в широком круге производств, и направлены на внедрение особенно в сфере непрерывных производств, таких как нефтепереработка, производство тепло- и электроэнергии.

7.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР

Научно-технический уровень характеризует, в какой мере выполнены работы и обеспечивается научно-технический прогресс в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод бальных оценок. Бальная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям или рассчитывают по формуле. На этой основе делается вывод о целесообразности НИР.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется коэффициент ее научно-технического уровня по формуле:

$$K_{НТУ} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i, \quad (7.15)$$

где $K_{НТУ}$ – коэффициент научно-технического уровня;

R_i – весовой коэффициент i -го признака научно-технического эффекта;

n_i – количественная оценка i -го признака научно-технического эффекта, в баллах.

Таблица 7.8 – Весовые коэффициенты признаков НТУ

Признак НТУ	Примерное значение весового коэф-та n_i
1 Уровень новизны	0,4
2 Теоретический уровень	0,1
3 Возможность реализации	0,5

Таблица 7.9 – Баллы для оценки уровня новизны

Уровень новизны	Характеристика уровня новизны	Баллы
Принципиально новая	Новое направление в науке и технике, новые факты и закономерности, новая теория, вещество, способ	8-10
Новая	По-новому объясняются те же факты, закономерности, новые понятия дополняют ранее полученные результаты	5-7
Относительно новая	Систематизируются, обобщаются имеющиеся сведения, новые связи между известными факторами	2-4
Не обладает новизной	Результат, который ранее был известен	0

Таблица 7.10 – Баллы значимости теоретических уровней

Теоретический уровень полученных результатов	Баллы
1 Установка закона, разработка новой теории	10
2 Глубокая разработка проблемы, многоспектральный анализ, взаимодействия между факторами с наличием объяснений	8
3 Разработка способа (алгоритм, программа и т. д.)	6

Продолжение таблицы 7.10

4 Элементарный анализ связей между фактами (наличие гипотезы, объяснения версии, практических рекомендаций)	2
5 Описание отдельных элементарных факторов, изложение наблюдений, опыта, результатов измерений	0,5

Таблица 7.11 – Возможность реализации научных, теоретических результатов по времени и масштабам

Время реализации	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2

Результаты оценок признаков научно-технического уровня приведены в таблице 7.12.

Таблица 7.12 – Количественная оценка признаков НИОКР

Признак научно-технического эффекта НИР	Характеристика признака НИОКР	R_i
Уровень новизны	Систематизируются и обобщаются сведения, определяются пути дальнейших исследований	0,4
Теоретический уровень	Разработка способа (алгоритм, программа мероприятий, устройство, вещество и т.п.)	0,1
Возможность реализации	Время реализации в течение первых лет	0,5
Масштабы реализации	Отрасль	

Примечание: баллы по параметрам времени и масштабам реализации при расчете складываются.

Исходя из оценки признаков НИОКР, показатель научно-технического уровня для данного проекта составил:
 $K_{нт\ у} = 0,4*4 + 0,1*6 + 0,5*10 = 1,6 + 0,1 + 5 = 7,2$.

Таким образом, проект «Макет принципов КТ» имеет средний уровень научно-технического эффекта.

Таблица 7.13 – Оценка уровня научно-технического эффекта

Уровень НТЭ	Показатель НТЭ
Низкий	1-4
Средний	4-7
Высокий	8-10

Обоснование оценки признаков НИОКР приводится в таблице 7.14.

Таблица 7.14 – Сводная таблица оценки научно-технического уровня НИР

Фактор НТУ	Значимость	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
Уровень новизны	0,4	Относительно новая	4	Созданное КУ объединяет известные принципы для реализации на новом оборудовании
Теоретический уровень	0,1	Разработка способа	6	Написание программы ПКУ на микроконтроллере КРОСС-500
Возможность реализации	0,5	В течение первых лет	10	Возможна реализация в кратчайшие сроки

Заключение

В ходе выполнения работы были проанализированы основные виды корректирующих устройств. В качестве корректирующих устройств были выбраны псевдолинейные устройства с фазовым опережением и амплитудным подавлением, так как у них отсутствует жесткая связь между амплитудными и фазовыми характеристиками, а их эквивалентные амплитудно-фазовые характеристики не зависят от амплитуды входного сигнала и являются только функциями частоты.

Свойства выбранных КУ были проанализированы в системах автоматического управления с объектами второго порядка, параметры которых меняются во времени. Моделирование показало, что улучшение качества САУ зависит от параметров данных корректирующих устройств.

В работе рассмотрены основы теории нечеткой логики, а также принципы построения нечетких систем управления. На основе изученных материалов и проведенном анализе в пакете Matlab Simulink была создана модель псевдолинейного корректирующего устройства, подстройка которого осуществляется с использованием аппарата нечеткой логики. Проведено исследование свойств САУ с нечетким корректирующим устройством объектом управления второго порядка. Результаты исследования показали, что применение данного корректирующего устройства позволяет улучшить качество САУ при изменении параметров объекта управления.

Полученная модель нечеткого псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением была реализована на промышленном контроллере КРОСС-500.

Conclusion

In this work the main types of corrective devices analyzed. Pseudo-linear devices with phase outstrip and amplitude suppression were selected as corrective devices, because they don't have a strong connection between the amplitude and phase characteristics and their equivalent amplitude-phase characteristics are not dependent on the amplitude of the input signal and are only a function of frequency.

Properties of selected corrective devices were analyzed at the second order objects with parameters changed over the time. According the result of simulations, the ACS quality improvement depends on the parameters of correcting device.

The paper considers the basics of the fuzzy logic theory and principles of fuzzy control systems design concept. Based on the studied materials and conducted analysis in the Matlab Simulink package, a model of pseudo-linear corrective device was created, adjustment is carried out using fuzzy logic. Researching this model were conducted with the control object of the second order. The results of research showed that using this type of corrective devices allows improving the quality of ACS if parameters of the control object are changed.

The obtained model of fuzzy pseudo-linear corrective device with a phase outstrip was implemented on an industrial controller CROSS-500.

Список использованных источников

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования, издание третье, исправленное. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
2. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. М.: Энергия, 1969 – 375 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 396 с.
4. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.1. Линейные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 287 с.
5. Ким Д.П. Теория автоматического управления. Т.2. Многомерные нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 464 с.
6. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 421 с.
7. Ю.Ю. Громов, Н.А. Земской, А.В. Лагутин, О.Г. Иванова, В.М. Тютюнник. Системы автоматического управления с запаздыванием: учеб. Пособие. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 76 с.
8. Попов Е.П. Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1988. - 256 с.
9. Топчеев Ю.И. Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления – М.: Машиностроение, 1971. – 464с.
10. Хлыпало Е.И. Нелинейные системы автоматического регулирования (расчет и проектирование). - Л.: Энергия, 1967. – 450 с.
11. Хлыпало Е.И. Расчет и проектирование нелинейных корректирующих устройств в автоматических системах. - Л.: Энергоиздат, 1982. – 271 с.
12. Зельченко В.Я., Шаров С.Н. Нелинейная коррекция автоматических систем. – Л.: Судостроение, 1981. – 167 с.
13. Михайлов В.С., Харченко Р.Ю. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого

управления // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 04(80). – С. 199 – 204.

14. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечёткая логика и искусственные нейронные сети: Монография. – М., ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 221 с.

15. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВПетербург, 2005 - 736 с.

16. В. П. Дьяконов. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании - М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 576 с.

17. Расчет параметров ПИД-регулятора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.bookasutp.ru/Chapter5_5.aspx/, свободный.

18. С.С.Михалевич. Частотный метод параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарных, интервальных и многосвязных САУ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/7188/1/thesis_tpu-2015-67.pdf/, свободный.

19. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. – К.: Радиомотор, 2008. -972с.

20. ISaGRAF Version 3.4. Руководство пользователя.

21. Алексаков Г.Н. «Персональный аналоговый компьютер» - М.:Энергоатомиздат, 1992 – 256 с.

22. Технология ISaGRAF // ISaGRAF [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.isagraf.ru>.

23. Шидловский С.В. Автоматизация технологических процессов и производств: Учебное пособие. – Томск: Изд-во НТЛ, 2005. – 100 с.

24. Åström, K.J. Advanced PID control/ K.J. Åström, T. Hägglund – USA: ISA - Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. – 460 p.

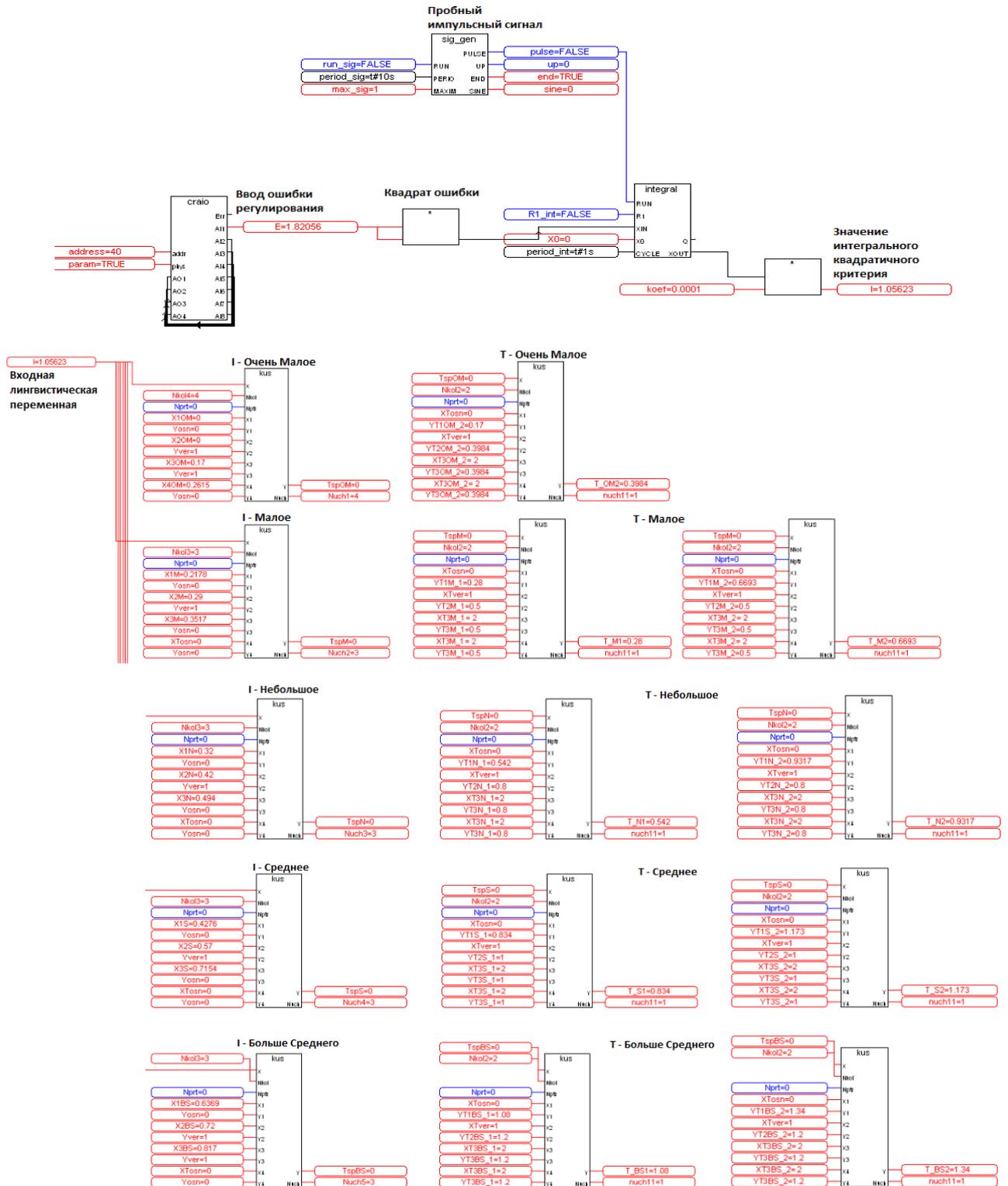
25. Исследование качества переходных процессов замкнутых систем управления [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://itmu.vsuet.ru/Posobija/OTU/htm/LR5.htm>.

26. ICCSR26000:2011. Международный стандарт «Социальная ответственность организации. Требования».

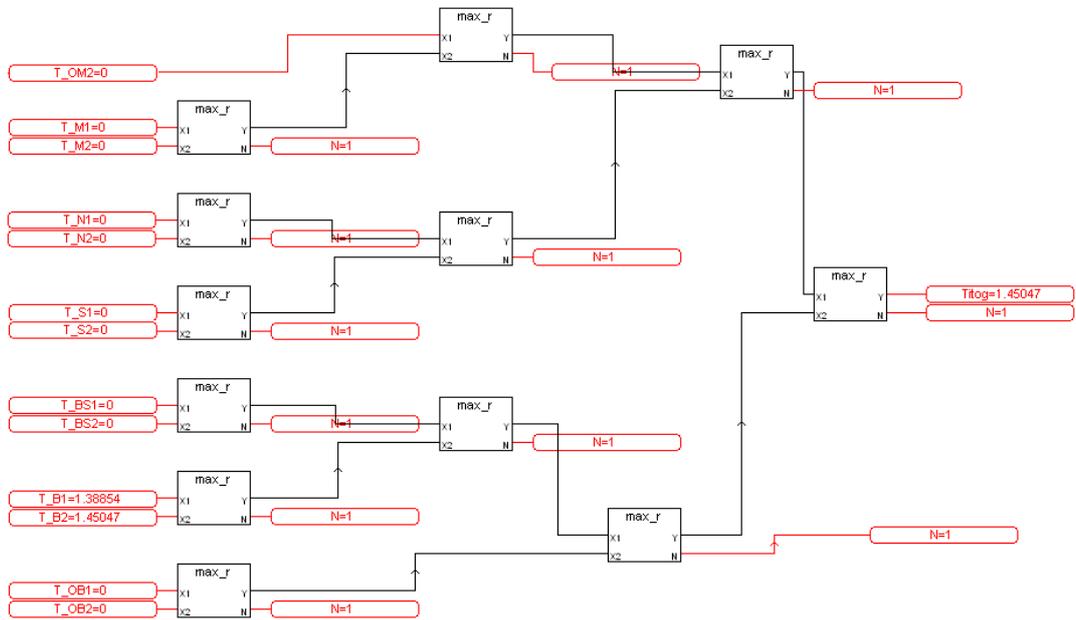
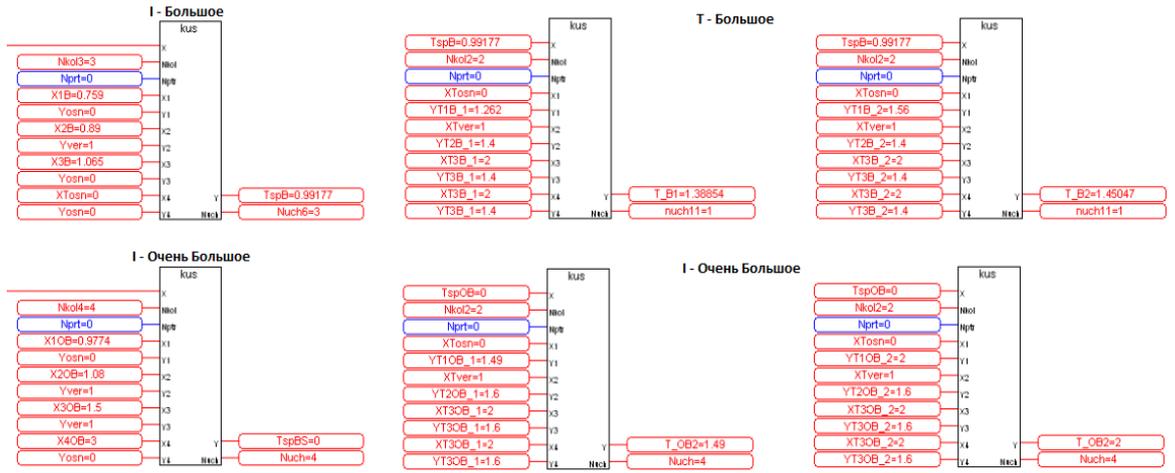
27. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997.
28. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
29. СанПиН 2.2.4.1191 – 03. Электромагнитные поля в производственных условиях. М.: Минздрав России, 2003.
30. Охрана труда в вычислительных центрах. Учеб. пос. для студентов// Ю.Г.Сибаров и др. – М.: МАЛИКО, 1990. – 192с.
31. СНиП 21 – 01 – 97. Пожарная безопасность зданий и сооружений. М.: Гострой России, 1997. – с.12.
32. Санпин 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.
33. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий"

Приложение А (обязательное)

Реализация нечеткого корректирующего устройства в системе ISaGRAF на языке FBD



Продолжение приложения А



Приложение Б

(обязательное)

Программный код, написанный на языке ST

```
IF Tsp0M=NULL THEN
TY0M2:= T_0M2*Tsp0M;
ELSE TY0M2:= T_0M2;
END_IF;
```

```
IF TspM=NULL THEN
TYM1:= T_M1*TspM;
TYM2:= T_M2*TspM;
ELSE TYM1:= T_M1;
TYM2:= T_M2;
END_IF;
```

```
IF TspN=NULL THEN
TYN1:= T_N1*TspN;
TYN2:= T_N2*TspN;
ELSE TYN1:= T_N1;
TYN2:= T_N2;
END_IF;
```

```
IF TspS=NULL THEN
TYS1:= T_S1*TspS;
TYS2:= T_S2*TspS;
ELSE TYS1:= T_S1;
TYS2:= T_S2;
END_IF;
```

```
IF TspBS=NULL THEN
TYBS1:= T_BS1*TspBS;
TYBS2:= T_BS2*TspBS;
ELSE TYBS1:= T_BS1;
TYBS2:= T_BS2;
END_IF;
```

```
IF TspB=NULL THEN
TYB1:= T_B1*TspB;
TYB2:= T_B2*TspB;
ELSE TYB1:= T_B1;
TYB2:= T_B2;
END_IF;
```

```
IF Tsp0B=NULL THEN
TY0B1:= T_0B1*Tsp0B;
TY0B2:= T_0B2*Tsp0B;
ELSE TY0B1:= T_0B1;
TY0B2:= T_0B2;
END_IF;
```

Приложение В
(обязательное)
Fuzzy logic theory basics

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM41	Усольцева Ирина Игоревна		

Консультант – лингвист кафедры ИЯИК:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ИЯИК	Логинова А.В.	к.ф.н.		

1. Fuzzy logic theory basics

1.2 The concept of the fuzzy set and its basic properties

The term ‘set’ means a set of elements that have some common characteristics. There is already known for each element if it belongs to the set or it doesn’t. But in the most cases, based on the practice of applied researches, this principle does not meet the processes that occur in real systems.

The concept of the fuzzy set is based on the assumption that any element belongs to the given set only to a certain extent. That’s why a determination of the fuzzy set degree of membership is a main method of the mathematical description and extremes values of this range (“0” and “1”) mean “does not belong” and “belongs” respectively [15].

Definition 1.1: Let E is a universal set, which owns an element “x” with R property. A is a common subset that consist of the elements like “x” and defined as a plurality of pairs according to the formula:

$$A = \{\mu_A(x) / x\}, \quad (\text{B.1})$$

where $\mu_A(x)$ - characteristic function, which takes values in the (0,1] range if “x” complies the “R” property to a certain extent, otherwise “x” is 0.

The membership function indicate the level of the element membership to the subset “A”.

Let’s define the main characteristics of fuzzy subsets. To do this let’s set “A” as a fuzzy set with elements of the universal set “E” and set of the membership “M”, where $M = \{0,1\}$.

Definition 1.2. The fuzzy set A is a normal set if its height $\sup_{x \in E} \mu_A(x)$ is equal to 1, i.e. the upper limit at least of one of its membership function is equal to 1. Fuzzy set called subnormal if $\sup_{x \in E} \mu_A(x) < 1$.

Definition 1.3. The fuzzy set is called an empty set if $\forall x \in E, \mu_A(x) = 0$. A non-empty set can be normalized according to the formula:

$$\mu_A(x) = \frac{\mu_A(x)}{\sup_{x \in E} \mu_A(x)} \quad (\text{B.2})$$

Definition 1.4. The fuzzy set is called a unimodal set if at least for one of the “x” following equality holds: $\mu_A(x) = 1$

Definition 1.5. Subset with membership functions with values $\mu_A(x) > 0$ is called a carrier of the fuzzy subset “A”, i.e. $A = \{x / x \in E, \mu_A(x) > 0\}$

Definition 1.6. Elements $x \in E$ that are corresponded to membership functions $\mu_A(x) = 0,5$ is called transition points of the set “A”.

Now let’s consider the basic logical and algebraic operations with fuzzy sets and their properties.

Definition 1.7. Let’s define “A” and “B” as a fuzzy sets in the unified set “E”. It is claimed that A contains “B” if $\forall x \in E \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$. This operation is called an inclusion operation and indicated like $A \subset B$.

Definition 1.8. Let’s define “A” and “B” as a fuzzy sets in the unified set “E”. It is claimed that “A” is equal “B” if $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = \mu_B(x)$ / This operation is called an equality and indicated like $A = B$.

Definition 1.9. Let’s define “A” and “B” as a fuzzy sets in the unified set “E” and $M=[0,1]$. “A” and “B” complement each other if $\forall x \in E \quad \mu_A(x) = 1 \Leftrightarrow \mu_B(x)$. This operation is called a complement and indicated like $B = \bar{A}$ and $\bar{\bar{A}} = A$. Hence it’s clear that $\bar{\bar{A}} = A$ (a complement is defined for $M=[0,1]$, but it’s possible to define it for any orderly M)

Definition 1.10 The intersection of “A” and “B” fuzzy sets is the largest fuzzy subset contained both in “A” and “B” sets with the membership function $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$. It’s indicated like $A \cap B$.

Definition 1.11. The association of “A” and “B” fuzzy sets is the smallest fuzzy subset including both “A” and “B” sets with the membership function $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$. It’s indicated like $A \cup B$.

Definition 1.12. The difference of “A” and “B” fuzzy sets is a $A \ominus B = A \cap \bar{B}$ fuzzy set with the membership function $\mu_{A \ominus B}(x) = \mu_{A \cap \bar{B}} = \min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x))$.

Definition 1.13. The disjunctive sum of “A” and “B” fuzzy sets is $A \oplus B = (A \Leftrightarrow B) \cup (B \Leftrightarrow A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B)$ fuzzy set with membership function: $\mu_{A \oplus B}(x) = \max(\min(\mu_A(x), 1 \Leftrightarrow \mu_B(x)); \min(1 \Leftrightarrow \mu_A(x), \mu_B(x)))$.

Let's consider properties of the intersection and association operations:

- commutative: $A \cap B = B \cap A$ and $A \cup B = B \cup A$;
- associativity: $(A \cap B) \cap C = (B \cap A) \cap C$ and $(A \cup B) \cup C = (B \cup A) \cup C$;
- idempotency: $A \cap A = A$ and $A \cup A = A$;
- distributivity: $(A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$ and $(A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$;
- $A \cup \otimes = A$, where \otimes - an empty set, i.e. $\mu_{\otimes}(x) = 0 \quad \forall x \in E$
- $A \cap \otimes = \otimes$;
- $A \cap E = A$, where E – universal set;
- $A \cup E = E$;
- de Morgan's theorems: $\overline{A \cap B} = \bar{A} \cup \bar{B}$ and $\overline{A \cup B} = \bar{A} \cap \bar{B}$.

In contrast to the crisp sets for fuzzy sets in general: $A \cap \bar{A} \neq \otimes$, $A \cup \bar{A} \neq E$

.Comment: The above-mentioned operations with fuzzy sets are based on max and min operations using. The theory of fuzzy sets deals with generic guidance and parameterized intersection operators ("and"), union ("or") and additions ("no"). One of the approaches to the intersection, complement and association operators is a class of triangular norms and conorms, which are determined by these operators.

Triangular norm (t-norm) is called the two-place real function $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, which satisfies the following conditions:

- limitation: $T(0,0) = 0$; $T(\mu_A, 1) = \mu_A$; $T(1, \mu_A) = \mu_A$;
- monotone: $T(\mu_A, \mu_B) \leq T(\mu_C, \mu_D)$, if $\mu_A \leq \mu_C$, $\mu_B \leq \mu_D$;
- commutativity: $T(\mu_A, \mu_B) = T(\mu_B, \mu_A)$;
- associativity: $T(\mu_A, T(\mu_B, \mu_C)) = T(T(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$;

Triangular conorm (t-conorm) is called the two-place real function $S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, which satisfies the following conditions:

- limitation: $S(1,1) = 1$; $T(\mu_A, 0) = \mu_A$; $T(0, \mu_A) = \mu_A$;
- monotone: $S(\mu_A, \mu_B) \geq S(\mu_C, \mu_D)$, if $\mu_A \geq \mu_C, \mu_B \geq \mu_D$;
- commutativity: $S(\mu_A, \mu_B) = S(\mu_B, \mu_A)$;
- associativity: $S(\mu_A, S(\mu_B, \mu_C)) = S(S(\mu_A, \mu_B), \mu_C)$.

Now let's consider algebraic operations with fuzzy sets and their properties.

Definition 1.14. Algebraic product of “A” and “B” fuzzy sets is a fuzzy set defined $\forall x \in E, \mu_{A \times B}(x) = \mu_A(x) \times \mu_B(x)$. It's indicated like $A * B$.

Definition 1.15. Algebraic sum of “A” and “B” fuzzy sets is a fuzzy set defined $\forall x \in E, \mu_{A+B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \Leftrightarrow \mu_A(x) \times \mu_B(x)$. It's indicated like $A + B$.

There are following properties for product and sum operations:

- commutativity: $A \times B = B \times A$ and $A + B = B + A$;
- associativity: $(A \times B) \times C = A \times (B \times C)$ and $(A + B) + C = A + (B + C)$;
- $A \times \otimes = \otimes, A + \otimes = A, A \times E = A, A + E = E$;
- de Morgan's theorems: $\overline{A \times B} = \bar{A} + \bar{B}$ and $\overline{A + B} = \bar{A} \times \bar{B}$.

The following properties are not met for product and sum operations:

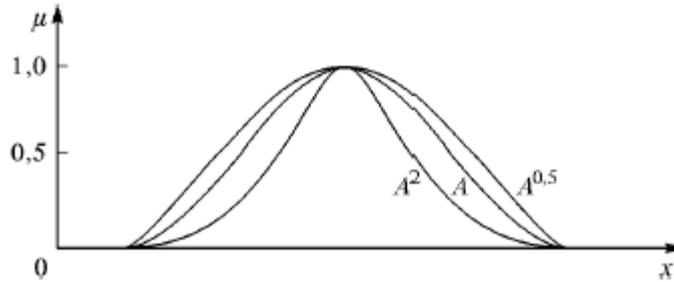
- idempotency: $A \times A = A$ and $A + A = A$;
- distributive: $A \times (B + C) = (A \times B) + (A \times C)$ and $A + (B \times C) = (A + B) \times (A + C)$;
- $A \times \bar{A} = \otimes, A + \bar{A} = E$.

Comment: During combine using of association, intersection, product and sum operations, there are following properties met:

- $A \times (B \cup C) = (A \times B) \cup (A \times C)$;
- $A \times (B \cap C) = (A \times B) \cap (A \times C)$;
- $A + (B \cup C) = (A + B) \cup (A + C)$;
- $A + (B \cap C) = (A + B) \cap (A + C)$.

Based on algebraic product operation there is “A” fuzzy set exponentiation operation defined. It's indicated like A^α , where α - number positive. Fuzzy set A^α is defined by membership function $\mu_{A^\alpha} = \mu_A^\alpha(x)$. A special cases of exponentiation are

concentrating ($CON(A) = A^2$) and stretching ($DIL(A) = A^{0.5}$) operations, which are used in work with linguistic uncertainties (picture 1.1).



Picture B.1 – Illustrations to the concept of concentration (sealing) and stretching operations

1.2 Fuzzy logic and its basic properties (fuzzy conclusions)

The concept of logic can be defined as the analysis of different methods of reasoning. In the study of these methods the logic takes shape in the first place, rather than the content of the arguments in those or other considerations. The logic doesn't care whether the individual inclusions true or false. The important thing is, it follows from the truth of the condition the truth of the conclusion or not [14,15].

Systematization, formalization and cataloging correct ways of reasoning could be called one of the main tasks of logic. The basis of the fuzzy conclusions mechanism is a knowledge base formed by experts and a set of fuzzy predicate rules:

R1: if x is A1, then y is B1;

R2: if x is A2, then y is B2;

.....

Rn: if x is An, then y is Bn;

where x – input parameter; y-output parameter (calculated using base of rules on input parameter value); “A” and “B” – membership functions defined on x and y.

Let's consider more detailed explanation below.

Expert knowledge represents fuzzy causal relationship precondition and conclusion, that's why it can be called fuzzy relation and indicated like R:

$$R = A \rightarrow B, \tag{B.3}$$

where « \rightarrow » stands for fuzzy implication.

R relation can be presented as fuzzy subset of the direct product $X \times Y$ full set precondition X and conclusion Y. Consequently, the process of obtaining the result of fuzzy output using this remark and knowledge can be written as a formula:

$$B' = A \circ R = A \circ (A \rightarrow B), \quad (\text{B.4})$$

where « \circ » - convolution operation.

Implication and composition operations of the fuzzy sets algebra can be represented in different ways. You should note that the final result will be different too. However, the general logical output is consistently implemented for the following four steps [15]:

- fuzzification stage or fuzziness. Membership functions, that have been defined by input parameters, are applied to their actual values to find truth degrees for each precondition corresponding to each rule;
- logical output stage. The values of truth for each rule's each precondition are applied to find opinions of each rule. It is one by appearing one fuzzy subset which is assigned to each fuzzy output parameter for each rule. Usually as a fuzzy output rules min and product operations are used. When the min operation is used in the logical output, membership function obtained after the withdrawal is cut off at a height corresponding the calculated values of the rules precondition truth degrees (fuzzy logic "AND"). When the product operation is used in the logical output, membership function is scaled using calculated values of the rules precondition truth degrees;
- composition stage. All fuzzy sets, assigned to each output parameter, are joined to form one subset for each output parameter. In this case max or sum operations are used. For the max type composition the fuzzy output combined method is organized by pointwise maximum over all obtained fuzzy subsets. For the sum type composition the formation of fuzzy output combined method is organized as pointwise to all fuzzy subsets assigned to all rules of logical output parameter;

- defuzzification stage is reduction to definition, which used in the reduction of fuzzy set of outputs to the number.

Let's consider some methods of reduction to definition.

Mamdani algorithm.

To describe this algorithm we suppose that base of knowledge is described by two fuzzy rules:

R1: if x is A1 and y is B1, then z is C1;

R2: if x is A2 and y is B2, then z is C2,

where x and y – input parameters; z- output parameter; A1, A2, B1, B2, C1, C2 – specified membership functions and explicit value z0 need to be determined based on the above information and explicit values x0 и y0.

In this case, Mamdani algorithm can be mathematically described as follows:

1. Fuzzification stage: the truth degrees are determined for preconditions of each of the rules: $A_1(x_0), A_2(x_0), B_1(y_0), B_2(y_0)$.

2. Logical output stage: “clipping” levels are determined for preconditions of each of the rules (using MIN operation):

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_1(x_0) \wedge B_1(y_0), \\ \alpha_2 &= A_2(x_0) \wedge B_2(y_0), \end{aligned} \tag{B.5}$$

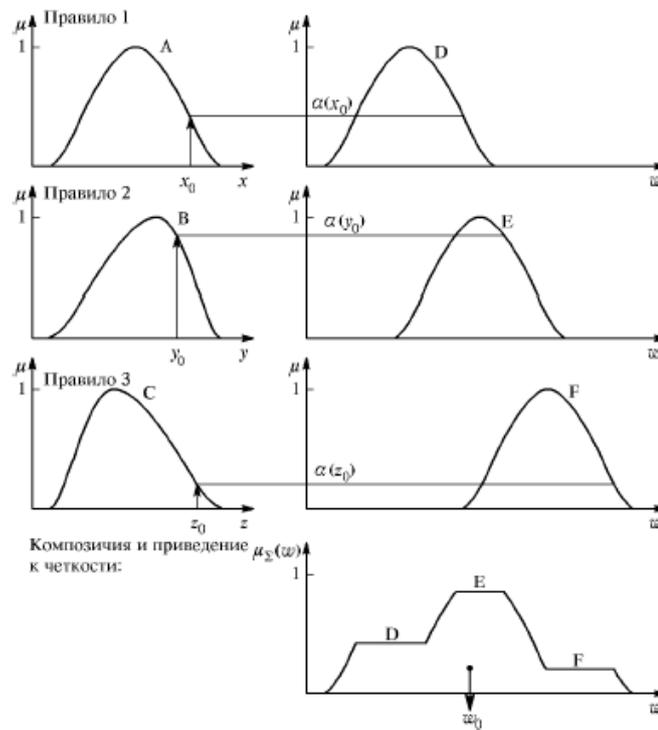
where « \wedge » is indicated the logical min operation. Then the truncated membership functions are determined:

$$\begin{aligned} C'_1(z) &= (\alpha_1 \wedge C_1(z)), \\ C'_2(z) &= (\alpha_2 \wedge C_2(z)). \end{aligned} \tag{B.6}$$

3. Composition stage: using MAX (indicated further as « \vee ») there is an association of determined truncated functions, and, as a consequence, getting the final fuzzy subset for the output parameter with following membership function:

$$\mu_{\Sigma}(z) = C(z) = C'_1(z) \vee C'_2(z) = (\alpha_1 \wedge C_1(z)) \vee (\alpha_2 \wedge C_2(z)). \tag{B.7}$$

4. Defuzzification stage (to determine z_0): it is a reduction to definition (for example, using centroid method) [14,15].



Picture B.2. – Mamdani algorithm illustration

Tsukamoto algorithm

Initial data is taken the same as for Mamdani algorithm, but for this method we suppose that $C_1(z_1)$ и $C_2(z_2)$ function are monotone.

1. Fuzzification stage: use the same principle that was formulated in Mamdani algorithm.

2. Logical output stage: firstly “clipping” levels for α_1 and α_2 are determined (like on Mamdani algorithm), then α_1 and α_2 are found for each of the initial rules by solving the following evaluations:

$$\alpha_1 = C_1(z), \alpha_2 = C_2(z) \quad (B.8)$$

where z_1 and z_2 - explicit values for each of the initial rules.

3. Defuzzification stage: it is a formation of the explicit value of the output parameter (as the weighted average of z_1 and z_2):

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot z_1 + \alpha_2 \cdot z_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (B.9)$$

In the general case (discrete version of the centroid output) [14,15]:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (\text{B.10})$$

Sugeno algorithm.

Let's use following set of rules for mathematical describing Sugeno and Takagi algorithms:

R1: if x is A1 and y is B1, then $z_1 = a_1 \cdot x + b_1 \cdot y$,

R2: if x is A2 and y is B2, then $z_2 = a_2 \cdot x + b_2 \cdot y$. (B.11)

1. Fuzzification stage: use the same principle that was formulated in Mamdani algorithm.

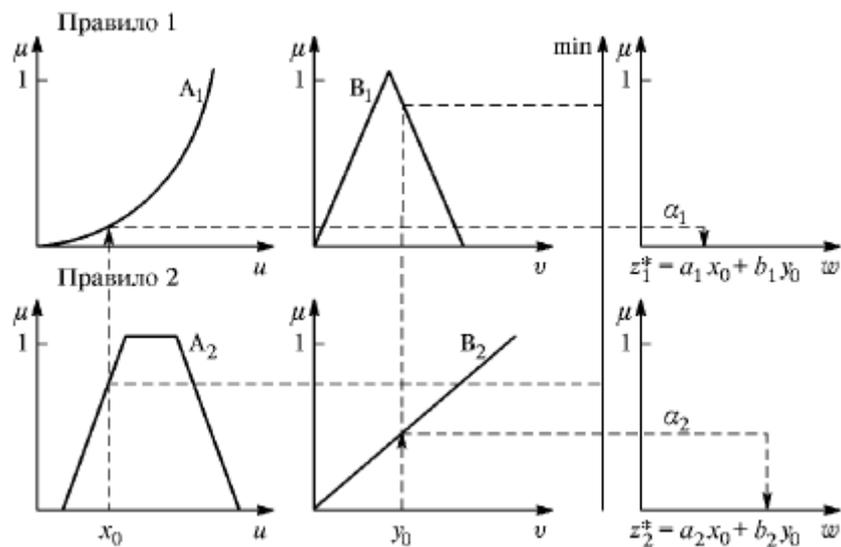
2. Logical output stage: $\alpha_1 = A_1(x_0) \wedge B_1(y_0)$ and $\alpha_2 = A_2(x_0) \wedge B_2(y_0)$ and individual rules output are determined:

$$z_1^* = a_1 \cdot x_0 + b_1 \cdot y_0 \quad (\text{B.12})$$

$$z_2^* = a_2 \cdot x_0 + b_2 \cdot y_0$$

3. Defuzzification stage: it is a determination of the explicit value of the output parameter [14,15]:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot z_1^* + \alpha_2 \cdot z_2^*}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (\text{B.13})$$



Picture B.3 – Sugeno algorithm illustration

Larsen algorithm

In the Larsen algorithm fuzzy implication is modeled using product operator.

1. Fuzzification stage: use the same principle that was formulated in Mamdani algorithm.

2. Logical output stage: firstly “clipping” levels for α_1 and α_2 are determined (like on Mamdani algorithm), then special fuzzy subsets are determined.

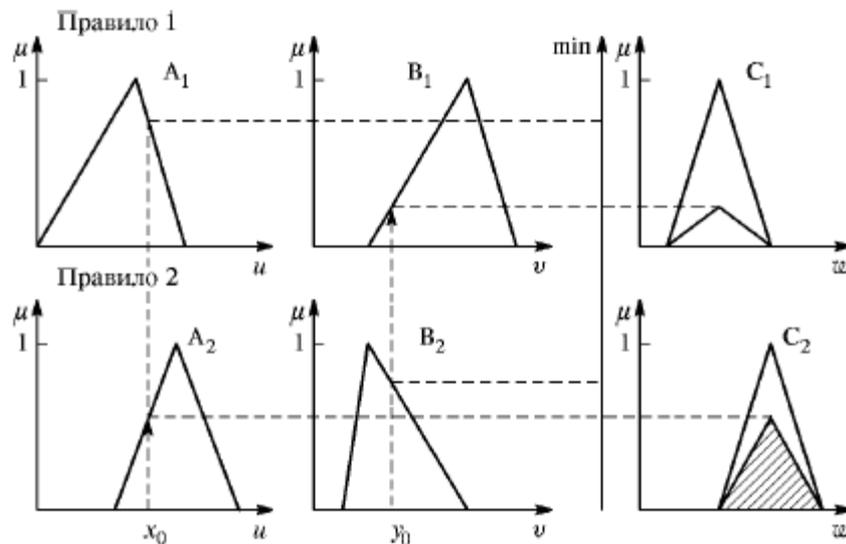
$$\alpha_1 C_1(z), \quad \alpha_2 C_2(z). \quad (\text{B.14})$$

3. Composition stage: final fuzzy subset is determined with the following membership function:

$$\mu_{\Sigma}(z) = C(z) = (\alpha_1 C_1(z)) \vee (\alpha_2 C_2(z)), \quad (\text{B.15})$$

(in general case of the n rules: $\mu_{\Sigma}(z) = C(z) = \bigcup_{i=1}^n (\alpha_i C_i(z))$).

4. Defuzzification stage: it is a reduction to definition (like in algorithms considered above) [14,15].



Picture B.4. – Larsen algorithm illustration

Simplified algorithm of the fuzzy output.

To describe this algorithm we suppose, that base of knowledge is described by following fuzzy rules:

R1: if x is A1 and y is B1, then $z_1 = c_1$,

R2: if x is A2 and y is B2, then $z_2 = c_2$,

where c_1 and c_2 are some regular (explicit) numbers.

1. Fuzzification stage: use the same principle that was formulated in Mamdani algorithm.

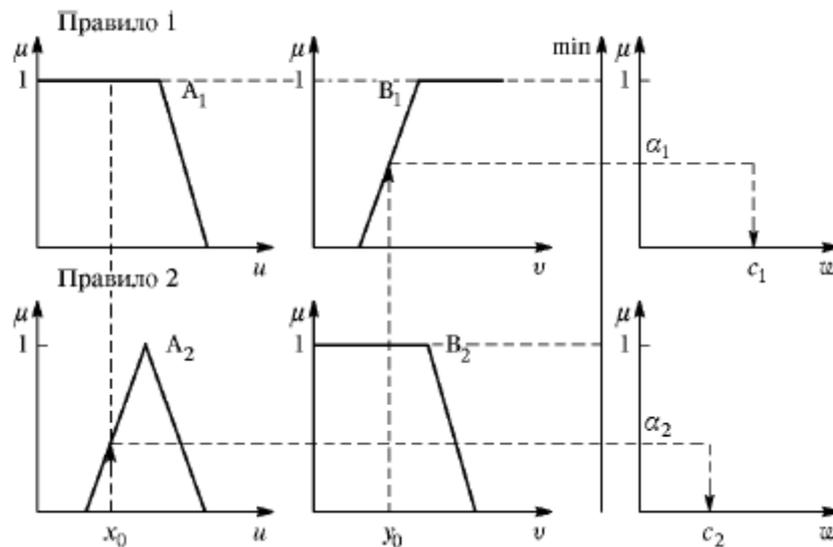
2. Logical output stage: firstly “clipping” levels for α_1 and α_2 are determined (like on Mamdani algorithm).

3. Defuzzification stage: it is a determination of the explicit value of the output parameter using the following formula:

$$z_0 = \frac{\alpha_1 \cdot c_1 + \alpha_2 \cdot c_2}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (\text{B.16})$$

or in the general case of the n rules using the next formula:

$$z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i} \quad (\text{B.17})$$



Picture B.5. – Simplified algorithm of the fuzzy output illustration