

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

Институт Кибернетики

Направление подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах»

Кафедра Автоматики и компьютерных систем

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Разработка, исследование и программная реализации адаптивного нечеткого псевдолинейного регулятора

УДК 681.515

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5А	Кущева Елена Сергеевна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АИКС	Скороспешкин В.Н.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Извеков В.Н.	к.т.н.		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС ИК	Суходоев М.С.	к.т.н.		

Томск – 2017г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)
Профессиональные компетенции	
P1	Обладать естественнонаучными и математическими знаниями для решения инженерных задач в области разработки, производства и эксплуатации систем управления техническими объектами и средств автоматизации.
P2	Обладать знаниями о передовом отечественном и зарубежном опыте в области управления техническими объектами с использованием вычислительной техники
P3	Применять полученные знания (P1 и P2) для формулирования и решения инженерных задач при проектировании, производстве и эксплуатации современных систем управления техническими объектами и их составляющих с использованием передовых научно-технических знаний, достижений мирового уровня, современных инструментальных и программных средств.
P4	Уметь выбирать и применять соответствующие методы анализа и синтеза систем управления, методы расчета средств автоматизации, уметь выбирать и использовать подходящее программное обеспечение, техническое оборудование, приборы и оснащение для автоматизации и управления техническими объектами.
P5	Уметь находить электронные и литературные источники информации для решения задач по управлению техническими объектами.
P6	Уметь планировать и проводить эксперименты, обрабатывать данные и проводить моделирование с использованием вычислительной техники, использовать их результаты для ведения инновационной инженерной деятельности в области управления техническими объектами.
P7	Демонстрировать компетенции, связанные с инженерной деятельностью в области научно-исследовательских работ, проектирования и эксплуатации систем управления и средств автоматизации на предприятиях и организациях – потенциальных работодателях, а также готовность следовать их корпоративной культуре
Универсальные компетенции	
P8	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы с ответственностью за работу коллектива при решении инновационных инженерных задач в области автоматизации и управления техническими объектами, демонстрировать при этом готовность следовать профессиональной этике и нормам.
P9	Иметь широкую эрудицию, в том числе знание и понимание современных общественных и политических проблем, вопросов безопасности и охраны здоровья сотрудников, юридических аспектов, ответственности за инженерную деятельность, влияния инженерных решений на социальный контекст и окружающую среду.
P10	Понимать необходимость и уметь самостоятельно учиться и повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.

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

Институт Кибернетики
Направление подготовки 27.04.04 «Управление в технических системах»
Кафедра Автоматики и компьютерных систем

УТВЕРЖДАЮ:
Ио зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) Суходоев М.С.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
8AM5A	Кущевой Елене Сергеевне

Тема работы:

Разработка, исследование и программная реализация адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№786/с от 09.02.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	9.06.2017
--	-----------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	- Объект управления второго порядка с запаздыванием и без запаздывания. - Псевдолинейные корректирующие устройства. - Нечеткая логика. - Программная реализация на языках стандарта МЭК 61131-3
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	- Анализ принципов построения нечетких регуляторов. - Анализ принципов построения адаптивных регуляторов. - Выбор структуры адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора. - Анализ и выбор корректирующих устройств систем автоматического регулирования. - Разработка и исследование в среде MATLAB свойств систем управления с адаптивным псевдолинейным нечетким регулятором. - Исследование свойств САР с адаптивным псевдолинейным нечетким регулятором. - Программная реализация регулятора.
Перечень графического материала	Презентация в формате *.pttx, 20 слайдов Слайд 1. Титульный лист.

	Слайд 2. Цели и задачи. Слайд 3. Структура псевдолинейного нечеткого регулятора. Слайд 4-6. Псевдолинейные КУ Слайд 7. Функции принадлежности входных и выходных переменных. Слайд 8-10. Переходные процессы в САР с нечеткими псевдолинейными и ПИД регуляторами Слайд 11. Структура адаптивного нечеткого псевдолинейного регулятора. Слайд 12-14. Переходные процессы в САР с адаптивным нечетким псевдолинейным регулятором. Слайд 15. Программная реализация. Слайд 16. Финансовый менеджмент. Слайд 17. Социальная ответственность. Слайд 18. Заключение. Слайд 19. Conclusion. Слайд 20. Список публикаций студента.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Извеков В.Н.
Английский язык	Денико Р.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Методы оценки качества регулирования в САР. Анализ принципов построения адаптивных регуляторов.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.02.2017
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АиКС	Скороспешкин В.Н.	к.т.н.		01.02.2017

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5А	Куцева Елена Сергеевна		01.02.2017

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

Институт кибернетики

Кафедра автоматизации и компьютерных систем

Направление 27.04.04 «Управление в технических системах»

Уровень образования – магистр

Период выполнения – осенний/весенний семестр 2016/2017 учебного года

Форма представления работы:

Магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

9.06.2017

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
29.05.17	Основная часть	60
25.05.17	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	15
19.05.17	Социальная ответственность	15
26.05.17	Приложение на иностранном языке	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. АиКС	Скороспешкин В.Н.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
АиКС ИК	Суходоев М.С.	к.т.н.		

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

Студенту:

Группа	ФИО
8AM5A	Кущевой Елене Сергеевне

Институт		Кафедра	
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	27.04.04 «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. Разработка устава научно-технического проекта	
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. «Портрет» потребителя результатов НТИ
2. Сегментирование рынка
3. Оценка конкурентоспособности технических решений
4. Диаграмма FAST
5. Матрица SWOT
6. График проведения и бюджет НТИ
7. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ
8. Потенциальные риски

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2017
---	-------------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЭН	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM5A	Кущева Елена Сергеевна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8AM5A	Кущевой Елене Сергеевне

Институт		Кафедра	
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	27.04.04 «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	Разработка, исследование и программная реализация адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора. Область применения данной разработки относится к применению в учебном процессе технических вузов при изучении курса «Автоматизированное управление в технических системах», а также в качестве программного модуля для промышленных контроллеров.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности 1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности	Выявленные на рабочем месте вредные факторы: - повышенная температура окружающей среды; - недостаток естественного освещения; - повышенный уровень шума; - напряженность труда; - электромагнитные излучения. Выявленные на рабочем месте опасные факторы: - электрический ток. Разработка организационных и технических мер по нормализации уровней факторов и защите от их действия.
2. Экологическая безопасность	Анализ воздействия объекта ВКР и области его использования на окружающую среду. Разработка решений по обеспечению экологической безопасности.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	В аудиторном помещении возможно ЧС техногенного характера – пожар (возгорание). Разработка превентивных мер по предупреждению ЧС. Разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	Специальные правовые нормы трудового законодательства. Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны оператора.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	20.03.2017
--	------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Извеков В.Н.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8AM5A	Кущева Елена Сергеевна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 134 с., 68 рис., 31 табл., 102 источника, 11 прил.

Ключевые слова: псевдолинейные корректирующие устройства, нечеткая логика, фаззификация, дефаззификация, база правил, нечеткий регулятор, адаптивный регулятор.

Объектом исследования является адаптивная система автоматического регулирования с псевдолинейным нечетким регулятором.

Цель работы – разработка и программная реализация системы автоматического регулирования с псевдолинейным нечетким регулятором с адаптивной структурой.

В процессе работы проводился анализ аппарата нечеткой логики, псевдолинейных корректирующих устройств и исследование свойств систем автоматического регулирования с использованием ПИД-регулятора и адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора.

Результатом работы является предложенный адаптивный псевдолинейный нечеткий регулятор и его программная реализация для промышленных микропроцессорных контроллеров. Предложенный регулятор позволяют улучшить качество регулирования по сравнению с системами, реализованными на базе ПИД-регуляторов. Проведено исследование свойств предложенного регулятора и выработаны практически рекомендации по его применению.

Результаты работы в виде методических указаний по выполнению лабораторной работы и программ будут использоваться в учебном процессе кафедры АиКС при изучении курса «Автоматизированное управление в технических системах».

СОКРАЩЕНИЯ

- КУ – корректирующее устройство;
НКУ – нелинейное корректирующее устройство;
НДК – нелинейный динамический корректор;
ПКУ – псевдолинейное корректирующее устройство;
ЛАЧХ – логарифмическая амплитудная частотная характеристика;
ЛФЧХ – логарифмическая фазовая частотная характеристика;
САР – система автоматического регулирования;
ОУ – объект управления;
УУ – устройство управления;
ПИД-регулятор – пропорционально-интегро-дифференциальный регулятор;
БПР – блок принятия решения.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	13
1 Анализ корректирующих устройств систем автоматического регулирования	15
1.1 Линейные корректирующие устройства	17
1.2 Нелинейные корректирующие устройства	17
1.3 Псевдолинейные корректирующие устройства.....	21
1.4 Сравнение качества переходных процессов в САР с различными корректирующими устройствами	42
2 Методы оценки качества регулирования в САР.....	45
2.1 Прямые методы оценки качества	45
2.2 Косвенные методы оценки качества	47
3 Методы настройки ПИД-регулятора.....	51
3.1 Методы настройки регуляторов	51
3.2 Настройка ПИД-регулятора.....	53
4 Анализ принципов построения нечетких регуляторов	56
4.1 Основные понятия нечеткой логики	56
4.2 Анализ систем автоматического регулирования с применением нечеткой логики	63
5 Анализ принципов построения адаптивных регуляторов.....	65
5.1 Выбор системы с нечетким регулятором с адаптивной структурой	66
5.2 Последовательность действий по разработке адаптивного нечеткого псевдолинейного регулятора.....	68
6 Разработка и исследование в среде MATLAB свойств систем управления с псевдолинейным нечетким регулятором с адаптивной структурой и выработка рекомендаций по применению	71
6.1 Разработка и исследование в среде MATLAB свойств систем управления с псевдолинейным нечетким регулятором с адаптивной структурой	71
6.2 Рекомендации по применению адаптивных нечетких псевдолинейных регуляторов.....	82
7 Программная реализация регулятора.....	83
7.1 Среда программирования CodeSys.....	83

7.2 Программная реализация адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора в среде CoDeSys	84
8 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	90
8.1 Организация и планирование работ	90
8.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта	95
8.3 Оценка экономической эффективности проекта	101
9 Социальная ответственность	103
9.1 Производственная безопасность	104
9.2 Экологическая безопасность	117
9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	118
9.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
CONCLUSION	125
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА	126
СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	127
Приложение А – Переходные процессы в САР с различными ПКУ	136
Приложение Б – Листинг m-файла автоматической подстройки параметра блока в среде Simulink	137
Приложение В – Листинг m-файла автоматической подстройки постоянной времени ПКУ с амплитудным подавлением блока в среде Simulink	139
Приложение Г – Листинг m-файла автоматической подстройки постоянной времени ПКУ с фазовым опережением блока в среде Simulink	140
Приложение Д – Листинг m-файла автоматической подстройки постоянной времени ПКУ с переключением сигналов блока в среде Simulink	141
Приложение Е – Переходные процессы в САР с нечеткими регуляторами	142
Приложение Ж – Переходные процессы в адаптивной САР	143
Приложение И – Переходные процессы в адаптивной САР	145
Приложение К – Реализация в среде CoDeSys псевдолинейных корректирующих устройств	146
Приложение Л – Программная реализация основных блоков программы	147
Приложение М – Раздел на английском языке	157

ВВЕДЕНИЕ

В инженерной практике на начальном этапе разработки систем управления обычно стремятся создать более простую модель процесса управления. Данная ситуация объясняется тем, что простая модель позволяет более полно изучить процесс управления путем имитации его с помощью аналоговых либо цифровых вычислительных машин, что позволяет выбрать наиболее подходящий режим работы системы автоматического регулирования.

Для современного производства характерно ужесточение допустимых отклонений и требований к процессу управления, что вызывает усложнение технологических процессов. Совершенствование методов управления предполагает разработку более сложных математических моделей, позволяющих более точно описать процесс управления.

К настоящему времени разработаны различные подходы по управлению, такие как адаптивный, робастный, нечеткий, нейронный. Данные подходы по управлению позволяют снизить зависимость процесса синтеза регуляторов от степени изученности объекта управления.

Одной из важных задач науки является построение компьютерных систем, основанных на человеческом мышлении. Впервые в этом направлении начал работать калифорнийский профессор Лотфи А. Заде и ввел такое понятие как нечеткая логика.

Нечеткая логика с каждым годом привлекает все большее число исследователей из разных научных областей. В настоящее время нечеткой логикой во всем мире занимаются тысячи ученых и инженеров, по этой тематике опубликованы сотни книг [46-49,53,55,57,58], десятки тысяч статей [50,51,54,56], издается более 40 научных журналов по нечеткой логике. Механизмы нечеткой логики реализованы в сотнях прикладных систем: в стиральных машинах, видеокамерах, двигателях, системах управления метро и летательными аппаратами и т.д.

В данной работе целью использования нечеткой логики является подстройка параметров псевдолинейного регулятора, используемого для

улучшения показателей качества в системах регулирования, где традиционный классический регулятор не обеспечивает заданное качество САР при изменении параметров объекта управления в широком диапазоне.

Актуальность данной работы заключается в целесообразности использования методов, которые специально ориентированы на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных.

Основной задачей данной работы является разработка системы автоматического регулирования с адаптивным псевдолинейным нечетким регулятором на основе исследования псевдолинейных корректирующих устройств [6-8] и их влияния на процесс регулирования, а также принципов построения нечетких и адаптивных регуляторов [46]. Заключающий этап работы – программная реализация адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора на языках стандарта МЭК 61131-3.

1 Анализ корректирующих устройств систем автоматического регулирования

Основное значение при улучшении качества автоматического регулирования является обеспечение необходимого запаса устойчивости и быстродействия систем. Это объясняется стремлением снизить ошибки регулирования. Поэтому поддержание требуемой точности, и при этом повышения запаса устойчивости в САР, осуществляется при помощи использования корректирующих устройств.

При решении задач повышения запаса устойчивости проектируемой САР, необходимо попытаться рациональным образом определить параметры основных составляющих системы так, чтобы удовлетворить требованиям по качеству регулирования. Если в рамках имеющейся автоматической системы решить эту задачу невозможно, приходится идти на изменение ее структуры. В этом случае целесообразно ввести в систему автоматического регулирования корректирующие средства, которые изменяют динамику всей автоматической системы в нужном направлении [1].

К средствам коррекции относят корректирующие звенья и корректирующие устройства. Корректирующие звенья имеют определенную передаточную функцию и на схеме отображаются одним блоком (интегрирующее звено, форсирующее звено и т.д.). Если этот элемент достаточно сложен, то он называется корректирующим устройством. Корректирующие устройства – это устройства САР, которые обеспечивают заданные показатели качества работы этих систем. Иначе говоря, для обеспечения требуемой точности и запаса устойчивости САР требуется введение в нее дополнительного элемента, который определенным образом корректирует свойства исходной системы автоматического регулирования.

Таким образом, любое устройство, включенное в систему управления с целью обеспечения требуемых показателей качества, можно рассматривать как корректирующее устройство.

По способу включения в систему корректирующие устройства классифицируются на последовательные, параллельные и встречно параллельные (рисунок 1.1) [2].

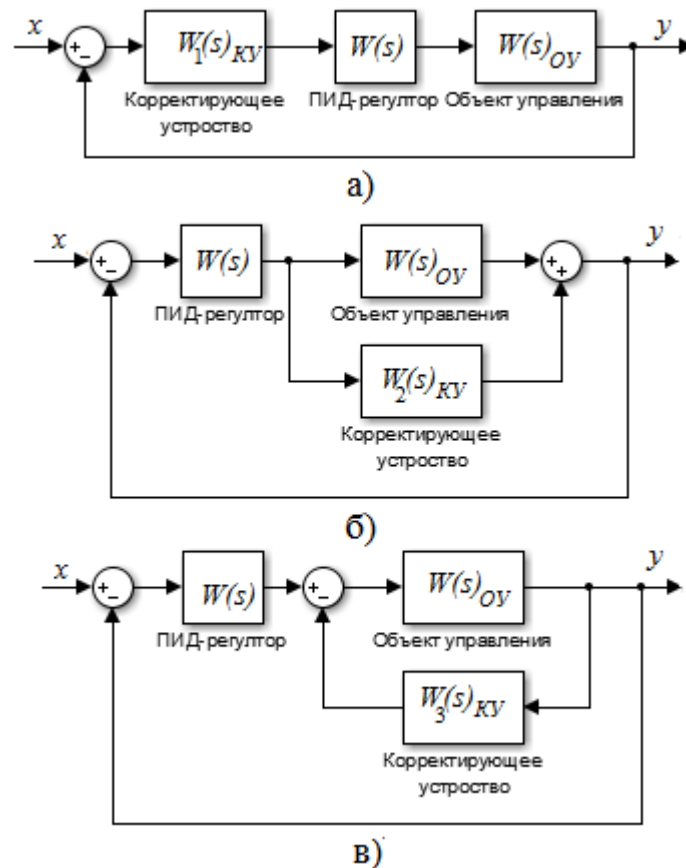


Рисунок 1.1 – Способы включения КУ в систему управления:

а) последовательное включение, б) параллельное включение, в) встречно-параллельное включение

Последовательное корректирующее устройство $W_1(s)$ включается непосредственно после датчика рассогласования или усилителя. Параллельное корректирующее устройства $W_2(s)$ позволяет при меньшей сложности получить нужное преобразование сигнала. Параллельно-встречные корректирующие устройства $W_3(s)$ являются обратной связью, чаще отрицательной, которая охватывает один из элементов прямой цепи.

Достоинством использования последовательных КУ является не влияние на свойства системы обратной связи, что в свою очередь является недостатком параллельных КУ: гибкая обратная связь увеличивает инерционность, т.е.

увеличивает постоянную времени звена, а жесткая обратная связь соответственно уменьшает.

Различают следующие разновидности корректирующих устройств:

- линейные корректирующие устройства;
- нелинейные корректирующие устройства;
- псевдолинейные корректирующие устройства.

1.1 Линейные корректирующие устройства

В зависимости от вида включения в систему линейные корректирующие устройства подразделяют на три типа[3]:

- последовательные корректирующие элементы;
- параллельные корректирующие элементы;
- корректирующие обратные связи.

К линейным корректирующим элементам относят корректирующие звенья. Наибольшее применение получили следующие последовательные корректирующие звенья: пропорционально-дифференцирующее, пропорционально-интегрирующее и пропорционально-интегро-дифференцирующее, а также звенья входящие в местную обратную связь элемента системы управления [4]. Принцип действия, описание и логарифмические характеристики таких звеньев приведены в [5,6].

Линейные корректирующие устройства имеют ограниченные возможности в получении высоких показателей качества и точности процессов управления в автоматических системах. В связи с этим удовлетворяя одним показателям качества, есть вероятность отрицательно повлиять на другие показатели. В виду этого в системах управления в настоящее время широко применяются нелинейные КУ.

1.2 Нелинейные корректирующие устройства

Нелинейные корректирующие устройства (НКУ) широко используются в системах автоматического управления. Простейшим нелинейным

корректирующим звеном является звено типа "насыщение", используемое для ограничения какого-либо параметра системы. Нелинейные корректирующие устройства могут быть последовательными или параллельными, а также могут быть установлены в цепях обратной связи. Правильный выбор типа и параметров нелинейных корректирующих устройств позволяет синтезировать оптимальные законы управления, обеспечивающие высокую точность и качество работы системы, улучшать переходные процессы и придавать системе инвариантные свойства. Нелинейные корректирующие устройства позволяют в нестационарных системах получать практически постоянные запасы устойчивости и показатели качества вне зависимости от изменения параметров объекта.

Нелинейные корректирующие устройства, встречающиеся в системах автоматического управления, можно разделить на три группы [7]:

- нелинейные четырехполюсники последовательного и параллельного действия;
- нелинейные законы управления;
- нелинейные корректирующие устройства, использующие элементы неизменяемой части системы.

Нелинейные четырехполюсники обеспечивают положительный фазовый сдвиг в системе, но при этом увеличивают время регулирования, нелинейный элемент с зоной нечувствительности увеличивают статическую ошибку.

К первой группе нелинейных корректирующих устройств, также можно отнести нелинейные динамические корректоры (НДК). Нелинейные динамические корректоры вносят в САУ опережение по фазе и определяют запасы устойчивости по фазе. Нелинейные динамические корректоры могут состоять из одного нелинейного и нескольких линейных звеньев [8].

Существует несколько разновидностей НДК с параллельными каналами. Некоторые виды таких устройств приведены на рисунках 1.2 – 1.4.

На рисунке 1.2 представлен НДК с единственным нелинейным статическим элементом с зоной нечувствительности (а) и типа насыщение (б).

На рисунке 1.2 (а) показан случай с большим коэффициентом усиления k и зоной нечувствительности. Этот НДК уменьшает фазовое запаздывание на 180° для сигналов с большими амплитудами [8]. На рисунке 1.2 (б) показан случай, когда используется звено с насыщением, которое в нужном диапазоне частот дает фазовое опережение в 180° для сигналов с большими амплитудами [8].

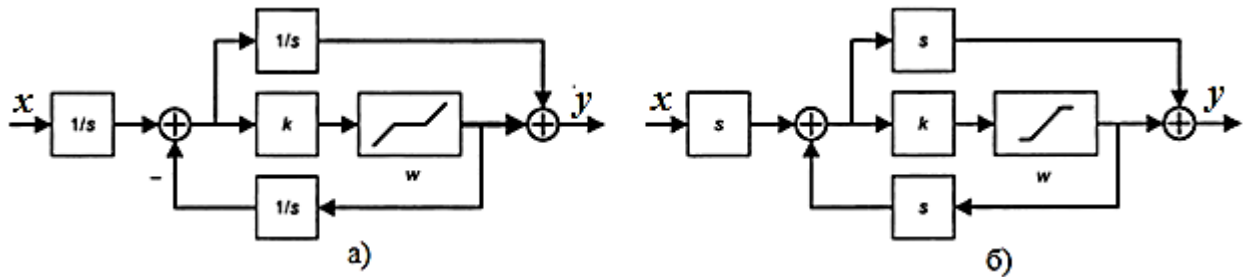


Рисунок 1.2 – НДК с параллельными каналами

На рисунке 1.3 представлен НДК с параллельными каналами: в верхнем канале нелинейный элемент типа насыщение с единичным порогом и линейное звеном C_1 , а в нижнем нелинейный элемент с единичной зоной нечувствительности и линейным звеном C_2 . Второй канал отключается, когда амплитуда сигнала меньше единицы, и доминирует при перегрузке первого канала [8].

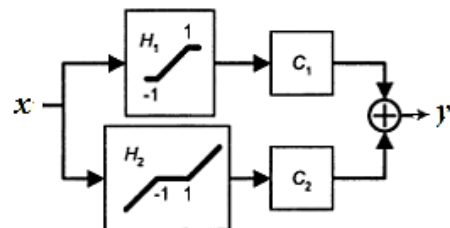


Рисунок 1.3 – НДК с параллельными параметрами

В данной работе из этой группы НДК был рассмотрен НДК с параллельными каналами, вносящий опережение по фазе (рисунок 1.4). В верхнем канале НДК включены нелинейное звено типа насыщение и интегратор, в нижнем канале – коэффициент усиления.

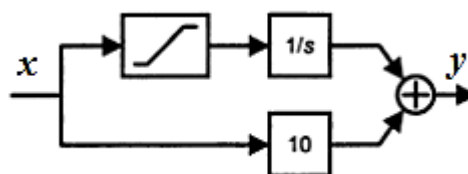


Рисунок 1.4 – НДК с параллельными каналами

Амплитудные и фазовые частотные характеристики данного устройства приведены на рисунке 1.5.

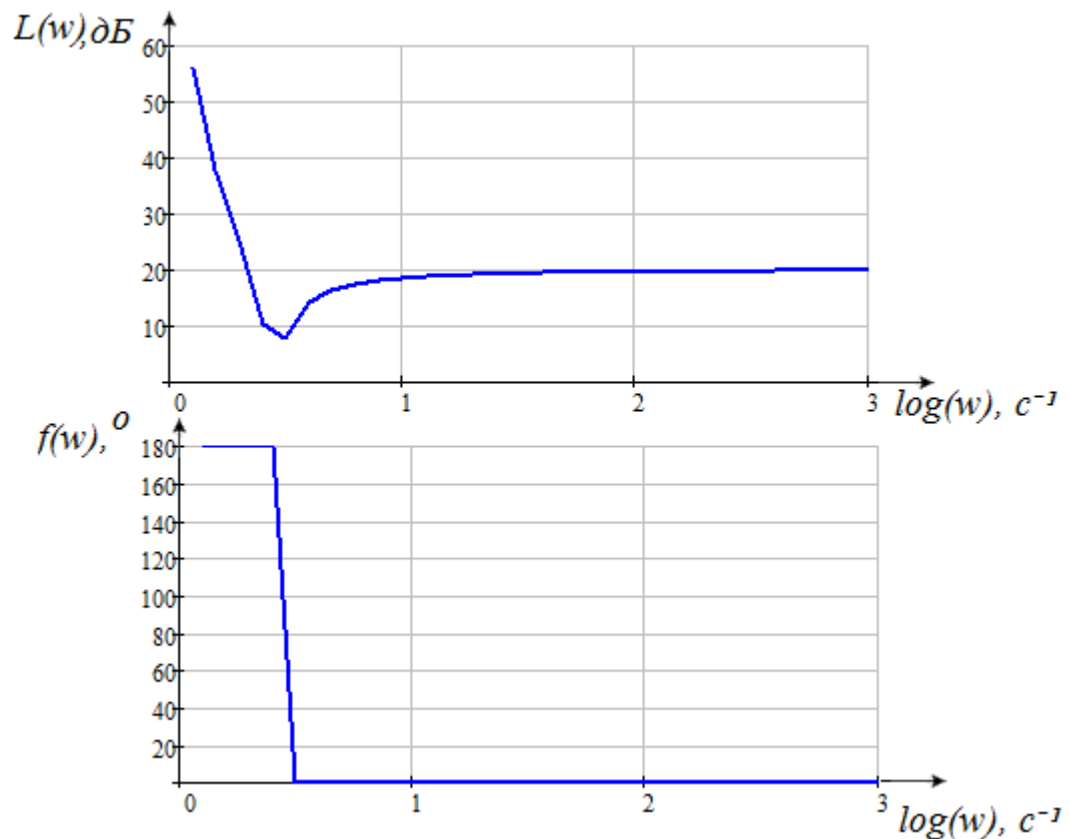


Рисунок 1.5 – ЛАЧХ и ЛФЧХ НДК с параллельными каналами

Анализ ЛАФЧХ показал, что такое НДК (рисунок 1.4) на малых частотах вносит опережение по фазе, при этом, если уменьшить коэффициент усиления в нижнем канале, опережение по фазе будет на большем диапазоне частот.

Следующая группа нелинейных КУ нелинейный законы управления. Нелинейные законы управления реализуются с помощью нелинейных корректирующих устройств, например

$$U(t) = k \cdot \frac{de(t)}{dt} + \text{sign } \varepsilon(t) \cdot \sqrt{|\varepsilon(t)|}.$$

Результаты исследований показали, что нелинейные законы управления вносят в САР положительный фазовый сдвиг, в то время как ПИД-регулирование вносит положительный и отрицательный фазовый сдвиг. Среди недостатков можно выделить увеличение статической ошибки.

Для анализа и синтеза нелинейных систем широко применяются частотные методы [9]. При таком подходе, из большинства нелинейных устройств пригодных для коррекции, выбираются устройства, амплитудно-фазовые характеристики которых не зависят от амплитуды входного сигнала. Такие устройства называются псевдолинейными корректирующими устройствами (ПКУ).

1.3 Псевдолинейные корректирующие устройства

В отличие от линейных корректирующих устройств псевдолинейные корректирующие устройства позволяют формировать амплитудные и фазовые частотные характеристики практически независимо друг от друга, так как такие КУ имеют два независимых канала – амплитудный и фазовый. Псевдолинейные корректирующие устройства позволяют реализовать оптимальные законы управления, компенсировать вредное влияние некоторых сопутствующих нелинейностей.

Наиболее широкое распространение нашли следующие псевдолинейные корректирующие устройства [7,8]:

- корректирующие устройства с амплитудным подавлением;
- корректирующее устройство с фазовым опережением;
- корректирующее устройство с отдельными каналами для амплитуды и фазы;
 - интегратор Клегга;
 - устройства с обратным гистерезисом;
 - корректирующие устройства с переключением сигналов.

1.3.1 Корректирующие устройства с амплитудным подавлением

Псевдолинейное корректирующее устройство с амплитудным подавлением представляет собой комбинацию последовательно соединенных блоков взятия функции $\text{sign } x$, низкочастотного фильтра, модуля и арифметического блока умножения (рисунок 1.6).

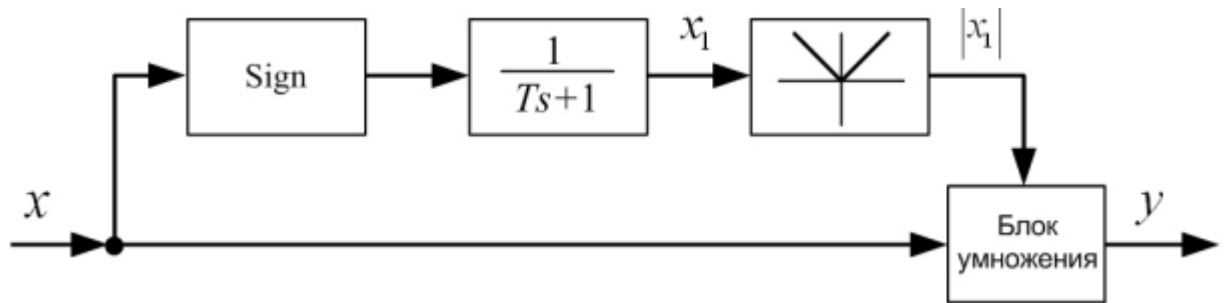


Рисунок 1.6 – Структурная схема ПКУ с амплитудным подавлением

Нелинейный фильтр позволяет получить ослабление амплитуды с ростом частоты без изменения фазы. Выходной сигнал фильтра получается как произведение сигналов двух ветвей:

$$y(t) = |x_1(t)| \cdot x(t) , \quad (1.1)$$

при этом x_1 определяется следующим уравнением

$$T \cdot \frac{dx_1(t)}{dt} + x_1(t) = \text{sign}x(t) . \quad (1.2)$$

Исследование псевдолинейных корректирующих устройств проще всего осуществлять методом гармонической линеаризации [10]. Поэтому, полагая, что на входе фильтра действует синусоидальный сигнал, решение уравнения (1.2) имеет вид

$$x_1(t) = \left(\mp \frac{1 - e^{-\frac{\omega\pi}{T}}}{1 - e^{-\frac{\omega\pi}{T}}} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \pm \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) ,$$

причем верхний знак «минус» для положительной полуволны входного сигнала x .

Форма сигнала в характерных точках фильтра показана на рисунке 1.7.

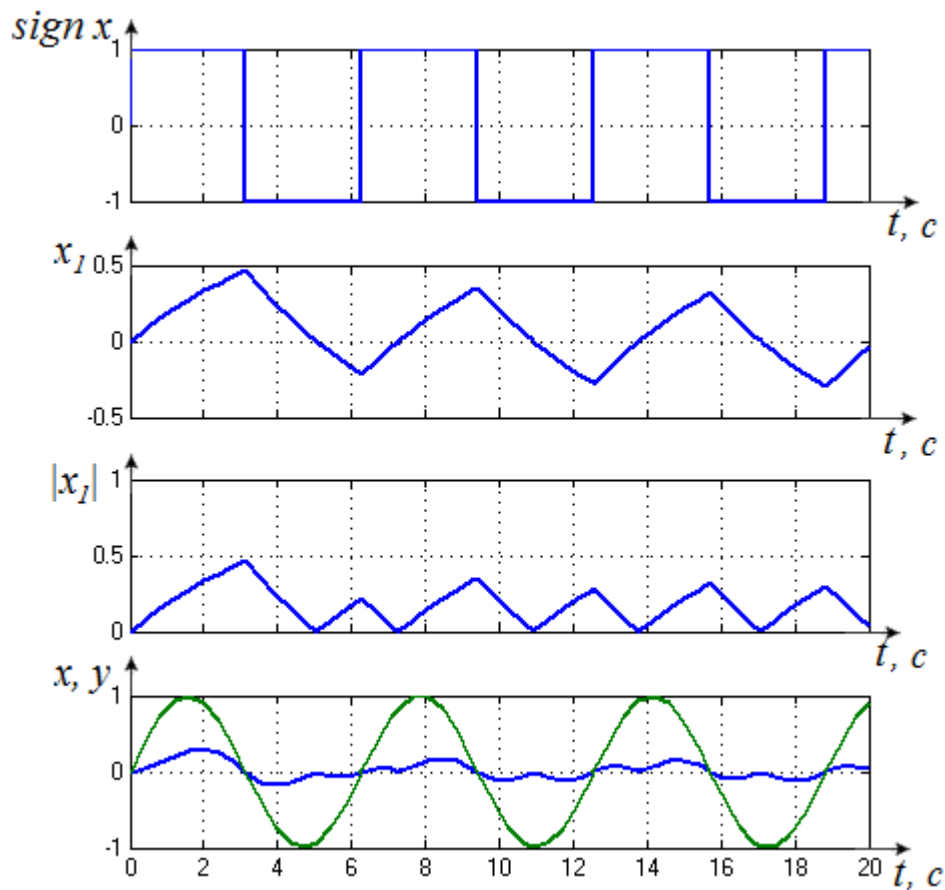


Рисунок 1.7 – Форма сигнала ПКУ с амплитудным подавлением при гармонической линеаризации при $T=5c$

Коэффициенты гармонической линеаризации нелинейного фильтра в данном случае:

$$a = \frac{2}{\pi A} \int_0^{\pi} [|x_1| A \sin(\omega t)] \sin(\omega t) d(\omega t),$$

$$b = \frac{2}{\pi A} \int_0^{\pi} [|x_1| A \sin(\omega t)] \cos(\omega t) d(\omega t).$$

Подробное вычисление коэффициентов гармонической линеаризации нелинейного фильтра приведено в [7]. С учетом коэффициентов a и b эквивалентная амплитудно-фазовая характеристика имеет вид:

$$W(\omega) = \frac{8}{\pi^2 \sqrt{1 + \omega^2 T^2}} \left(1 + \frac{1}{3} e^{-2i \cdot \arctg(\omega T)} \right).$$

На рисунке 1.8 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ рассматриваемого ПКУ с амплитудным подавлением. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют значения постоянной времени фильтра $T = 1c, 10c, \text{ и } 50c$.

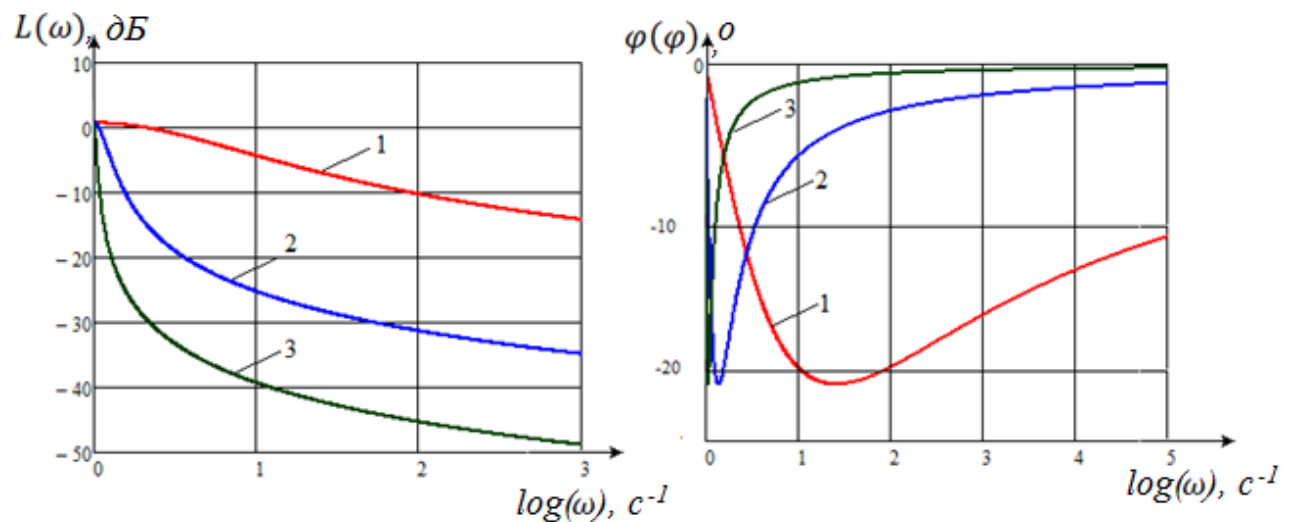


Рисунок 1.8 – Логарифмические частотные характеристики ПКУ с амплитудным подавлением

Из рисунка видно, что чем больше T , тем сильнее подавление амплитуды, а фазовый сдвиг, внесен корректором, не ниже $-20,1^\circ$.

На рисунке 1.9 приведена структурная схема моделирования системы автоматического регулирования для исследования влияния ПКУ на качество САР.

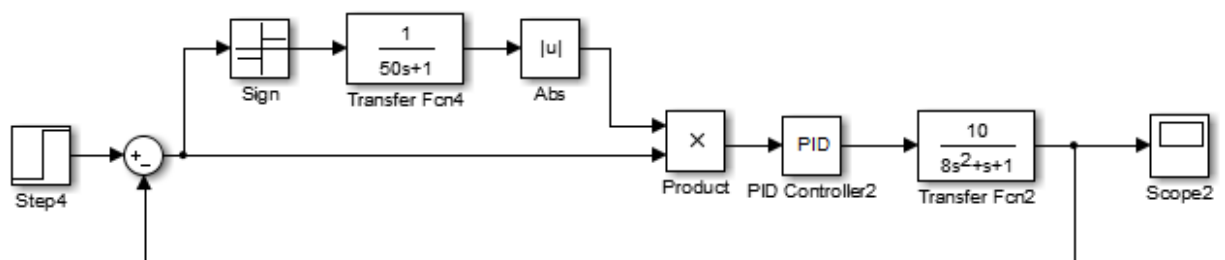


Рисунок 1.9 – Схема моделирования САР с использованием ПКУ с амплитудным каналом

Амплитудный корректор последовательно соединяется с классическим ПИД регулятором. В качестве объекта управления использовано апериодическое звено второго порядка:

$$W_{0y} = \frac{K}{T_1 s^2 + T_2 s + 1}.$$

Настройка коэффициентов ПИД-регулятора ($K_p = 0.8$, $T_i = 0.2$ с, $T_d = 0.03$ с) приведена в разделе 2. Объект управления имеет колебательную

характеристику при параметрах $K = 10$, $T_1 = 8$ с, $T_2 = 1$ с. На вход системы подается ступенчатое воздействие.

На рисунке 1.10 приведены переходные характеристики системы при разных параметрах фильтра корректора. Кривая 1 соответствует переходной характеристике системы регулирования без ПКУ, кривые 2-5 – системы с ПКУ при $T = 1$ с; 10с; 50с; 100с соответственно.

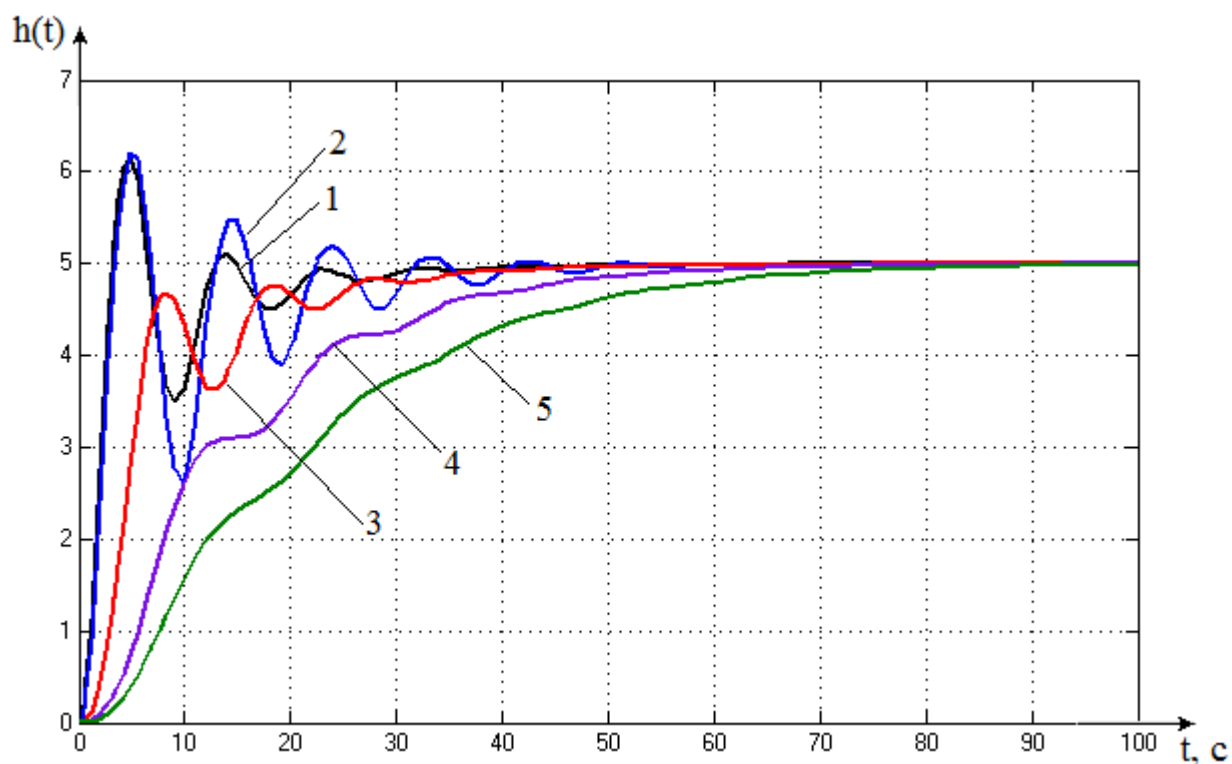


Рисунок 1.10 – Семейство переходных характеристик САУ с ПКУ с амплитудным подавлением

По переходным процессам на рисунке 1.10 можно сделать вывод, что с увеличением значения постоянной времени ПКУ уменьшается величина перерегулирования, увеличивается затухание и уменьшается быстродействие. Таким образом, при увеличении постоянной времени фильтра T корректирующего устройства, переходный процесс из колебательного переходит в апериодический [11]. Сравнительный анализ полученных характеристик по показателям качества приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Показатели качества переходного процесса в САР

Кривая	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	d	η
1	50	22	0,16	4
2	60	22	0,1	12
3	50	0	0,7	0
4	70	0	1	0
5	80	0	1	0

При анализе амплитудных и фазовых частотных характеристик САР с ПКУ с амплитудным подавлением, можно удостовериться, что увеличивается запас устойчивости системы. На рисунке 1.11 показан график ЛАЧХ и ЛФЧХ САР с ПКУ с амплитудным подавлением (кривая 2) при $T=100c$ и САР без ПКУ (кривая 1).

Запас устойчивости по амплитуде системы с ПКУ больше (h_2) чем без ПКУ (h_1) на $\approx 4дБ$.

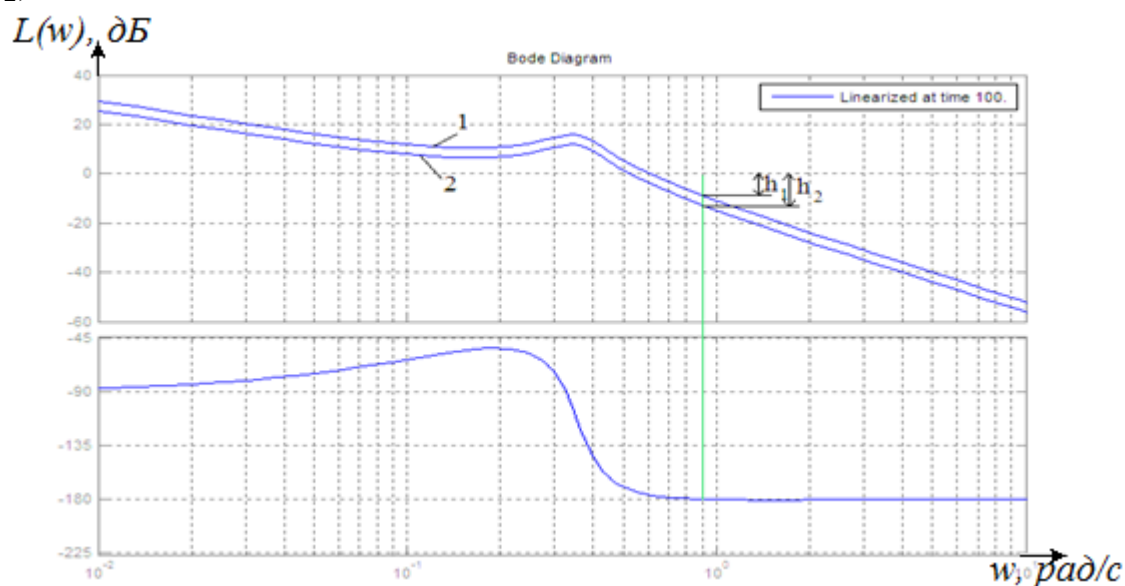


Рисунок 1.11 – ЛАЧХ и ЛФЧХ системы автоматического регулирования

Пусть параметры объекта изменились и стали равными: $K = 1$, $T_1 = 8$, $T_2 = 0c$. В этом случае САР оказалась на границе устойчивости. На рисунке 1.12 кривая 1 соответствует переходной характеристике САР без КУ, кривая 2 – с применением КУ.

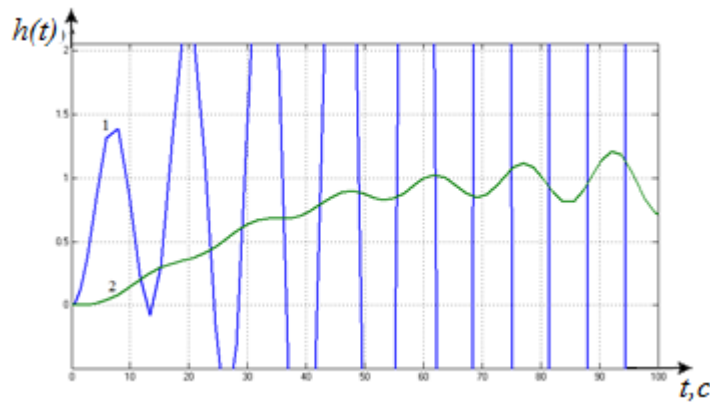


Рисунок 1.12 – Переходные характеристики САР

Анализ показал, что при колебательном режиме САР, ПИД регулятор с данными настроечными параметрами не справляется с управлением. Применение псевдолинейного КУ с амплитудным подавлением в такой ситуации характерно для маленьких значений постоянных времени ОУ. При больших значениях постоянных времени объекта управления САР с ПКУ с амплитудным подавлением не справляется с колебательным режимом и система становится неустойчивой.

Так как применение ПКУ с амплитудным подавлением в условиях, когда САР находится на границе устойчивости, не выводит САР в устойчивое состояние, то в случае, когда САР не устойчива, применение данного корректирующего устройства также не приведет САР к устойчивому состоянию (рисунок 1.13).

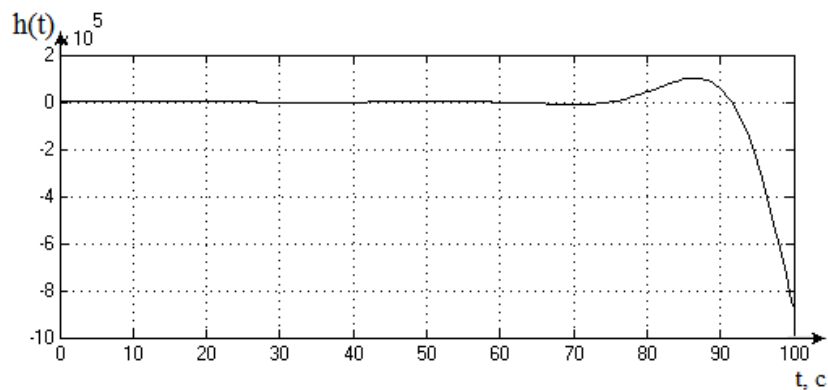


Рисунок 1.13 – Переходная характеристика САР

Таким образом, применение ПКУ с амплитудным подавлением в случаях, когда САР приближается к границе устойчивости нецелесообразно.

1.3.2 Корректирующие устройства с фазовым опережением

Структурная схема псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением приведена на рисунке 1.14.

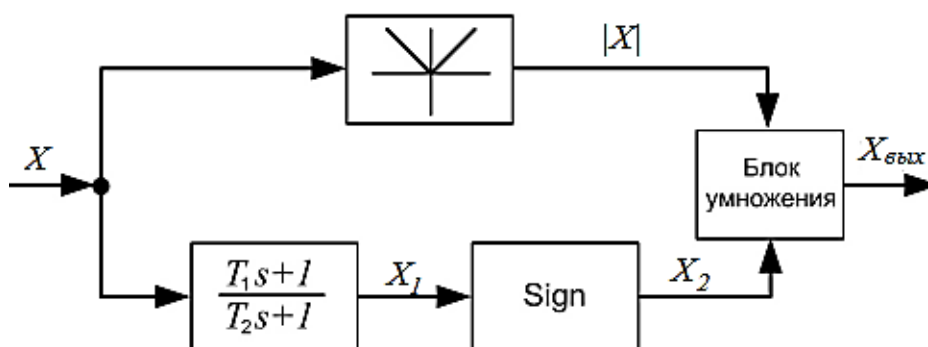


Рисунок 1.14 – Структурная схема ПКУ с фазовым опережением

Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением осуществляет фазовый сдвиг, величина которого зависит от значения постоянных времени T_1 и T_2 . При $T_1 > T_2$ проявляются дифференцирующие свойства звена, и ПКУ в большей мере проявляет свои корректирующие свойства.

Данное псевдолинейное корректирующее устройство применяется для коррекции путем внесения в САР положительного фазового сдвига и тем самым улучшает качество регулирования [12].

Форма сигнала в характерных точках фильтра показана на рисунке 1.15.

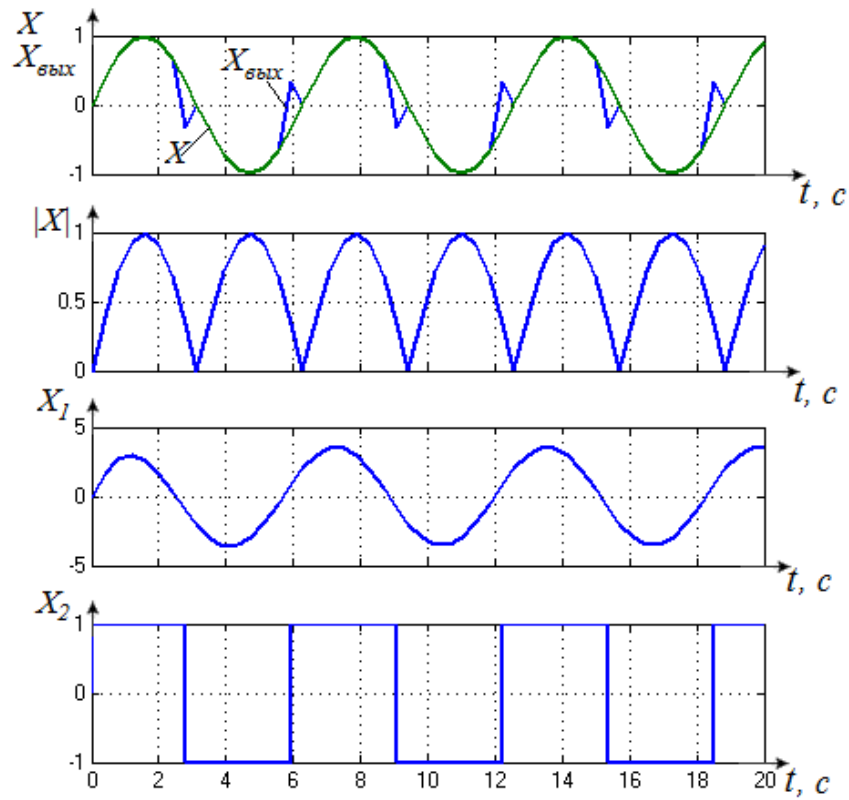


Рисунок 1.15 – Форма сигнала ПКУ с фазовым опережением при гармонической линеаризации при $T_1=5\text{с}$, $T_2=1\text{с}$

Коэффициенты гармонической линеаризации фазового корректора имеют следующий вид [7]:

$$a = \frac{1}{\pi} \cdot \left(1 - 2 \arctg \frac{\omega(T_1 - T_2)}{1 + \omega^2 T_1 T_2} + \sin \left(2 \arctg \frac{\omega(T_1 - T_2)}{1 + \omega^2 T_1 T_2} \right) \right),$$

$$b = \frac{1}{\pi} \cdot \left(1 + \cos \left(2 \arctg \frac{\omega(T_1 - T_2)}{1 + \omega^2 T_1 T_2} \right) \right).$$

Эквивалентная амплитудно-фазо-частотная характеристика ПКУ с фазовым опережением имеет вид:

$$W(\omega) = a + jb.$$

На рисунке 1.16 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ рассматриваемого ПКУ с фазовым опережением. Кривые 1,2 и 3 соответствуют значениям постоянных времени фильтра $T_1 = 2\text{с}$, 5с , и 10с и $T_2 = 1\text{с}$.

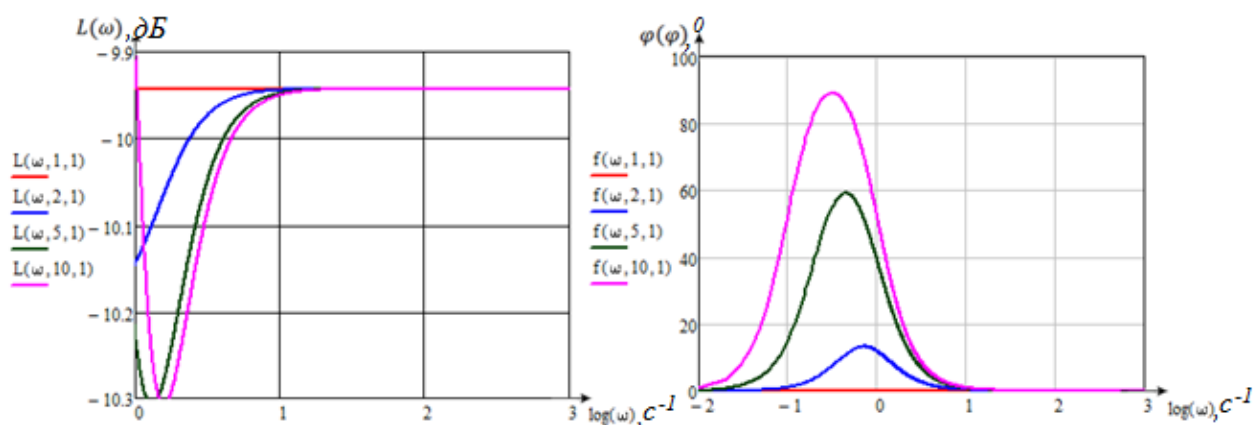


Рисунок 1.16 – Логарифмические частотные характеристики фазового корректора

Логарифмические частотные характеристики показывают, что фазовый корректор не значительно влияет на амплитуду, но вносит при этом положительный фазовый сдвиг до 89° .

Схема моделирования системы автоматического регулирования для исследования влияния ПКУ с фазовым опережением приведена на рисунке 1.17.

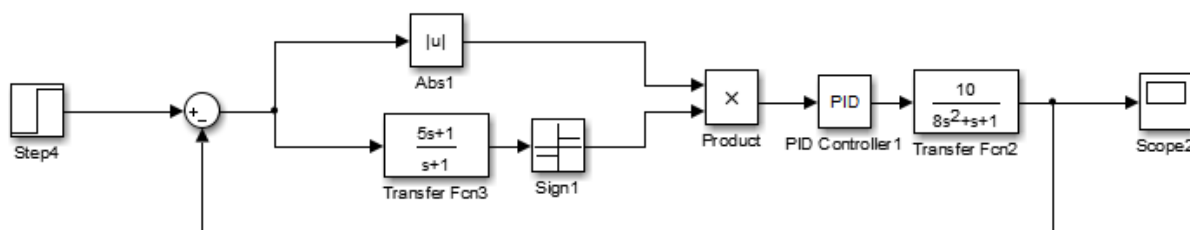


Рисунок 1.17 – Схема моделирования САР с ПКУ с фазовым опережением

Фазовый корректор последовательно соединён с классическим ПИД-регулятором и объектом управления. На вход системы подается ступенчатое воздействие.

На рисунке 1.18 приведены переходные процессы в САР при параметрах ПКУ с фазовым опережением T_1 и T_2 равными 0.1с и 1с (кривая 2), 7с и 1с (кривая 4), 5с и 1с (кривая 3), кривая 1 соответствует переходной характеристике САР без применения ПКУ с фазовым опережением.

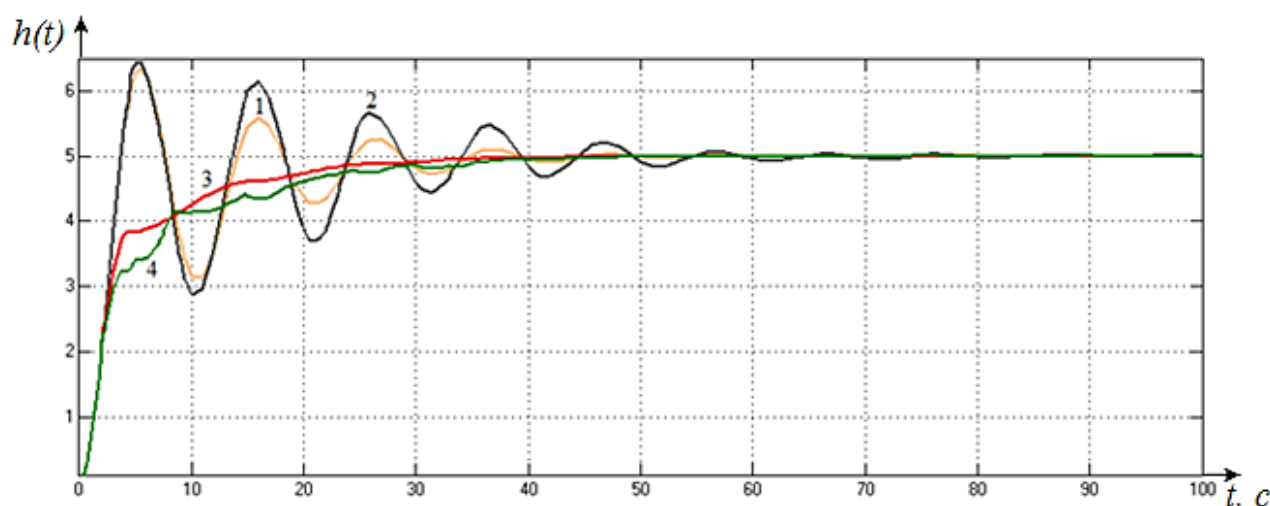


Рисунок 1.18 – Семейство переходных характеристик в САР

Из рисунка 1.18 следует, что если постоянная времени $T_1 > T_2$ более чем в 5 раз, корректирующие свойства звена проявляются в большей мере. В этом случае уменьшается перерегулирования и увеличивается запас устойчивости системы. Сравнительный анализ показателей качества приведен в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Показатели качества переходного процесса в САР

Кривая	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	d	η
1	55	23	0,11	11
2	80	24	0,05	16
3	40	0	1	0
4	40	0	1	0

Пусть параметры объекта изменились и стали равными: $K = 15$, $T_1 = 10c$, $T_2 = 0c$. В этом случае САР оказалась на границе устойчивости и применение ПКУ с фазовым опережением улучшает качество регулирования. При этом уменьшиться перерегулирование в 2 раза, увеличиться запас устойчивости. На рисунке 1.19 кривая 1 соответствует переходной характеристике в САР с применением классического ПИД-регулятора, кривая 2 соответствует переходной характеристике в САР с применением классического ПИД-регулятора дополненным ПКУ с фазовым опережением.

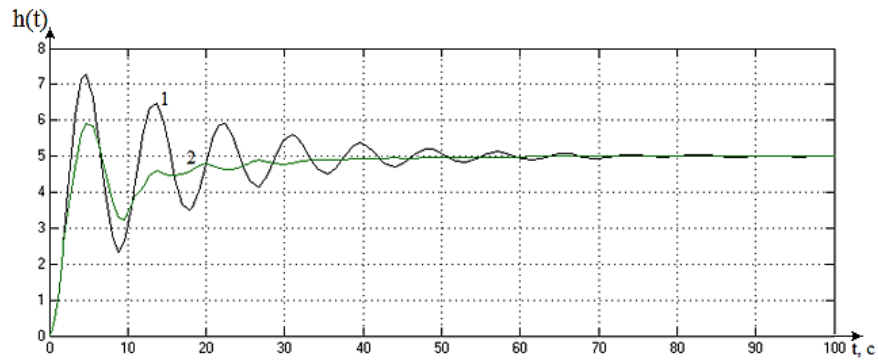


Рисунок 1.19 – Переходные характеристики в САР

Если параметры объекта изменятся так, что система станет неустойчивой, то при введении в САР ПКУ с фазовым опережением не всегда удастся сохранить устойчивость в системе (рисунок 1.20). На рисунке 1.20 кривая 1 соответствует САР с ПИД-регулятором, кривая 2 – с псевдолинейным регулятором с ПКУ с фазовым опережением.

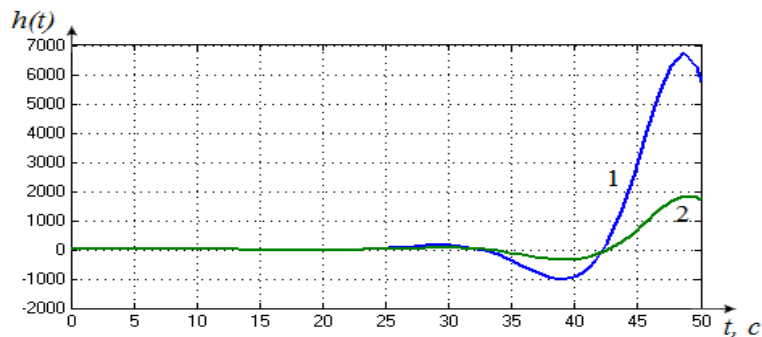


Рисунок 1.20 – Переходная характеристика САР с ПКУ с фазовым опережением

1.3.3 Корректирующее устройство с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Структурная схема псевдолинейного корректирующего устройства с отдельными каналами для амплитуды и фазы представлена на рисунке 1.21.

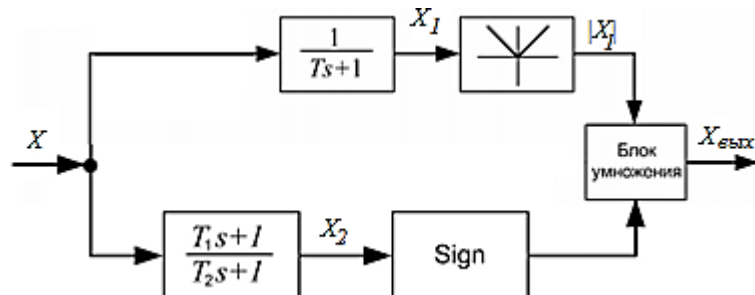


Рисунок 1.21 – Структурная схема ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы

Схема работает следующим образом. Входной сигнал разветвляется и проходит по двум каналам. Верхний канал – амплитудный, служит для формирования амплитудной характеристики, нижний канал – фазовый, формирует фазовую характеристику устройства. Амплитудный канал состоит из фильтра с постоянной времени T и блока определения модуля. В фазовый канал входят фазовый фильтр и блок сигнатуры, на выходе которого сигнал принимает лишь два значения ± 1 независимо от значений амплитуды входного сигнала [13].

Такая схема нелинейной коррекции позволяет получить различные амплитудно-фазовые соотношения, т.е. относительно независимо формировать амплитудную и фазовую характеристику фильтра.

Форма сигнала в характерных точках фильтра показана на рисунке 1.22.

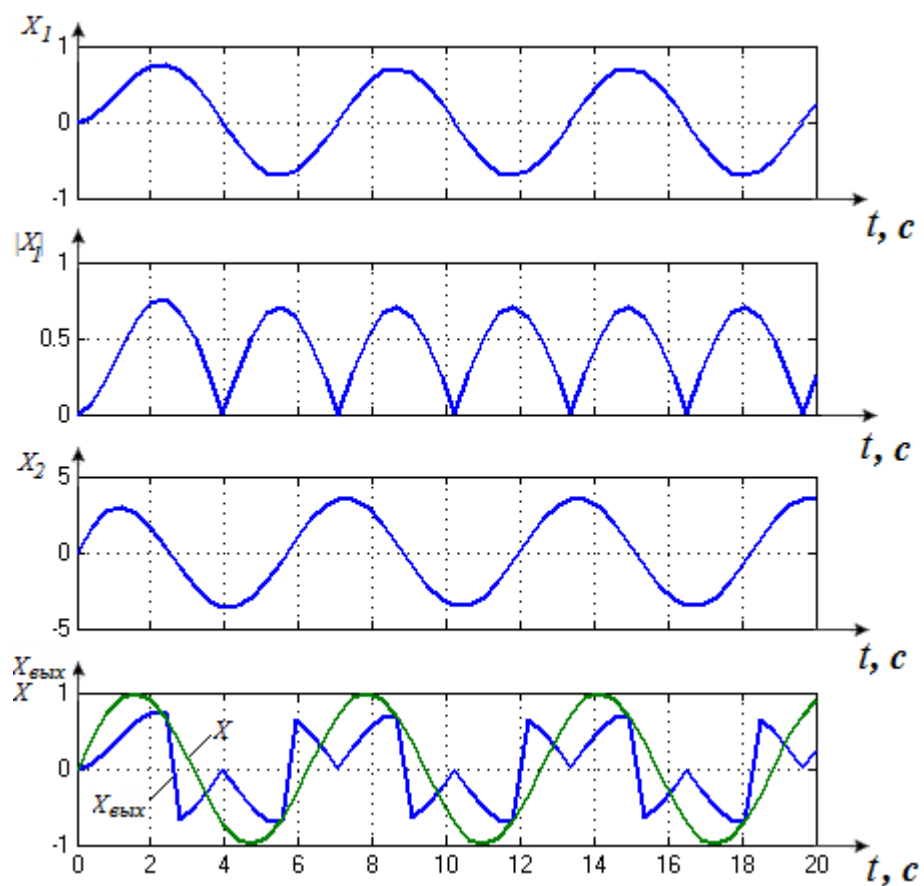


Рисунок 1.22 – Форма сигнала ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы при гармонической линеаризации при $T=1c$, $T_1=5c$, $T_2=1c$

Схема моделирования системы автоматического регулирования с применением ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы приведена на рисунке 1.23.

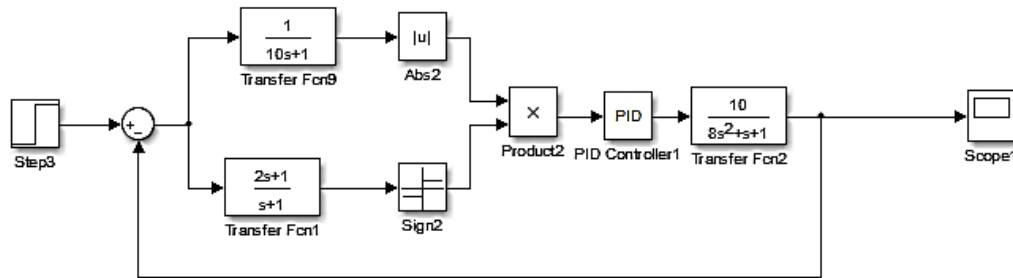


Рисунок 1.23 – Схема моделирования САУ с ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы

На рисунке 1.24 приведены семейство кривых переходных процессов в САУ. Кривая 1 соответствует переходной характеристике САУ с классическим ПИД-регулятором. Кривая 2 – с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы с параметрами $T = 1\text{с}$, $T_1 = 2\text{с}$, $T_2 = 1\text{с}$. Кривая 3 – с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы с параметрами $T = 20\text{с}$, $T_1 = 4\text{с}$, $T_2 = 1\text{с}$. Кривая 4 – с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы с параметрами $T = 100\text{с}$, $T_1 = 1\text{с}$, $T_2 = 0,1\text{с}$. Кривая 5 – с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы с параметрами $T = 150\text{с}$, $T_1 = 1,1\text{с}$, $T_2 = 1\text{с}$.

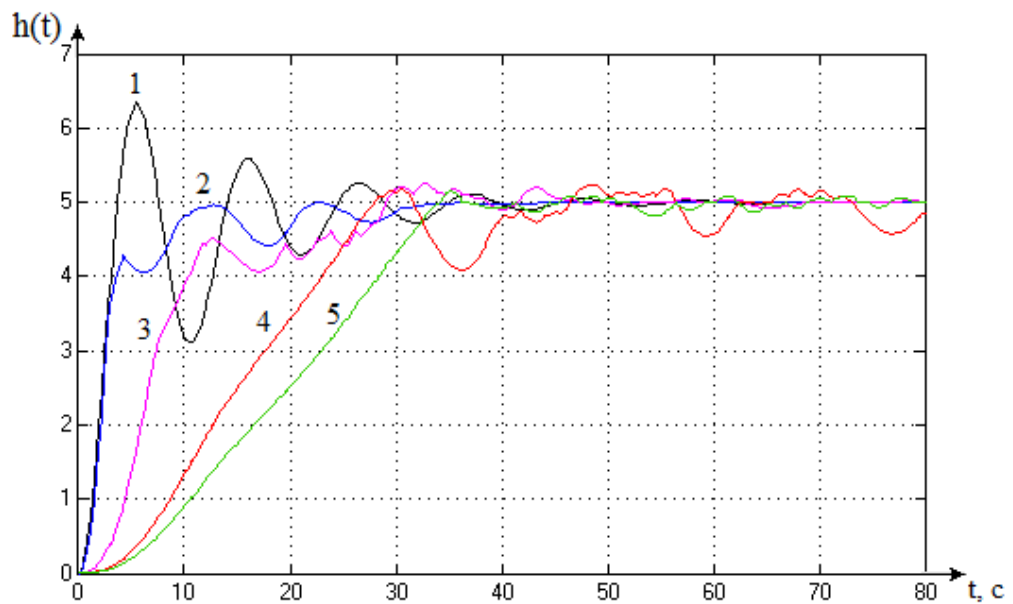


Рисунок 1.24 – Семейство переходных характеристик в САР

Из рисунка 1.24 следует, что кривая 5 с параметрами корректирующего устройства $T = 150\text{с}$, $T_1 = 1,1\text{с}$, $T_2 = 1\text{с}$ наилучшим образом обеспечивает хорошее качество регулирования.

Если САР окажется на границе устойчивости, то применение ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы улучшает качество регулирования (рисунок 1.25, кривая 2), а также обеспечивает повышение запаса устойчивости и быстродействия. Кривая 1 соответствует переходной характеристике в САР с классическим ПИД-регулятором с параметрами $K_p = 0.8$, $T_i = 0.2\text{с}$, $T_d = 0.03\text{с}$.

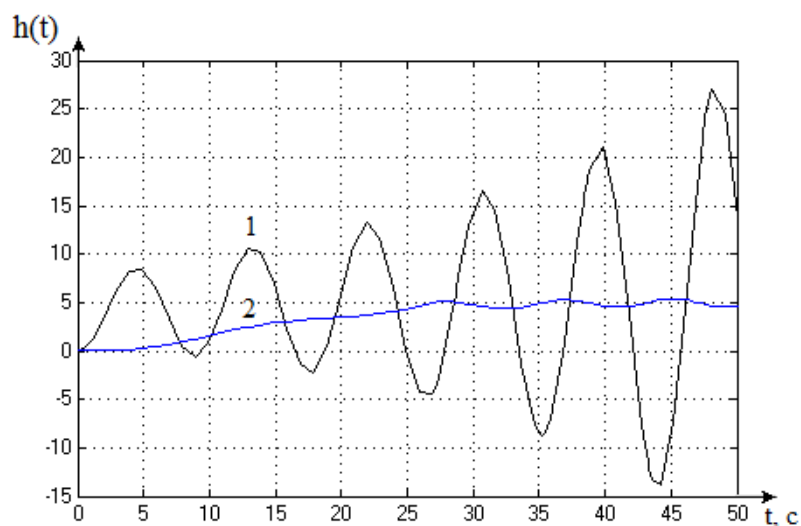


Рисунок 1.25 – Переходные характеристики в САР

Если параметры объекта второго порядка изменятся так, что система автоматического регулирования станет неустойчивой, то САР, при введении ПКУ с раздельными каналами амплитуды и фазы, не всегда позволяет сохранить устойчивость в системе.

Согласно результатам моделирования, ПКУ с раздельными каналами для амплитуды и фазы позволяет улучшить качество переходного процесса, снизить его длительность, уменьшить перерегулирование. Однако с ростом порядка системы эффективность ПКУ снижается, что соответствует результатам, представленным в [14].

1.3.4 Сравнение свойств САР с различными типами ПКУ

Анализ псевдолинейных корректирующих устройств с фазовым опережением, амплитудным подавлением и раздельными каналами для амплитуды и фазы позволяет сделать вывод о том, что подстраивая постоянные времени определенным образом, можно значительно улучшить качество переходного процесса САР, добиться устойчивости и снизить перерегулирование.

Если сравнить все три вида псевдолинейных корректирующих устройств, то можно сделать следующий вывод. ПКУ с амплитудным подавлением увеличивает запас устойчивости, но при этом уменьшает быстродействие системы, ПКУ с раздельными каналами для амплитуды и фазы имеет быстродействие выше, чем ПКУ с амплитудным каналом, но сохраняет некоторые колебания на выходе САР. Наилучший результат показывает ПКУ с фазовым опережением, при его использовании переходный процесс приближен к желаемому виду. Система с ПКУ с фазовым опережением имеет более высокое быстродействие и увеличенный запас устойчивости.

Результат сравнения представлен на рисунке 1.26. Кривая 1 соответствует переходной характеристике ОУ второго порядка с параметрами $K=10$, $T_1=8\text{с}$, $T_2=1\text{с}$. Кривая 2 – САР с классическим ПИД-регулятором. Кривая 3 – САР с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с амплитудным

каналом. Кривая 4 – САР с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с фазовым каналом. Кривая 5 – САР с классическим ПИД-регулятором, дополненным ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы.

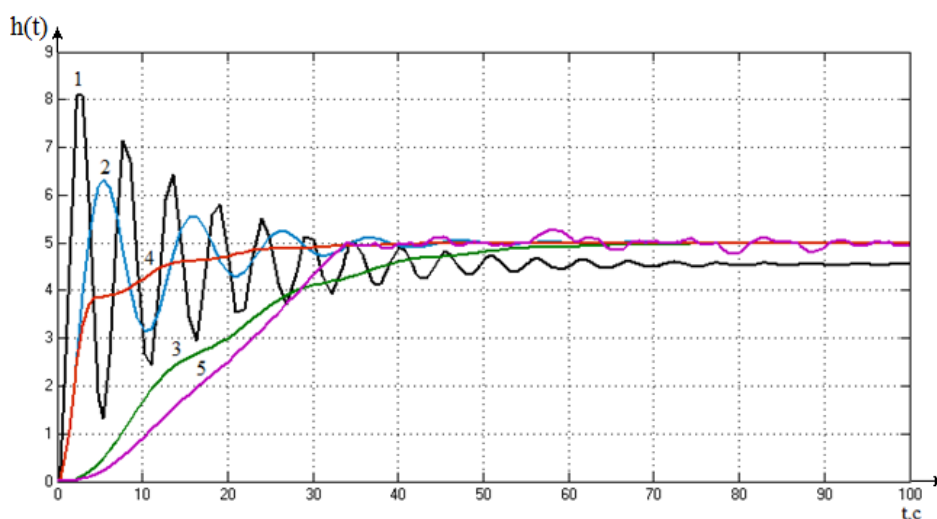


Рисунок 1.26 – Семейство переходных характеристик в САР

В таблице 1.3 приведен сравнительный анализ показателей качества для САР с применением корректоров.

Таблица 1.3 – Показатели качества переходного процесса в САР

Кривая	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	d	η
1	100	60	0,11	30
2	60	24	0,12	11
3	70	0	1	0
4	40	0	1	0
5	35	0	1	0

Таким образом, псевдолинейное корректирующее устройство можно рассматривать как дополнительное средство, участвующее в формировании управляющего воздействия и повышающее качество управления, что соответствует результатам, представленным в [14].

1.3.5 Интегратор Клегла

Интегратор Клегла – это нелинейный интегратор, который сбрасывает сигнал к нулю каждый раз, когда на его входе ноль, и является обычным интегратором между нулевыми перекрестками [15].

Реакция интегратора Клегла $y(t)$ (кривая 2) на синусоидальный входной сигнал $x(t)$ (кривая 1) приведена на рисунке 1.27.

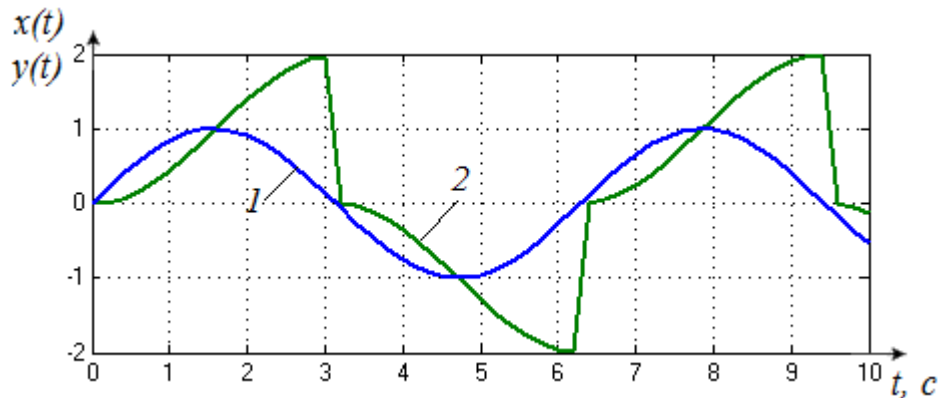


Рисунок 1.27 – Реакция интегратора Клегла на синусоидальный входной сигнал

Эквивалентная амплитудно-фазо-частотная характеристика интегратора Клегла, полученная при гармонической линеаризации имеет вид [16]:

$$D(\omega) = \frac{1.62 e^{-j38.1^\circ}}{\omega}.$$

Амплитудно-фазо-частотные характеристики линейного интегратора (кривая 1) и интегратора Клегла (кривая 2) приведены на рисунке 1.28.

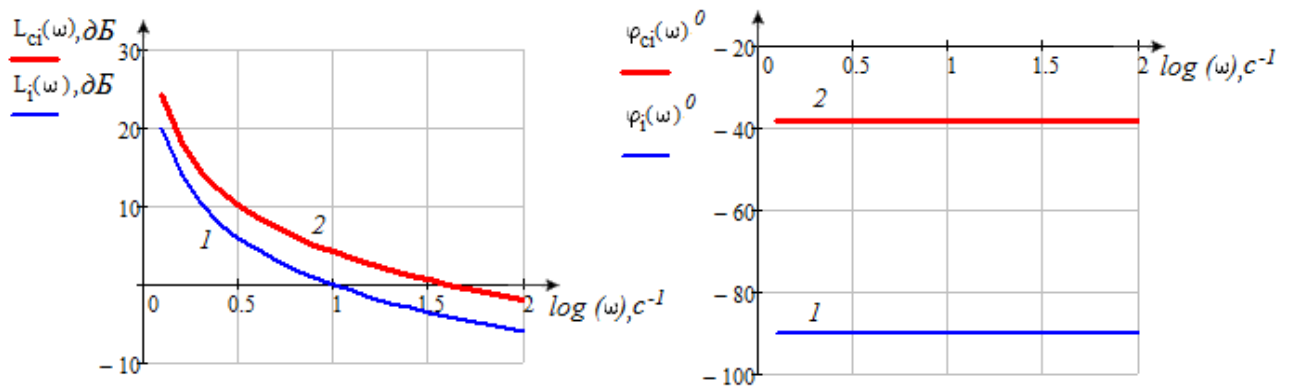


Рисунок 1.28 – АФЧХ линейного и Клегла интеграторов

Таким образом, интегратор Клегла имеет амплитудную характеристику эквивалентную линейному интегратору, а фазу $-38,1^\circ$, вместо обычных -90° , что соответствует результатам, представленным в [17].

Такое преимущество интегратора Клегла, позволяет использовать его в составе ПИД – регулятора вместо линейного интегратора или в комбинации ПИ-регулятора и Клегла интегратора (ПИ + КИ) [12,18,19,20].

1.3.6 Устройства с обратным гистерезисом

Отрицательный гистерезис можно получить, переключая выход при определенных уровнях входного сигнала (рисунок 1.29). Такое звено вносит опережение по фазе для первой гармоники выходного сигнала, но не пропускает сигналы с малыми амплитудами и очень чувствительно к амплитуде и форме входного сигнала и к шумам. Поэтому звенья с обратным гистерезисом используются редко [8].

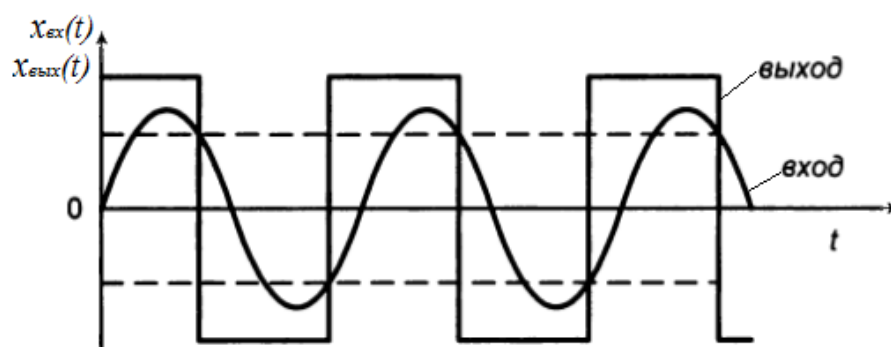


Рисунок 1.29 – Обратный гистерезис

1.3.7 Корректирующие устройства с переключением сигналов

Одной из наиболее простых схем для решения задачи уменьшения инерционности систем является схема переключающего сигнала корректирующего устройства, представленная на рисунке 1.30.

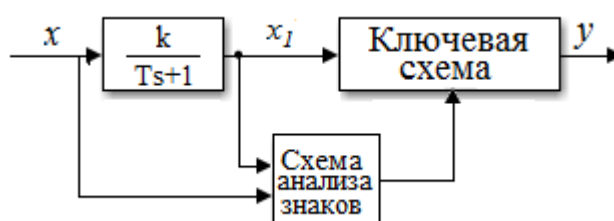


Рисунок 1.30 – Переключающее сигналы корректирующее устройство

Схема работает следующим образом. Сигнал с входа x и выхода звена x_1 поступают на схему сравнения знаков. При нарушении условий устойчивости в системе возникают колебания. Выходной сигнал y в некоторые промежутки времени, определяемые постоянной времени звена, будет при этом иметь знак противоположный знаку входного сигнала x . На этих интервалах времени схема анализаторов знаков вырабатывает управляющий сигнал для ключевой

схемы, которая отключает сигналы с выхода инерционного звена. Особенностью такого КУ является то, что корректирующий сигнал вводится только при возникновении колебаний. При отсутствии колебаний звено ведет себя как обычное линейное звено. Таким образом, интервалы времени, на которых выходной и входной сигнал не совпадает по направлению, выходные цепи звена закорачиваются или разрываются [21].

Реакция данного корректирующего устройства на синусоидальный входной сигнал приведена на рисунке 1.31. Кривая 1 соответствует входному сигналу x , кривая 2 – промежуточному сигналу с фильтра x_1 , кривая 3 – выходному сигналу с корректирующего устройства y .

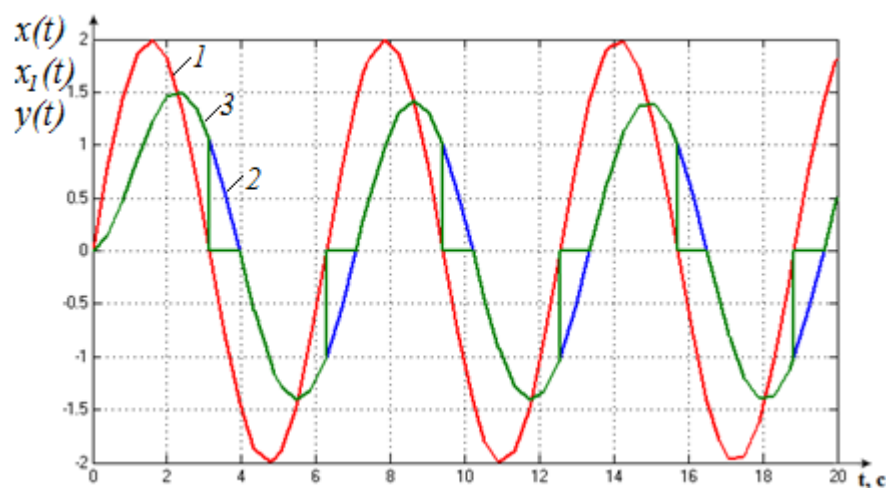


Рисунок 1.31 – Реакция НКУ на синусоидальный входной сигнал

Оценить влияние КУ можно по изменению эквивалентной передаточной функции, полученной методом гармонической линеаризации:

$$q(a) = \frac{k}{\pi} \cdot \frac{\pi + a \cdot T - \arctg(a \cdot T)}{1 + a^2 \cdot T^2}, \quad q'(a) = \frac{k}{\pi} \cdot \frac{a \cdot T \cdot (\arctg(a \cdot T) - \pi)}{1 + a^2 \cdot T^2}.$$

Логарифмические частотные характеристики НКУ приведены на рисунке 1.32. На рисунке 1.32 (а) при изменении коэффициента усиления КУ, на рисунке 1.32 (б) при изменении постоянной времени КУ. Кривая 1 соответствует ЛАЧХ и ФЧХ корректирующего устройства при его параметрах равных $k = 0.1$ и $T = 10$, кривая 2 – $k = 0.5$ и $T = 10$, кривая 3 – $k = 1$ и $T = 10$, кривая 4 – $k = 1$ и $T = 1$, кривая 5 – $k = 1$ и $T = 10$, кривая 6 – $k = 1$ и $T = 50$.

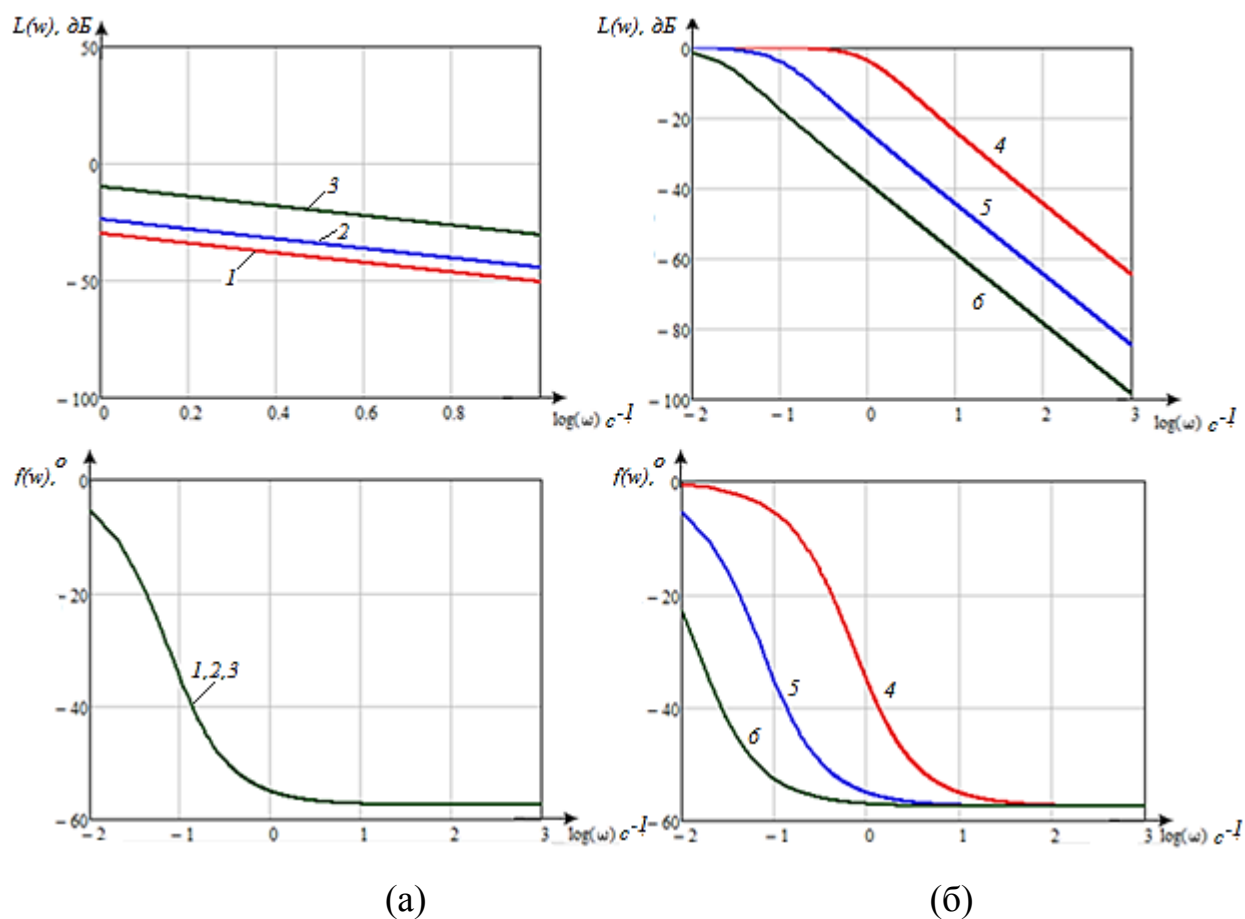


Рисунок 1.32 – Логарифмические частотные характеристики КУ

Таким образом, звено вносит подавление амплитуды, при этом отрицательный фазовый сдвиг не более -60° , что соответствует результатам, представленным в [21].

Проведем исследование влияния переключающего корректирующего устройства на САР. Схема моделирования приведена на рисунке 1.33.

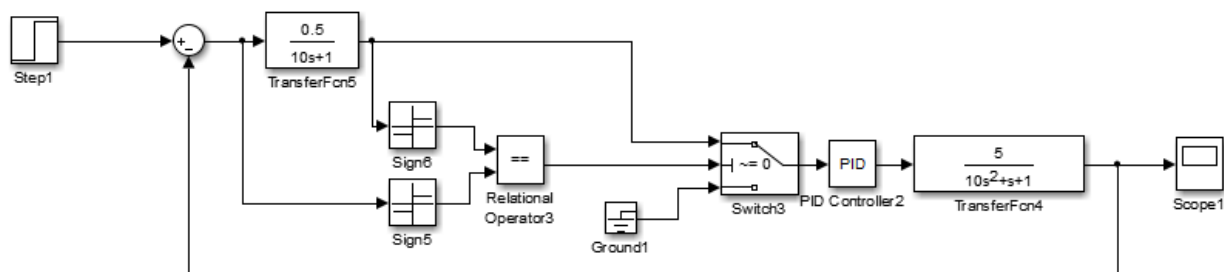


Рисунок 1.33 – Модель САР в среде Simulink

Переходные процессы в САР приведены на рисунке 1.34. Кривая 1 соответствует переходному процессу в САР с корректирующим устройством, кривая 2 – без корректирующего устройства. График (а) с параметрами ОУ

$T_1=10$, $T_2=5$, $K=5$. График (б) с измененными параметрами ОУ $T_1=10$, $T_2=1$, $K=5$.

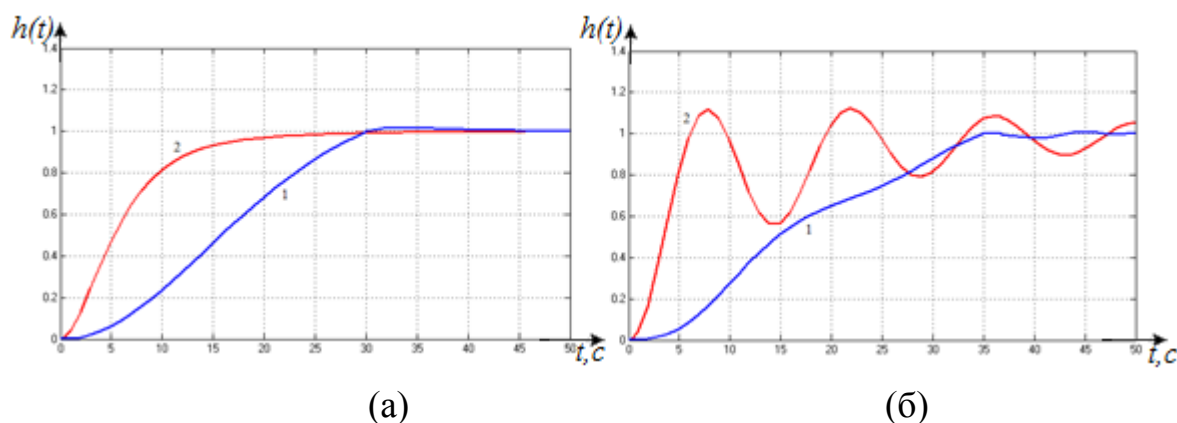


Рисунок 1.34 – Кривые переходного процесса

Как видно из графиков переходного процесса при изменении параметров ОУ, корректирующее устройство позволяет улучшить качество регулирования: увеличивается быстродействие, уменьшается колебательность.

Исследования корректирующих устройств с переключением сигналов также проведены в работах [22, 23]. Результаты исследований показали, что применение переключающих корректирующих устройств в составе САР позволяют уменьшить колебательность, тем самым увеличивая запас устойчивости САР. Недостатком использования таких корректирующих устройств является уменьшение запасов устойчивости по фазе, так как данное устройство вносит отрицательный фазовый сдвиг [23].

1.4 Сравнение качества переходных процессов в САР с различными корректирующими устройствами

Для сравнения переходных процессов в САР с ПИД-регулятором, последовательно соединенным с ПКУ, выбран объект управления второго порядка.

Для проведения сравнения выбраны псевдолинейные корректирующие устройства, так как они позволяют формировать амплитудные и фазовые частотные характеристики практически независимо друг от друга. В качестве

ПКУ исследовались ПКУ с амплитудным подавлением, ПКУ с опережением по фазе, ПКУ с переключением сигналов.

ПКУ с отдельными каналами для амплитуды и фазы не выбрано для исследования в связи со сложностью настройки параметров КУ. Интегратор Клегга и обратный гистерезис не выбраны для исследования, т.к. интегратор Клегга целесообразно использовать в структуре какого-либо другого устройства, например в интегральной составляющей ПИД-регулятора; а обратный гистерезис не пропускает сигналы с малыми амплитудами и очень чувствителен к амплитуде и форме входного сигнала и к шумам.

Основным критерием качества переходных процессов САР выбрана квадратичная интегральная ошибка. На основе данного критерия основывается выбор корректирующего устройства в предложенной адаптивной САР.

Результаты сравнения приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Сравнение переходных процессов в САР с различными ПКУ

Параметры объекта управления	Без ПКУ		ПКУ с фазовым опережением		ПКУ с амплитудным подавлением		ПКУ с переключением сигналов	
	J_1	$\sigma, \%$	J_2	$\sigma, \%$	J_2	$\sigma, \%$	J_2	$\sigma, \%$
$K=1, T_1=8, T_2=5$	2.7	0	3.6	0	22,1	0	29	0
$K=1, T_1=8, T_2=1$	6,5	35	3,05	0	10,17	0	23,7	0
$K=1, T_1=30, T_2=1$	300	–	8,18	36	20,5	8	27,29	0
$K=10, T_1=8, T_2=5$	0.8	48	0,5	27	7,4	5	7,2	13

Переходные процессы в САР с различными ПКУ приведены в приложении А. На рисунке А.1 приведены кривые переходных процессов в САР с ОУ второго порядка с параметрами $K=1, T_1=8, T_2=1$. На рисунке А.2 приведены кривые переходных процессов в САР с ОУ второго порядка с параметрами $K=1, T_1=30, T_2=1$. На рисунке А.3 приведены кривые переходных процессов в САР с ОУ второго порядка с параметрами $K=10, T_1=8, T_2=1$. На рисунках А.1 – А.3 кривая 1 соответствует переходному процессу без ПКУ, кривая 2 – с нечетким ПКУ с фазовым опережением, кривая 3 – с нечетким ПКУ с амплитудным подавлением, кривая 4 – с нечетким ПКУ с переключением сигналов.

Результаты исследования показали, что при нестационарности объекта управления меняется качество переходного процесса в САР. Если в системе нет перерегулирования, то изменять структуру САР не требуется, т.к. классический ПИД-регулятор обеспечивает требуемое качество САР. Если в системе появились колебания, то для улучшения качества регулирования необходимо добавить в структуру САР псевдолинейное корректирующее устройство.

Рекомендации по включению ПКУ:

1. Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением следует подключать в случае, если перерегулирование в системе находится в диапазоне 5 – 20% и квадратичная интегральная ошибка лежит в диапазоне от 0 до 50.

2. Псевдолинейное корректирующее устройство с амплитудным подавлением следует подключать в случае, если перерегулирование в системе больше 20% и квадратичная интегральная ошибка лежит в диапазоне от 0 до 50.

3. Если интегральная квадратичная ошибка больше значения 50, то следует применять ПКУ с переключением сигналов.

Данные рекомендации и числовые значения показателей качества приведены в рамках исследуемого объекта, поэтому для конкретного объекта необходимо проводить дополнительные исследования с учетом полученных в данной работе результатов и рекомендаций.

2 Методы оценки качества регулирования в САР

Оценка качество системы – это, прежде всего, оценка соответствия системы, предъявляемым к ней требованиям. Устойчивость системы автоматического регулирования является необходимым, но не достаточным условием практической пригодности систем. Поэтому при исследовании систем автоматического регулирования необходимо решать задачу обеспечения требуемых показателей качества переходного процесса: быстродействия, колебательности, перерегулирования, характеризующих точность и плавность протекания процесса [2].

Существуют следующие основные методы оценки качества регулирования [2]:

1. Прямые методы оценки качества.
2. Косвенные методы оценки качества:
 - а) корневые методы;
 - б) частотные методы;
 - в) интегральная оценка.

2.1 Прямые методы оценки качества

Показатели качества процесса регулирования, определяемые непосредственно по переходной характеристике $h(t)$, называются прямыми.

К прямым показателям качества относятся [42]:

- время переходного процесса $t_{пп}$;
- перерегулирование σ ;
- время достижения первого максимума t_M ;
- время нарастания переходного процесса t_H ;
- ошибка регулирования $e(t)$;
- степень затухания d ;
- колебательность системы η .

Время переходного процесса $t_{пп}$ – это минимальное время, по истечении которого регулируемая величина остается близкой к установившемуся

значению с заданной точностью. Данная величина определяет быстродействие САР.

Перерегулирование σ – это максимальное отклонение от установившегося значения, выраженное в относительных единицах или процентах:

$$\sigma = \frac{A_{max} - A_{уст}}{A_{уст}} \cdot 100\%.$$

По величине перерегулирования оцениваются запасы устойчивости САР. Перерегулирование 10-20% считается хорошим показателем.

Время нарастания переходного процесса t_H – это время от начала переходного процесса до момента первого пересечения графиком линии установившегося значения.

Критерием точности может служить максимум ошибки регулирования:

$$e_{max} = \max |e(t)|.$$

Степень затухания определяется следующей формулой:

$$d = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

где A_3 и A_1 – соседние максимальные отклонения (амплитуды) одного знака.

Степень затухания колебаний считается удовлетворительной, если $d=0,75 \dots 0,95$ [43].

Колебательность системы η можно определить числом переходов N величины $y(t)$ через установившееся значение на интервале $t_{пп}$ [43].

Колебательность и степень затухания являются показателями запаса устойчивости.

Графическая интерпретация прямых показателей качества приведена на рисунке 2.1.

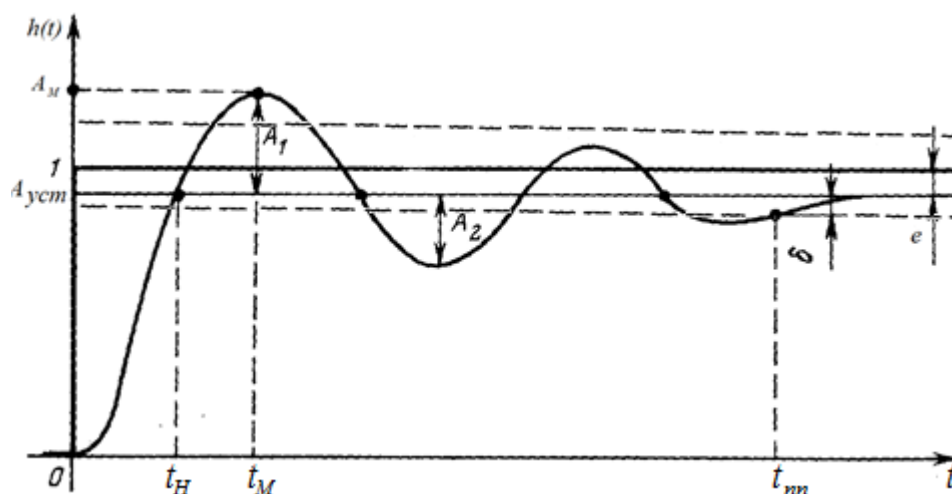


Рисунок 2.1 – Прямые показатели качества

2.2 Косвенные методы оценки качества

2.2.1 Корневые методы

Поскольку корни передаточной функции однозначно определяют вид переходного процесса, их можно использовать для оценки запаса устойчивости и быстродействия.

Для определения корневых показателей качества используется характеристическое уравнение передаточной функции замкнутой САР. Плоскость корней характеризуется параметрами:

- 1) η – степень устойчивости;
- 2) m –колебательность.

Степень устойчивости η равна расстоянию от мнимой оси до ближайшего корня или пары комплексно сопряженных корней (рисунок 2.2):

$$\eta = \operatorname{Re}(p_i), \operatorname{Re}(p_i) < 0.$$

Колебательность m характеризует колебательность переходного процесса и величину перерегулирования (рисунок 2.2):

$$m = \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\operatorname{Im}(p_i)}{\operatorname{Re}(p_i)}.$$

Колебательность обычно имеет значение 1 - 2, но в отдельных случаях допускается до 3.

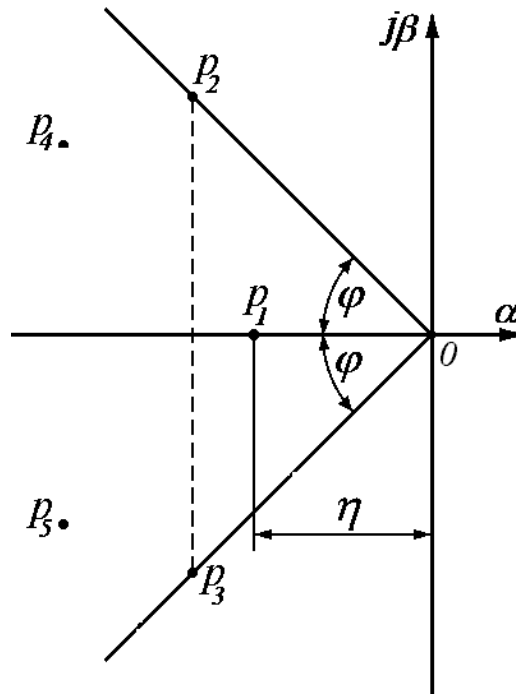


Рисунок 2.2 – Корневые показатели качества

2.2.2 Частотные методы

Под частотными критериями качества следует понимать такие критерии, которые не рассматривают вида переходного процесса, а базируются на некоторых частотных свойствах системы. Частотные критерии разработаны в отношении оценки запаса устойчивости замкнутой системы.

К частотным показателям относят следующие показатели:

- колебательность M ;
- запас устойчивости по амплитуде A ;
- запас устойчивости по фазе φ .

Колебательность M равна отношению максимального значения A_{max} АЧХ замкнутой системы, которое имеет место при резонансной частоте, к ее начальному значению $A(0)$ (рисунок 2.3) [44]:

$$M = \frac{A_{max}(\omega_p)}{A(0)}.$$

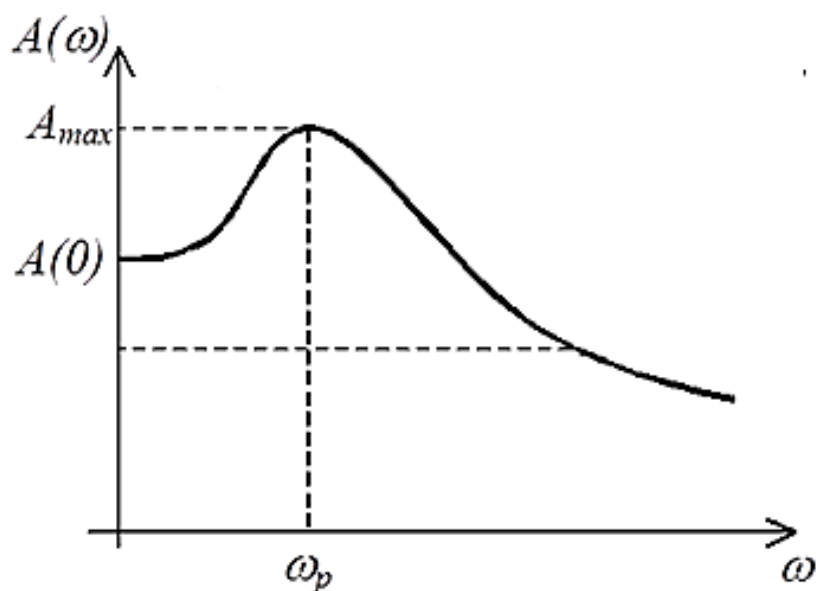


Рисунок 2.3 – АЧХ замкнутой системы

Запасы устойчивости по амплитуде и по фазе характеризуют близость системы к границе устойчивости. Данные показатели определяются по логарифмическим фазо-частотным характеристикам разомкнутой САР (рисунок 2.4). Чем дальше система от границы устойчивости, тем она лучше [44]. В качественных системах запасы устойчивости должны составлять:

$$A=6...20 \text{ дБ}, \varphi=30...60^\circ.$$

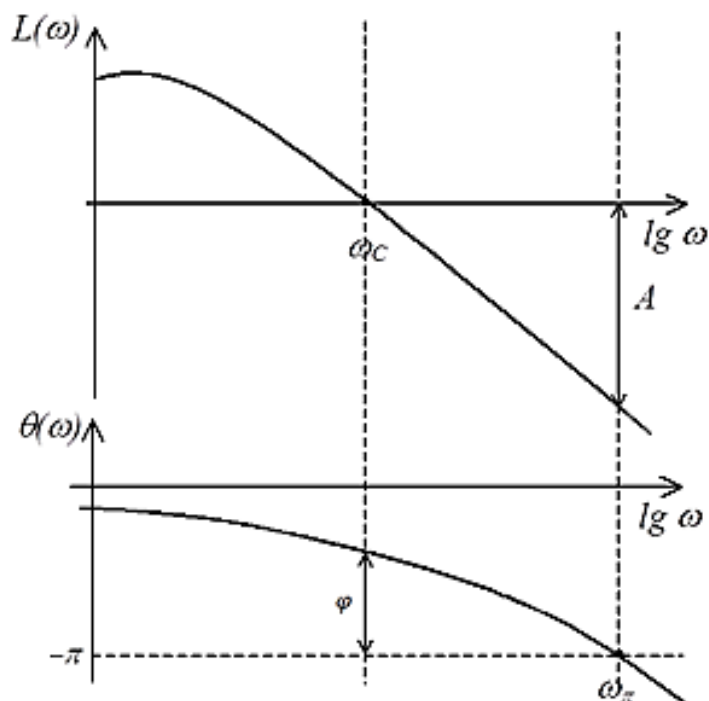


Рисунок 2.4 – ЛАЧХ разомкнутой САР

2.2.3 Интегральная оценка

Интегральные критерии оценивают обобщенные свойства САР, такие как точность, запас устойчивости, быстродействие.

Целью использования интегральных критериев является возможность получить общую оценку быстродействия и отклонения регулируемой величины от установившегося значения. Широко используются линейные и квадратичные интегральные оценки.

Линейная интегральная оценка: $J_1 = \int_0^{\infty} e(t)dt$.

Чем меньше значение J_1 , тем быстрее затухает переходный процесс и тем меньше величина отклонения, т. е. тем выше качество системы.

Квадратичная интегральная оценка: $J_2 = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$.

Показатель J_2 тем меньше, чем быстрее затухает переходный процесс и чем меньше отклонение. Однако и квадратичная оценка не всегда является удачной, так как при такой оценке качества сильно колебательный процесс с большим перерегулированием может оказаться лучшим, чем монотонный, в случаях, когда переходный процесс затухает очень медленно[45].

Таким образом, выбор критериев качества регулирования зависит от цели, для которой используется регулятор. Получить систему автоматического регулирования с наилучшим качеством управлением можно только при выборе совокупности показателей качества. В данной работе в качестве основных показателей для оценки качества переходного процесса в САР выбраны время переходного процесса, перерегулирование, запасы устойчивости по амплитуде и фазе, а также квадратичная интегральная оценка. Линейная интегральная оценка не используется в связи с тем, что данный критерий применим только для монотонных процессов.

3 Методы настройки ПИД-регулятора

Автоматический регулятор — это средство автоматизации, получающее, усиливающее и преобразующее сигнал отклонения регулируемой величины и целенаправленно воздействующее на объект регулирования. Он обеспечивает поддержание заданного значения регулируемой величины или изменение ее значения по заданному закону.

Параметры настройки регуляторов должны быть выбраны таким образом, чтобы в замкнутой САР был обеспечен заданный запас устойчивости и оптимальные (требуемые) показатели качества регулирования. Поскольку в теории автоматического регулирования запас устойчивости может быть оценен по-разному, в инженерных расчетах применяются несколько методов определения оптимальных параметров настройки регуляторов.

Классический ПИД-регулятор характеризуется следующим уравнением

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + T_i \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt},$$

где P — пропорциональная составляющая, I — интегральная составляющая, D — дифференциальная составляющая.

Большинство методов настройки ПИД-регуляторов используют модифицированную форму регулятора, в которой интегральная и дифференциальная составляющие умножаются на пропорциональный коэффициент:

$$u(t) = K_p \cdot [e(t) + T_i \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt}].$$

3.1 Методы настройки регуляторов

Первую методику расчёта параметров ПИД-регуляторов предложили Зиглер и Никольс в 1942 году [24]. Данная методика часто используется на практике, так как является очень простой, хотя в силу этого даёт не очень хорошие результаты.

После расчёта параметров регулятора обычно требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования. Для этого используется ряд правил, хорошо обоснованных теоретически. Они сводятся к следующему [25, 39]:

- увеличение пропорционального коэффициента увеличивает быстродействие и снижает запас устойчивости;
- с уменьшением интегральной составляющей ошибка регулирования с течением времени уменьшается быстрее;
- уменьшение постоянной интегрирования уменьшает запас устойчивости;
- увеличение дифференциальной составляющей увеличивает запас устойчивости и быстродействие.

Перечисленные правила применяются также для регуляторов, использующих методы экспертных систем и нечёткой логики.

Зиглер и Никольс предложили два метода настройки ПИД-регуляторов [24]. Первый основан на параметрах отклика объекта на единичный скачок, второй – на частотных характеристиках объекта управления. Метод Зиглера-Никольса никак не учитывает требования к запасу устойчивости системы, что является его недостатком [26].

В отличие от Зиглера и Никольса, Chien, Hrones и Reswick (CHR) [27] использовали критерий максимальной скорости нарастания при отсутствии перерегулирования или при наличии не более чем 20% перерегулирования. Такой критерий позволяет получить больший запас устойчивости, чем в методе Зиглера-Никольса.

Также существуют следующие методы настройки параметров регулятора:

- по переходным характеристикам [28];
- по номограммам [29];
- расчет настроек по частотным характеристикам объекта [30, 31, 35];

- метод оптимального модуля [32,33];
- методы расчета на заданный запас устойчивости [34];
- корневой метод настройки [36, 37];
- экспериментальные методы (затухающих колебаний, незатухающих колебаний) [37];
- метод AMIGO [38,40];
- тангенциальный метод [41].

Большинство перечисленных методов предназначены для настройки коэффициентов регулятора в САУ с объектом запаздывания (по номограммам, метод AMIGO, метод оптимального модуля и др.).

3.2 Настройка ПИД-регулятора

Для выбора методов настройки регулятора проведем исследование методов настройки коэффициентов регулятора на примере САУ с объектом второго порядка без запаздывания.

Передаточная функция объекта второго порядка имеет вид:

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

Параметры объекта управления имеют следующие параметры:

$$K = 1, T_1 = 8с, T_2 = 5с .$$

Схема моделирования системы автоматического регулирования с ОУ второго порядка приведена на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема моделирования САУ с ОУ второго порядка

В таблице 3.1 приведены коэффициенты ПИД-регулятора, рассчитанные различными методами. На рисунке 2.2 приведено семейство переходных процессов в САУ с различными настройками регулятора. Кривая 1 соответствует переходному процессу в САУ с настройкой ПИД-регулятора по методу Зиглера-Никольса, кривая 2 – по методу CHR, кривая 3 – ручная

настройка, кривая 4 – тангенциальный метод, кривая 5 – метод незатухающих колебаний, кривая 6 – метод затухающих колебаний.

Таблица 3.1 – Настроечные коэффициенты ПИД-регулятора

	Метод Зиглера-Никольса	Метод CHR	Тангенциальный метод	Метод затухающих колебаний	Метод незатухающих колебаний	Ручная настройка
K_p	9.6	4.8	12.228	2	3	0.8
T_i	0.077	0.172	1.65	0.333	0.83	0.2
T_d	0.043	0.086	0.413	1.333	0.207	0.03

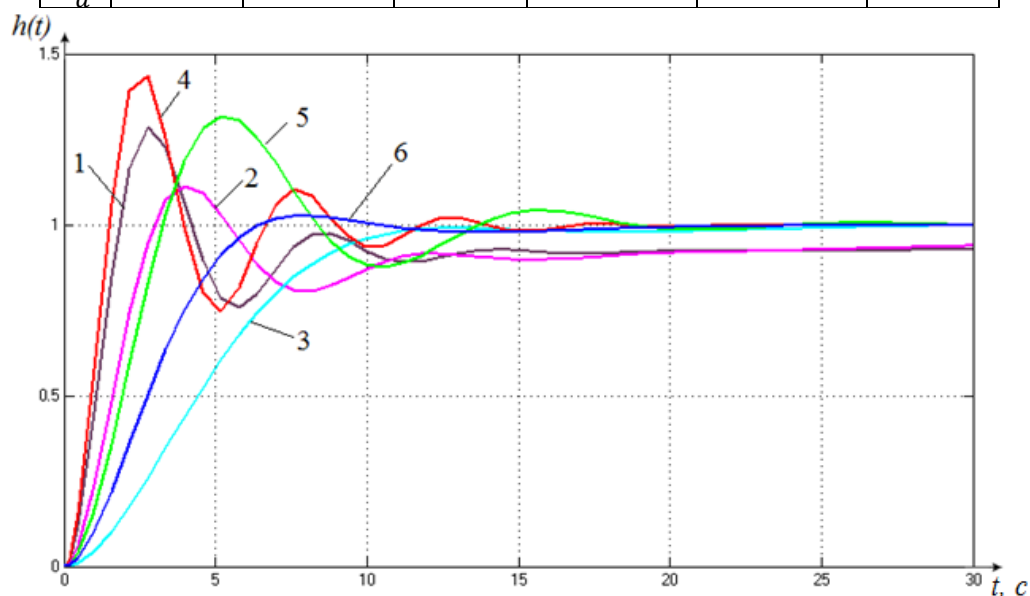


Рисунок 3.2 – Семейство кривых переходных процессов в САР

Сравнительный анализ характеристик по показателям качества приведен в таблице 3.2. На рисунке 3.3 приведены логарифмические частотные характеристики соответствующих САР.

Таблица 3.2 – Показатели качества переходного процесса в САР

Метод настройки	$t_{\text{пв}}, \text{с}$	$\sigma, \%$	d	$\Delta\varphi, ^\circ$	J_2
1 – Метод Циглер-Никольса	18	28,8	0,233	23	0,823
2 – Метод CHR	13	12	1	37	1,023
3 – Ручная подстройка	10	0	1	76	2,777
4 – Тангенциальный метод	12	48,4	0,236	30	0,55
5 – Метод незатухающих колебаний	16	33,4	0,210	21	1,24
6 – Метод затухающих колебаний	10	7	1	59	1,55

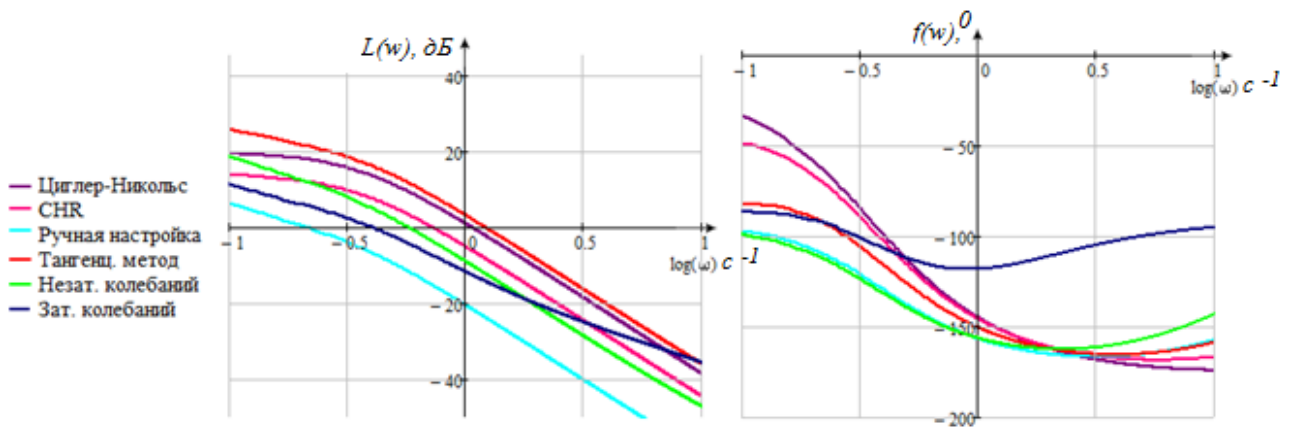


Рисунок 3.3 – Логарифмические частотные характеристики

Результаты исследований различных методов настройки регуляторов и их анализ показал, что самый простой метод Зиглера и Никольса наряду простотой реализации дает плохой показатель запаса устойчивости по фазе, тангенциальный метод характеризуется большим перерегулированием. Наилучший результат получен при настройке регулятора методом затухающих колебаний. Недостатком использования методов экспериментальной подстройки является получение слишком больших показателей пропорционального коэффициента регулятора, который необходимо в ручную уменьшать в несколько раз.

Таким образом, оптимальные показатели качества получены при применении метода затухающих колебаний с ручной коррекцией коэффициентов. Использование данного метода по сравнению с другими исследованными методами позволило получить наибольший запас устойчивости по фазе, уменьшить перерегулирование до 0%. Увеличение квадратичной интегральной ошибки в данном случае (при $\sigma = 0\%$) говорит о том, что переходный процесс в САР стал апериодическим, и в системе снизилось быстродействие.

4 Анализ принципов построения нечетких регуляторов

4.1 Основные понятия нечеткой логики

Как правило, система управления состоит из объекта управления (ОУ), и устройства управления (УУ), необходимого для выработки управляющего воздействия на объект. В данной работе особый интерес уделяется способам выработки управляющих воздействий на базе нечеткой логики.

Понятие «нечеткая логика» введено математиком Л.А. Заде (1965г.), который предложил теорию «нечетких множеств», на основе которых можно строить нечеткие аналогии всех математических понятий и создать необходимый аппарат для моделирования человеческих рассуждений и человеческого способа решения задач [46].

Человек использует нечеткие множества для оценки и сравнения физических величин, состояний объектов и систем на приближенном, качественном уровне [46]. Так, например, любой человек может оценить величину скорости движения автомобиля не прибегая к числовым значениям, а оперируя лишь собственными ощущениями: маленькая, средняя, большая, очень большая и т.д.

Такие понятия как «средняя» и «большая» скорости являются нечеткими, субъективными, и зависят только от вложенного смысла. Поэтому с такими оценками нельзя проводить арифметические действия. Важным условием при создании искусственного интеллекта является перевод нечетких рассуждений человека на язык, понятный вычислительной машине.

Формализация качественных оценок может осуществляется на основе теории нечетких множеств, описанной в [47, 48]. Основными понятиями, которые используются в дальнейшем для описания нечеткой системы, являются:

1. Лингвистическая переменная.
2. Функция принадлежности.
3. Терм.

4. Фаззификация.
5. Дефаззификация.
6. База правил.

Лингвистической называется переменная, принимающая значения из множества слов или словосочетаний некоторого естественного или искусственного языка [49].

Функция принадлежности нечёткого множества представляет степень принадлежности каждого члена пространства к данному нечёткому множеству.

Множество допустимых значений лингвистической переменной называется терм-множеством [49].

Пример 1. Лингвистическая переменная – клапан, соответствующий терм – «открыт», «открыт мало», «открыт много», «закрыт», «закрыт много» и т.д.

Структурная схема системы автоматического регулирования на базе нечеткой логики приведена на рисунке 4.1.

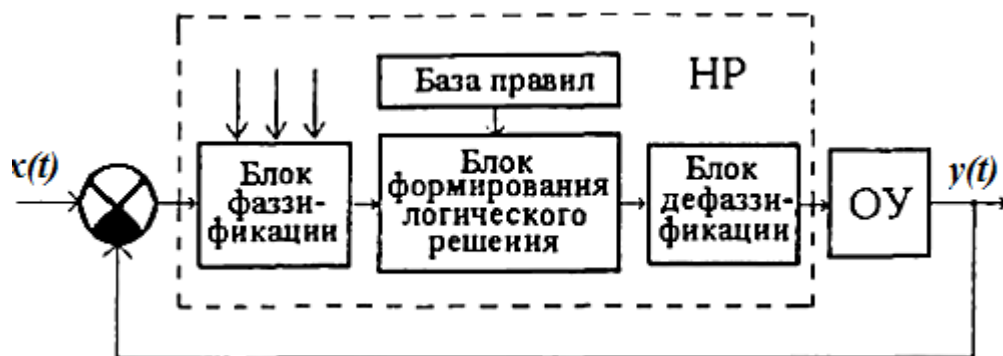


Рисунок 4.1 – Структурная схема нечеткого регулятора

Нечеткий регулятор (фаззи-регулятор) включает в себя три основных блока – блок фаззификации, блок формирования логического решения, блок дефаззификации [46].

На этапе фаззификации происходит перевод из четкого значения некоторого параметра в нечеткое значение некоторой лингвистической переменной. Для осуществления такого перехода необходима функция принадлежности, задающая конкретную лингвистическую переменную [50].

Таким образом, такие лингвистические переменные как «ошибка регулирования» или «скорость изменения системы», качественно характеризуются такими терм-множествами как «отрицательная», «нулевая», «положительная». Пример работы фаззификатора приведен на рисунке 4.2.

Пример 2. Если ошибка регулирования $E = 4$, то с вероятностью 75% она будет «Большая», с вероятностью 25% – «Средняя», и на 0% – «Маленькая».

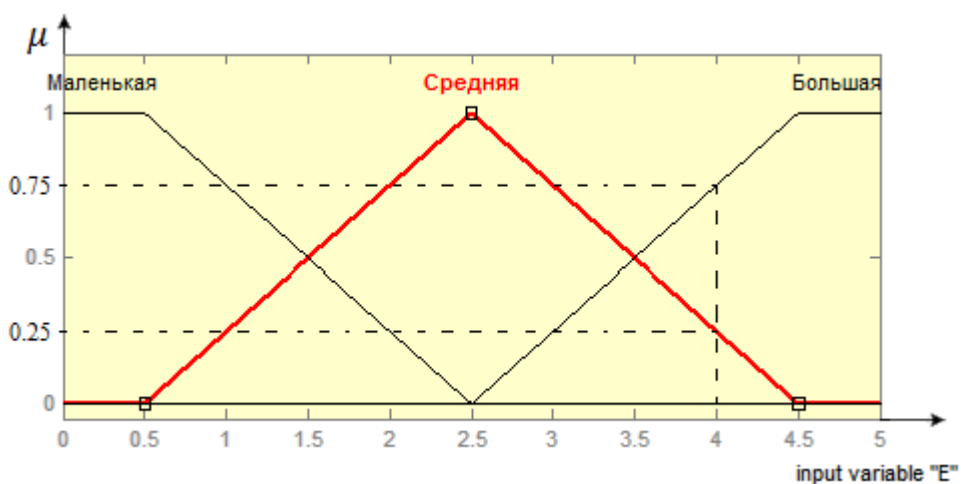


Рисунок 4.2 – Принцип работы фаззификатора

Блок правил представляет собой экспертную систему, которая на основании анализа полученных в фаззификаторе лингвистических значений входных переменных, определяет набор лингвистических значений выходных переменных fuzzy-регулятора. Блок правил строится на основе набора интуитивно понятных лингвистических правил для каждого сочетания лингвистических переменных[51]. Правила имеют вид типа «ЕСЛИ-ТО».

Пример базы правил для лингвистической переменной ошибки регулирования E :

- ЕСЛИ E «большая», ТО U (управляющее воздействие) «большое»,
- ЕСЛИ E «маленькая», ТО U (управляющее воздействие) «маленькое»,
- ЕСЛИ E «средняя», ТО U (управляющее воздействие) «среднее».

Следующим этапом является формирование вывода нечеткого регулятора, т.е. дефаззификация. Дефаззификация (от англ. defuzzification) это преобразование нечеткого множества в четкое число [52]. Для выполнения этой операции производится выбор четкого числа, соответствующего максимуму

функции принадлежности [53]. Однако данный способ пригоден лишь для одноэкстремальными функций принадлежности. Для многоэкстремальных функций принадлежности в литературе по теории нечетких множеств операцию дефаззификации предлагается выполнять методами центра тяжести [52].

Исходя из приведенной выше базы правил и рисунка 4.2, дефаззификация методом центра тяжести, выходной переменной U (рисунок 4.3), будет выглядеть следующим образом:

$$U = \frac{0,25 \cdot 2 + 0,75 \cdot 8}{0,25 + 0,75} = 6,5.$$

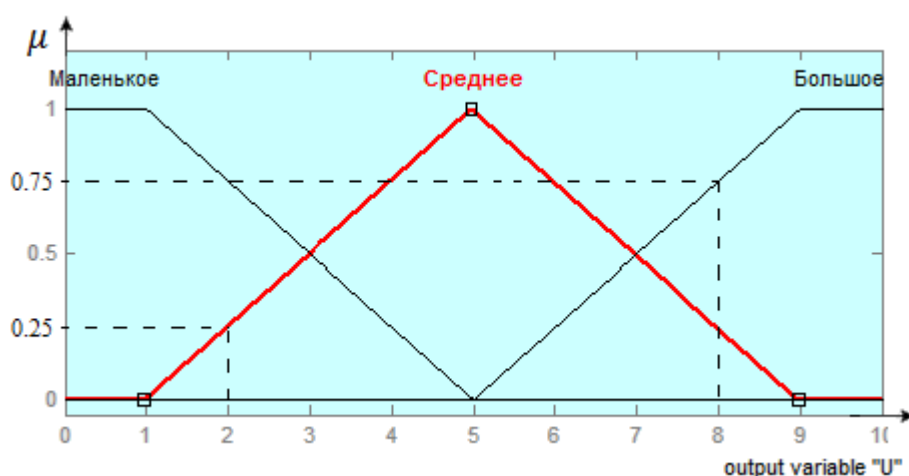


Рисунок 4.3 – Процесс дефаззификации

Таким образом, использование нечеткой логики в системах управления позволяет уменьшить вмешательство оператора в процесс управления и, следовательно, позволяет разработать новые методики управления, более адаптированные к промышленной среде [54].

Можно выявить три основные особенности нечеткого управления [55]:

1. База правил нечеткого управления ЕСЛИ-ТО является логической, т.е. использование правил осуществляется через механизм логических выводов. Логическое управление означает, что логику управления эксперта легко представить, и разнообразным предпосылкам можно поставить в соответствие некоторое действие.

2. Параллельное управление: возможность успешно справляться со всем многообразием целей и даже с взаимно противоречащими целями

управления, вследствие того что имеются многочисленные частные правила, тогда как в традиционном управлении задана только одна формула.

3. появляется возможность организовать управление в форме диалога с оператором, поскольку правила управления записываются словами в виде выражений ЕСЛИ-ТО.

4.1.1 Влияние метода фаззификации на переходный процесс

Для реализации систем на базе нечетких правил разработано множество алгоритмов нечеткого вывода. Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефазификации.

В работе [56, 57] описаны модели нечеткого вывода Мамдани, Сугено, Ларсена, Цукамото. Наиболее распространенным алгоритмом нечеткого вывода является алгоритм Мамдани. Алгоритм примечателен тем, что он работает по принципу «черного ящика». На вход поступают количественные значения, на выходе они же. На промежуточных этапах используется аппарат нечеткой логики и теория нечетких множеств. В этом и состоит элегантность использования нечетких систем. Можно манипулировать привычными числовыми данными, но при этом использовать гибкие возможности, которые предоставляют системы нечеткого вывода.

Алгоритм Мамдани может быть определен следующим образом [58]:

- формирование базы правил;
- фаззификация входных переменных;
- агрегирование подусловий (для каждого условия находится минимальное значение истинности всех его подусловий);
- активизация подзаключений (переход от условий к подзаключениям);
- аккумуляция заключений (получение нечеткого множества для выходных переменных);

- дефаззификация выходных переменных (традиционно используется метод центра тяжести масс).

При сравнении модели нечеткого вывода по Мамдани и модели типа Сугэно, можно отметить, что они отличаются между собой форматом базы знаний и процедурой дефаззификации. Эти модели являются универсальными аппроксиматорами, но при больших объемах выборки экспериментальных данных идентификация с помощью модели типа Сугэно обеспечивает, как правило, большую точность. Однако при этом могут возникнуть трудности с содержательной интерпретацией параметров нечеткой модели и с объяснением логического вывода. С моделью типа Мамдани таких трудностей не возникает, ее параметры легко интерпретируются содержательно. Выходное значение определяется центром тяжести фигуры, ограниченной функцией принадлежности нечеткого множества [59].

Можно сделать вывод, что для задач, где более важным является объяснение, обоснование принятого решения, будут иметь преимущество нечеткие модели типа Мамдани, а для задач, где более важным является точность идентификации нелинейных зависимостей, целесообразным будет использование нечетких моделей типа Сугэно [59].

4.1.2 Влияние выбора функций принадлежности на регулирование

Один из этапов построения нечетких систем – фаззификация входных данных. Именно на этапе фаззификации выполняется процедура построения функции принадлежности, которая ставит в соответствие каждому элементу степень его принадлежности нечеткому множеству. Выделяют следующие типовые функции принадлежности: треугольная, трапецеидальная, колоколообразная, гауссова функции и другие.

При проектировании нечеткой системы логического вывода необходимо тщательно производить процедура подбора функций принадлежности [60].

Исследование влияния выбора функций принадлежности приведены в работах [60, 62, 63]. Выбор функции принадлежности конкретной переменной

представляет собой плохо формализованную задачу, решение которой основано на интуиции и опыте [61]. Для большинства задач управления могут быть использованы простые, распространенные треугольные функции принадлежности со следующими лингвистическими термами, например: NL – большое отрицательное, PL – большое положительное, NM – среднее отрицательное, AZ – ноль, PM – среднее положительное, NS – малое отрицательное, PS – малое положительное [64]. Рекомендации по построению функций принадлежности приведены в работе [65].

В данной работе для разработки системы на основе нечеткой логики выбраны треугольные и трапецеидальные функции принадлежности, т.к. они более распространены и общеприняты, что позволяет проводить исследования нечетких систем на разных программных средствах.

4.1.3 Методы исследования нечетких систем управления

Классическим методам управления свойственно обладать проработанным математическим аппаратом, который обеспечивает относительную простоту исследования регуляторов. Они предназначены для управления хорошо изученными, формализованными объектами, которые всегда можно измерить и идентифицировать [66].

В отличие от классических регуляторов, нечеткие регуляторы позволяют реализовывать системы управления объектов с существенными нелинейностями.

Применение методов искусственного интеллекта, а именно нечеткой логики, применительно к решению задач управления сложными техническими объектами, содержащими в своем описании неопределенности, более целесообразно по сравнению с классическими методами [67].

Для нечетких регуляторов общепринятых, универсальных методов проверки устойчивости на сегодняшний день не существует [68], но есть попытки адаптации классических аналитических подходов.

Среди предложенных методов можно выделить такие как метод гармонической линеаризации, метод Попова, критерий Цыпкина. Но каждый метод имеет свои достоинства и недостатки. Например, метод гармонической линеаризации является не достаточным для оценки устойчивости, и не всегда применим в случае невозможности сведения системы к линейной.

В случае неприменимости аналитических методик возможным решением может послужить использование эмпирических, экспериментальных подходов: применение современной вычислительной техники, программных пакетов моделирования, таких как MATLAB, fuzzyTECH.

В данной работе для исследования нечеткой системы используется программный пакет моделирования MATLAB. В среде моделирования MATLAB разработан пакет Fuzzy Logic Toolbox, который позволят создавать экспертные системы на основе нечеткой логики, проводить кластеризацию нечеткими алгоритмами, а также проектировать нечеткие нейросети. Пакет включает графический интерфейс для интерактивного пошагового проектирования нечетких систем, функции командной строки для разработки программ, а также специальные блоки для построения систем нечеткой логики в Simulink.

4.2 Анализ систем автоматического регулирования с применением нечеткой логики

В настоящее время существуют различные варианты применения нечеткой логики в САР, среди которых можно выделить следующие:

- нечеткий ПИД-регулятор [71,72];
- нечеткий регулятор [72,74,75,78];
- нечеткий ПИ-регулятор [73];
- нечеткий регулятор П-типа [76];
- нечеткий регулятор ПД-типа [76, 77];
- псевдолинейный нечеткий регулятор [80, 81, 82].

При построении нечетких регуляторов обычно используют П, И, ПИ и ПД, ПД+И, ПИ+Д и ПИД-законы регулирования [79]. В качестве входных

сигналов для системы нечеткого вывода используют сигнал ошибки, приращение ошибки, квадрат ошибки и интеграл от ошибки [79].

Управление при помощи нечеткого ПИД-регулятора выполняется посредством подстройки коэффициентов ПИД-регулятора. Реализация нечеткого ПИД регулятора вызывает проблемы, поскольку он должен иметь трехмерную таблицу правил в соответствии с тремя слагаемыми в уравнении ПИД-регулятора, которую чрезвычайно сложно заполнить, пользуясь ответами эксперта [79].

Нечеткий регулятор ПД-типа погашает колебания в системе, показывает намного лучшие динамические свойства, чем классический ПИД-регулятор [76]. Достигается высокое качество переходного процесса в замкнутой системе управления с нечетким ПД-регулятором [77].

Псевдолинейный нечеткий регулятор состоит из классического ПИД-регулятора и нечеткого ПКУ. Исследования показали, что входящее в состав псевдолинейного нечеткого регулятора псевдолинейное корректирующее устройство позволяет обеспечить хорошее качество регулирования при изменении параметров объекта управления, что достигается путем определения его параметров на основе аппарата нечеткой логики [80-82].

Таким образом, в условиях неопределенности и нестационарности свойств объекта регулирования использование нечетких систем автоматического регулирования является преимущественней по сравнению с типовыми системами регулирования.

5 Анализ принципов построения адаптивных регуляторов

Адаптивное управление находит широкое применение в теории автоматического управления. Адаптивным называют такое управление, которое позволяет создавать такие системы управления, которые имеют возможность изменять структуру регулятора, менять параметры регулятора в зависимости от изменения параметров объекта управления или внешних возмущений.

Адаптивные системы управления делятся на две большие группы [69]:

- самонастраивающиеся;
- самоорганизующиеся.

В самонастраивающихся системах управления изменяются значения параметров управляющего устройств, а в самоорганизующихся системах изменяется структура регулятора или управляющего устройства.

По способу изучения объекта системы делятся на поисковые и беспоисковые. К поисковым системам относятся экстремальные системы. В таких системах для определения управляющих воздействий, обеспечивающих движение к экстремуму, к управляющему сигналу добавляется поисковый сигнал. К беспоисковым адаптивным системам относятся системы с эталонной моделью и системы с идентификатором (с настраиваемой моделью) [69].

Применение адаптивного управления позволяет:

- обеспечить работоспособность системы в условиях широкого изменения динамических свойств объекта;
- осуществить оптимизацию режимов работы объекта;
- повысить надежность системы, унифицировать отдельные регуляторы или их блоки и приспособить их для работы с различными видами однотипных объектов;
- снизить технологические требования к изготовлению отдельных узлов и элементов системы;
- сократить сроки разработки системы.

5.1 Выбор системы с нечетким регулятором с адаптивной структурой

Ранее при разработке данной темы были предложены и исследованы псевдолинейные нечеткие регуляторы с различными корректирующими устройствами [81,82].

Структурная схема системы с псевдолинейным нечетким регулятором приведена на рисунке 5.1.

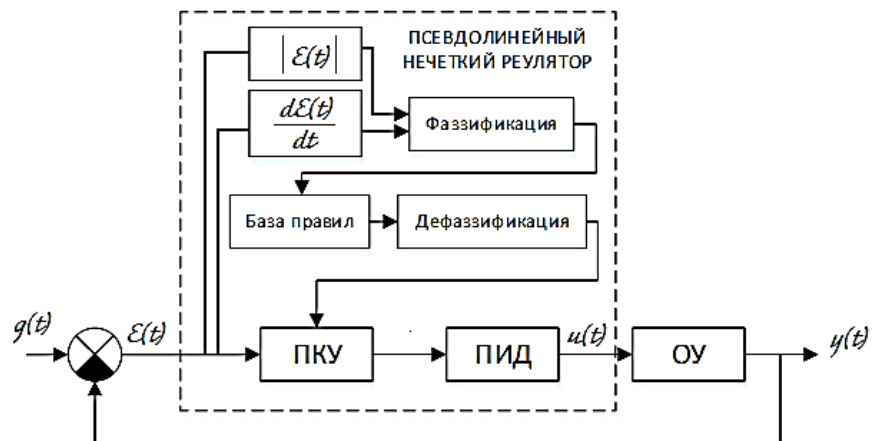


Рисунок 5.1 – Структурная схема системы с нечетким регулятором

Псевдолинейный нечеткий регулятор включает в свой состав нечеткое ПКУ, последовательно соединенное с классическим ПИД-регулятором. Подстройка параметров ПКУ осуществляется на основе аппарата нечеткой логики по модулю ошибки и скорости изменения ошибки регулирования.

В работе [81] предложен псевдолинейный нечеткий регулятор с ПКУ с фазовым опережением. Входящее в его состав псевдолинейное корректирующее устройство позволяет обеспечить хорошее качество регулирования при изменении параметров объекта управления, а именно увеличить быстродействие и повысить запасы устойчивости системы. Однако применение данного регулятора в условиях большой колебательности не улучшает качество регулирования до желаемого вида.

В работе [82] предложен псевдолинейный нечеткий регулятор с ПКУ с амплитудным подавлением. Исследования показали, что входящее в состав псевдолинейного нечеткого регулятора псевдолинейное корректирующее устройство позволяет обеспечить хорошее качество регулирования при

изменении параметров объекта управления, а именно уменьшить колебательность в системе и свести переходный процесс в САР к апериодическому. Недостатком использования такого регулятора является уменьшение быстродействия в системе.

В настоящей работе предложена и исследована самоорганизующаяся беспоисковая адаптивная система автоматического регулирования с псевдолинейным нечетким регулятором. Адаптация в такой системе осуществляется путем изменения структуры псевдолинейного нечеткого регулятора.

Структурная схема системы с адаптивным псевдолинейным нечетким регулятором приведена на рисунке 5.2.

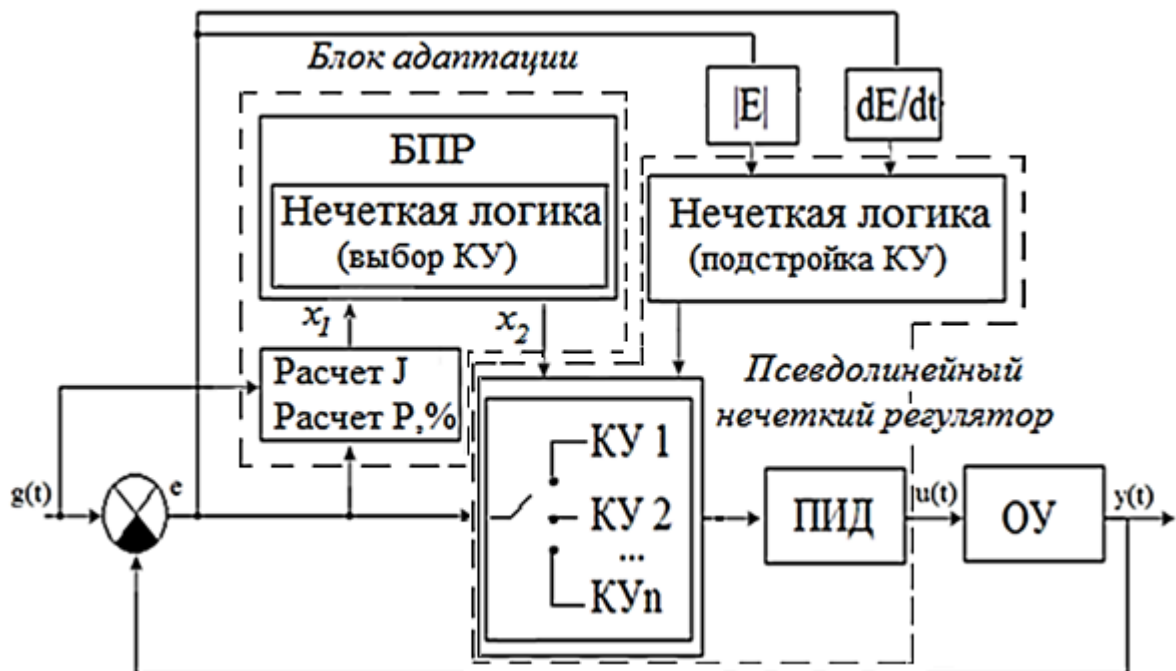


Рисунок 5.2 – Структурная схема САР с нечетким регулятором

Адаптивный псевдолинейный нечеткий регулятор включает в свой состав псевдолинейный нечеткий регулятор, последовательно соединенный с блоком адаптации. Блок адаптации включает в свой состав блок расчета показателей качества (J – интегральная квадратичная ошибка, P – перерегулирование) и блок принятия решения (БПР).

Система с адаптивным псевдолинейным нечетким регулятором работает следующим образом. В начальный момент времени в системе отключены корректирующие устройства (КУ). Входной сигнал $g(t)$ поступает на блок расчета показателей качества и на вход ПИД-регулятора, который настроен на апериодический процесс. В блоке РАСЧЕТ J,P вычисляется квадратичная интегральная ошибка и перерегулирование. В неизвестный момент времени, в системе изменились параметры объекта управления, что вызвало колебания в системе и, как следствие, увеличение интегральной квадратичной ошибки и перерегулирования. Далее сигнал x_1 поступает на блок принятия решения (БПР), где на основе аппарата нечеткой логики производится выбор корректирующего устройства (КУ). Блок принятия решения посылает сигнал x_2 на блок переключения корректирующих устройств, который включает в основную цепь необходимое КУ. Корректирующее устройство в свою очередь настраивается на основе аппарата нечеткой логики по модулю ошибки регулирования и скорости изменения ошибки.

В данной работе для разработки адаптивной САР выбраны следующие корректирующие устройства: ПКУ с фазовым опережением, ПКУ с амплитудным подавлением, ПКУ с переключением сигналов.

Таким образом, если система автоматического регулирования в процессе работы обеспечивает требуемое качество, то блок адаптации не включает в состав САР никаких корректирующих устройств. В этом случае система работает с классическим ПИД-регулятором. Если в системе в неизвестный момент времени появились отклонения и измеряемые показатели качества изменились, то блок адаптации включает в состав САР соответствующее ПКУ, что позволяет сохранить монотонность переходного процесса и устойчивость САР.

5.2 Последовательность действий по разработке адаптивного нечеткого псевдолинейного регулятора

Разработка адаптивного нечеткого регулятора осуществляется в следующей последовательности:

1. Убедиться, что классический ПИД-регулятор не удовлетворяет требуемым показателям качества регулирования при нестационарных параметрах объекта управления.

2. Оценить возможность применения нечеткой логики и принципов адаптивного управления в исследуемой системе.

3. Промоделировать влияние изменения параметров конкретного объекта управления на исследуемую САР. Оценить пределы изменения квадратичной интегральной ошибки и величины перерегулирования.

4. Настроить аппарат нечеткой логики в соответствии с полученными результатами моделирования.

5. Проанализировать и выбрать корректирующие устройства, которые планируется применять в адаптивной САР.

В случае управления нестационарными объектами типовые регуляторы не всегда обеспечивают требуемое качество переходного процесса. Убедиться в этом можно, наблюдая изменение показателей качества, таких как: перерегулирование, колебательность, запасы устойчивости по амплитуде и фазе и другие. Если данные показатели не соответствуют заданным, то целесообразно применять адаптивный регулятор.

Для того чтобы применить аппарат нечеткой логики, нужно обладать некоторыми экспертными знаниями о поведении конкретной системы. Это необходимо для того чтобы корректно задать функции принадлежности и базу правил. Для того чтобы применять принципы адаптивного управления, нужно оценить возможность расширения структуры исследуемой системы.

Промоделировать и исследовать влияние изменения параметров конкретного объекта управления на поведение исследуемой САР можно в любой интерактивной среде программирования, например MatLab или в приложениях для математических и инженерных вычислений, таких как MathCad, FreeLab. Моделирование поведения САР при различных параметрах объекта управления дает возможность оценить пределы изменения квадратичной интегральной ошибки и величины перерегулирования.

Для корректной работы аппарата нечеткой логики необходимо в соответствии с полученными результатами моделирования уточнить пределы изменения входных и выходных величин.

Анализ и выбор корректирующих устройств позволяет подобрать наиболее подходящие для исследуемой системы корректирующие устройства, которые позволят улучшить качество регулирования и сохранить устойчивость в САР.

6 Разработка и исследование в среде MATLAB свойств систем управления с псевдолинейным нечетким регулятором с адаптивной структурой и выработка рекомендаций по применению

6.1 Разработка и исследование в среде MATLAB свойств систем управления с псевдолинейным нечетким регулятором с адаптивной структурой

Схема моделирования САР с применением псевдолинейного нечеткого регулятора с адаптивной структурой приведена на рисунке 6.1.

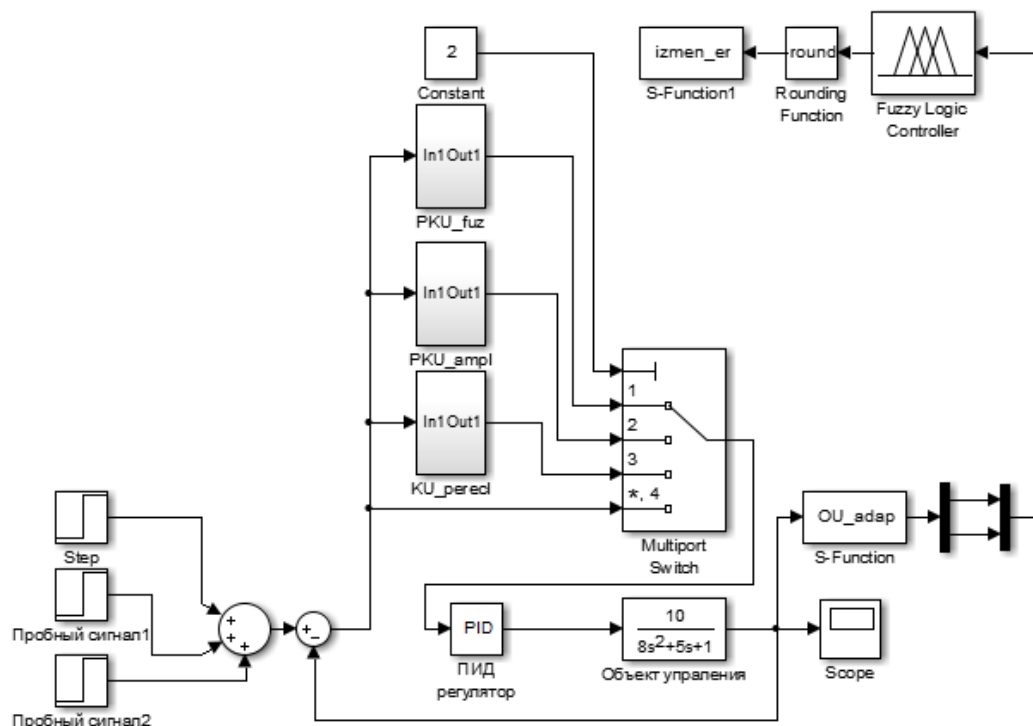


Рисунок 6.1 – Схема моделирования САР с псевдолинейным нечетким регулятором с адаптивной структурой

На схеме моделирования корректирующие устройства отражены в виде подсистем (PKU_faz, PKU_ampl, KU_perecl), которые подключаются в структуру системы управления с помощью переключателя Multiport Switch. На рисунках 6.2 – 6.4 приведены подсистемы корректирующими устройствами. Значение переключателя определяется значением константы от 1 до 4 в зависимости от значения квадратичной интегральной ошибки J_1 , которая рассчитывается в m-файле блока S-Function. Листинг m-файла «OU_adap» блока S-Function приведен в приложении Б.

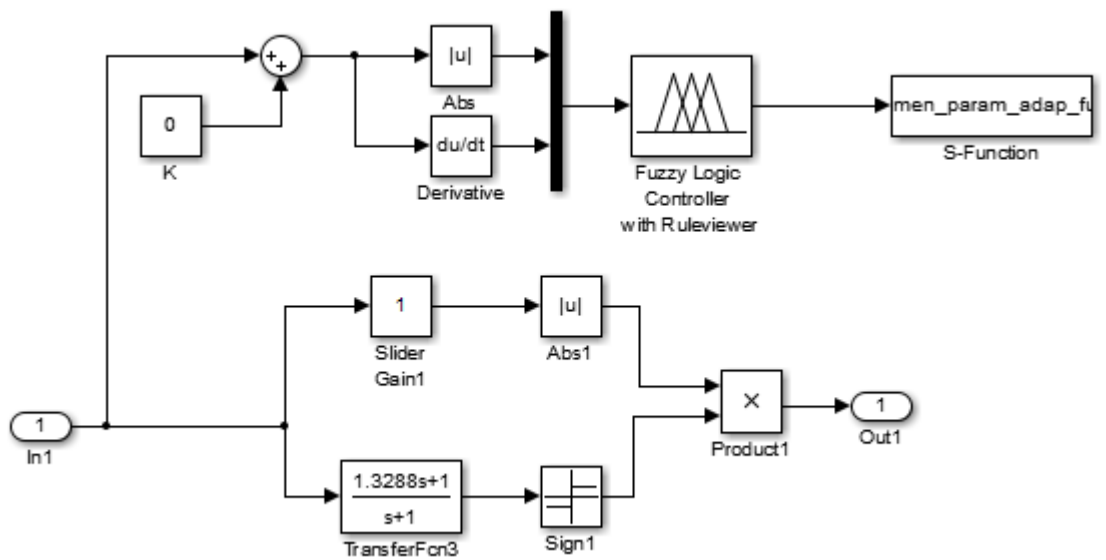


Рисунок 6.2 – ПКУ с фазовым опережением

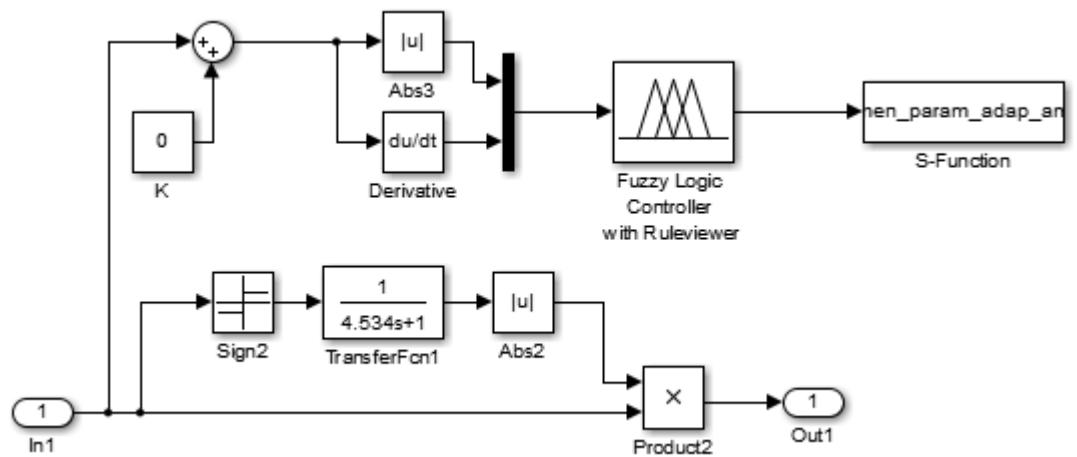


Рисунок 6.3 – ПКУ с амплитудным подавлением

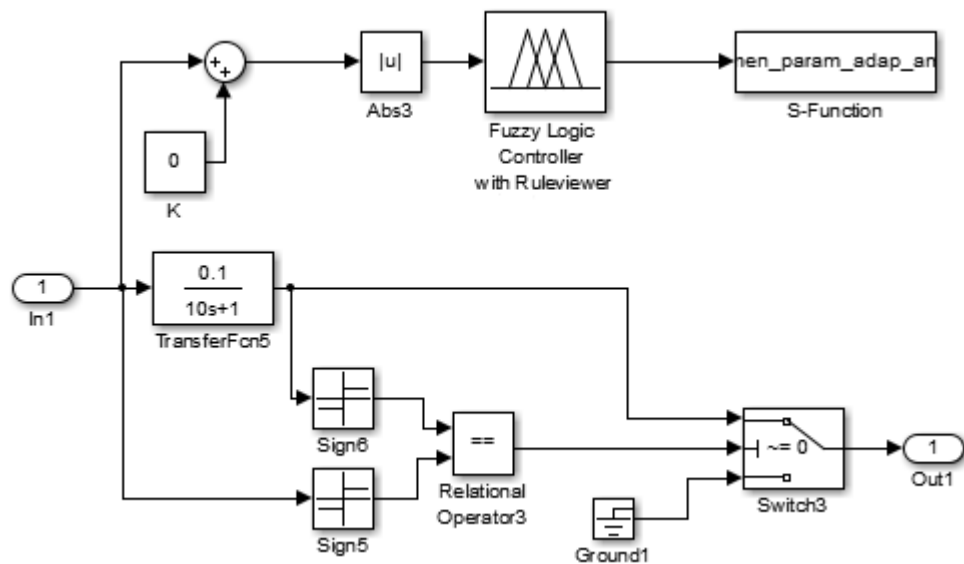


Рисунок 6.4 – ПКУ с переключением сигналов

Изменение структуры регулятора реализовано в соответствии с рекомендациями приведенными в пункте 1 (1.4). Подстройка корректирующих устройств в свою очередь осуществляется с помощью нечеткой логики.

Разработать нечеткую систему в среде MATLAB позволяет пакет Fuzzy Logic Toolbox. Встроенные модули пакета, создают интуитивно понятную среду, обеспечивающую легкое продвижение по всем ступенькам проектирования нечетких систем [70].

На этапе фаззификации используются следующие функции принадлежности входных переменных: модуль ошибки регулирования «Е» и скорость изменения ошибки регулирования «V». Терм-множество лингвистической переменной «Е»: Z – ошибка нулевая, S – ошибка маленькая, M – ошибка средняя, L – ошибка большая. Терм-множество лингвистической переменной «V»: N – отрицательная, Z – нулевая, P – положительная.

Выходной переменной блока дефаззификации является постоянная времени T . Терм-множество выходной переменной «Т»: TS – малая, TM – средняя, TL – большая, TXL – очень большая. Функции принадлежности входных и выходных переменных для ПКУ с амплитудным подавлением представлены на рисунке 6.5, для ПКУ с фазовым опережением на рисунке 6.6, для ПКУ с переключением сигналов на рисунке 6.7.

Нечеткий вывод осуществляется по алгоритму Мамдани на основе баз правил, представленных в таблицах 6.1 – 6.3.

Для автоматической подстройки постоянной времени T ПКУ с амплитудным подавлением, T_1 ПКУ с амплитудным подавлением, T ПКУ с переключением сигналов используется S-Function, которая работает по написанному специальным образом М-файлу. Листинги m-файлов приведены в приложениях В, Г и Д соответственно.

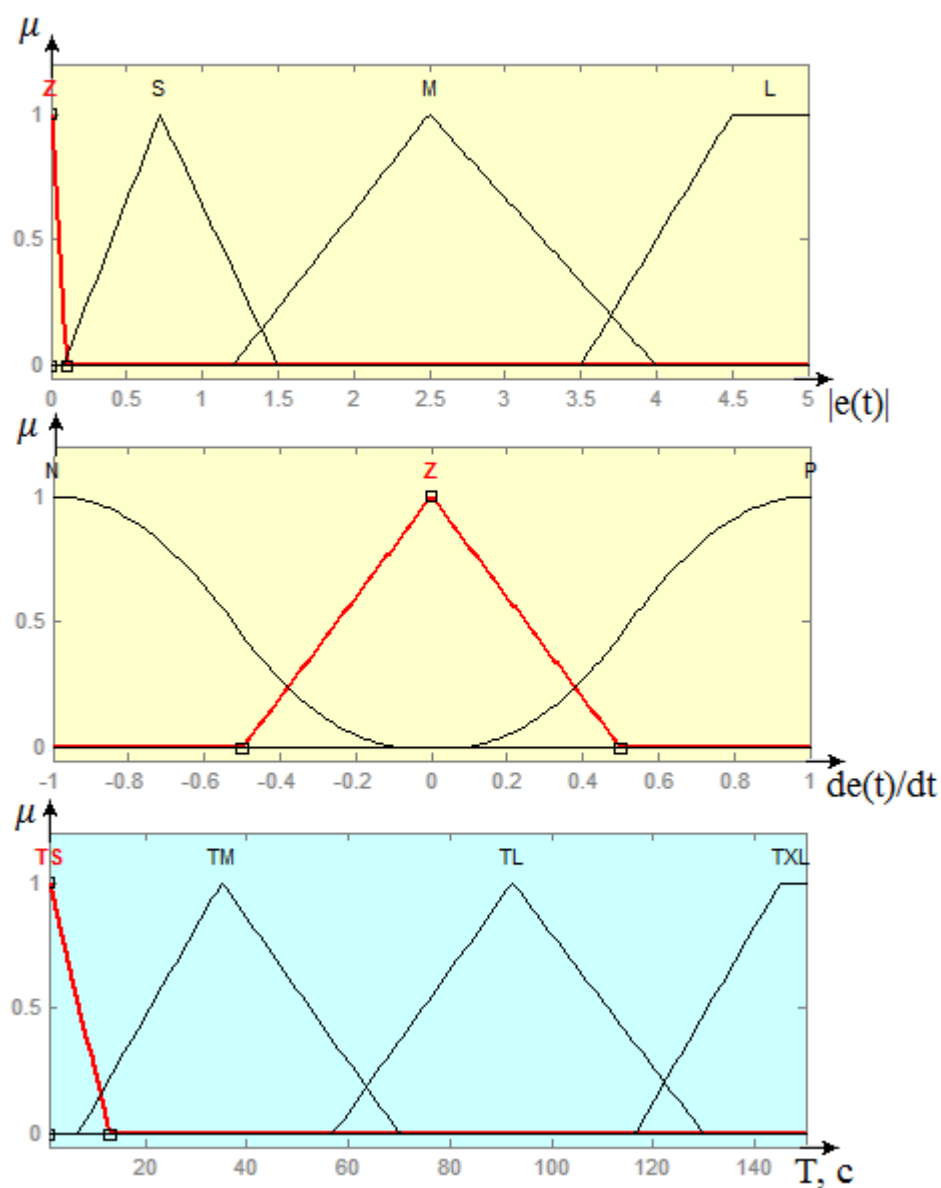


Рисунок 6.5 – Функции принадлежности входных и выходных переменных для ПКУ с амплитудным подавлением

Таблица 6.1 – База правил нечеткого ПКУ с амплитудным подавлением

		Скорость изменения «V»		
		N	Z	P
Модуль ошибки «E»	Z	TM	TS	TL
	S	TM	TM	TL
	M	TM	TL	TXL
	L	TXL	TXL	TXL

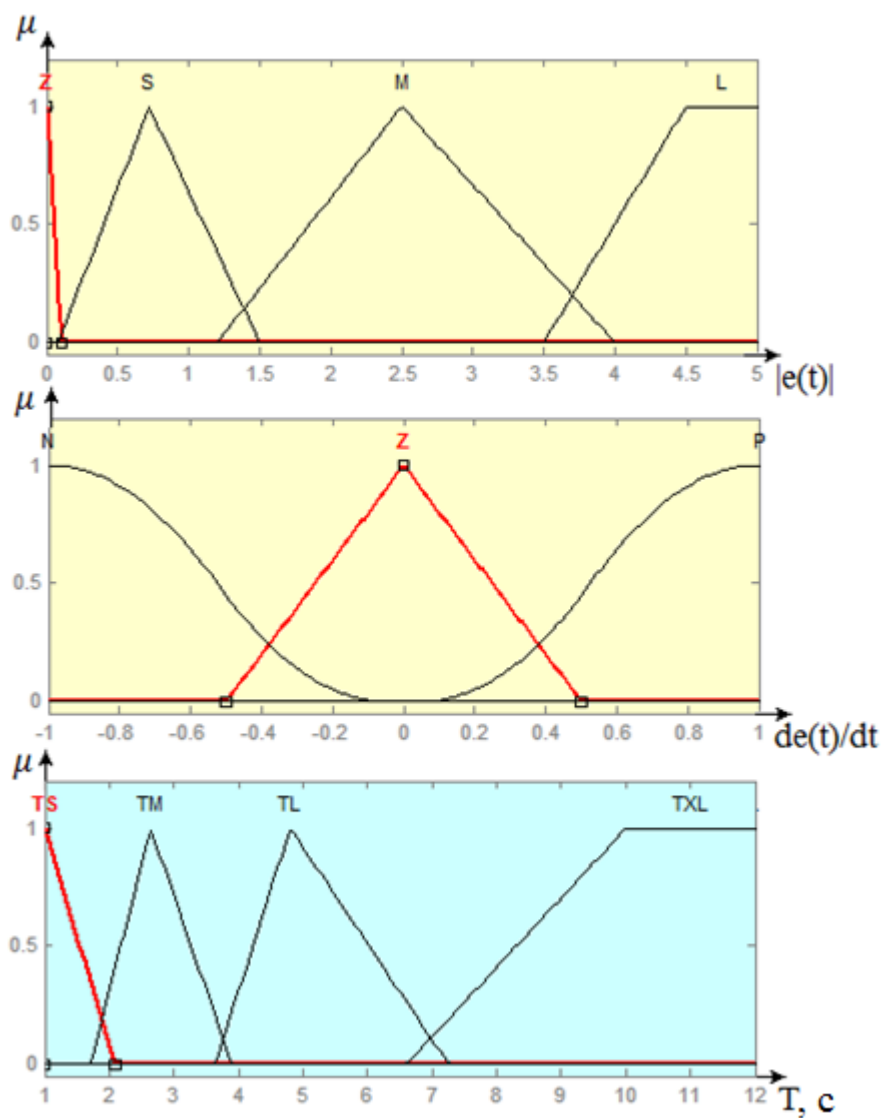


Рисунок 6.6 – Функции принадлежности входных и выходных переменных для ПКУ с фазовым опережением

Таблица 6.2 – База правил нечеткого ПКУ с фазовым опережением

		Скорость изменения «V»		
		N	Z	P
Модуль ошибки «E»	Z	TM	TS	TM
	S	TL	TL	TL
	M	TL	TL	TXL
	L	TXL	TXL	TXL

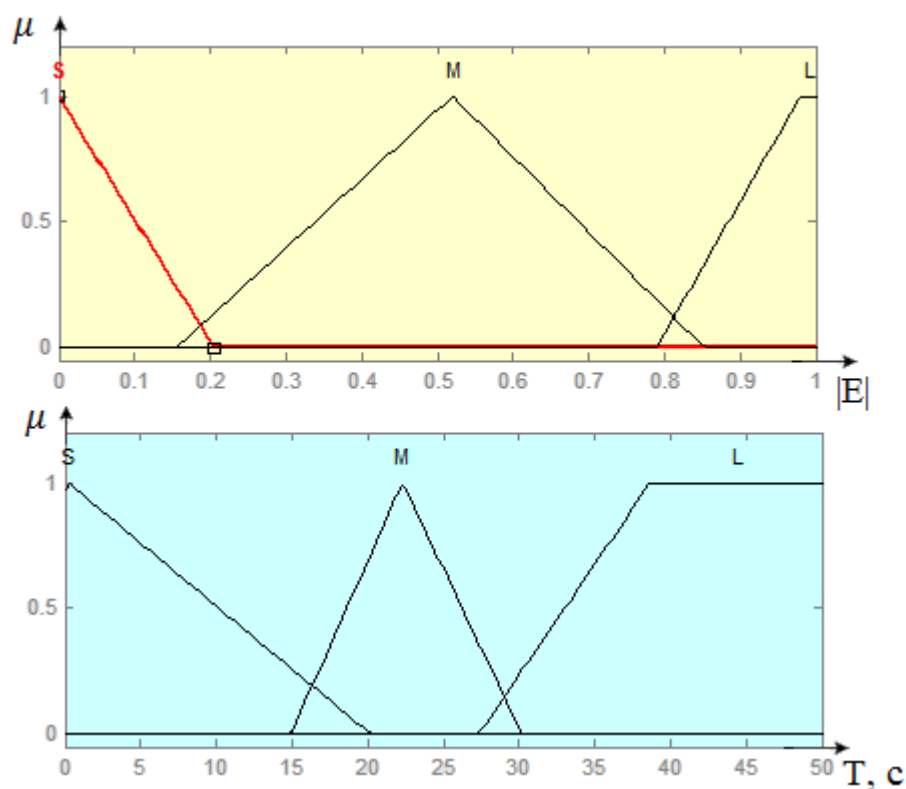


Рисунок 6.7 – Функции принадлежности входных и выходных переменных для ПКУ с переключением сигналов

Таблица 6.3 – База правил нечеткого ПКУ с переключением сигналов

		Значение постоянной времени T
Модуль ошибки «E»	S	S
	M	M
	L	L

Для выбора корректирующего устройства на этапе фаззификации используется следующие функции принадлежности входных переменных: интегральная квадратичная ошибка «I» и перерегулирование «P». Терм-множество лингвистической переменной «I»: S – ошибка маленькая, M – ошибка средняя, L – ошибка большая. Терм-множество лингвистической переменной «P»: S – малое перерегулирование, M – среднее перерегулирование, L – большое перерегулирование.

Выходной переменной блока дефаззификации является номер корректирующего устройства. Терм-множество выходной переменной «N»: 1 – КУ номер 1, 2 – КУ номер 2, 3 – КУ номер 3, 4 – отсутствие КУ. Функции принадлежности входных и выходных переменных для выбора номера КУ представлены на рисунке 6.8.

Нечеткий вывод осуществляется по алгоритму Мамдани на основе базы правил, представленной в таблице 6.4.

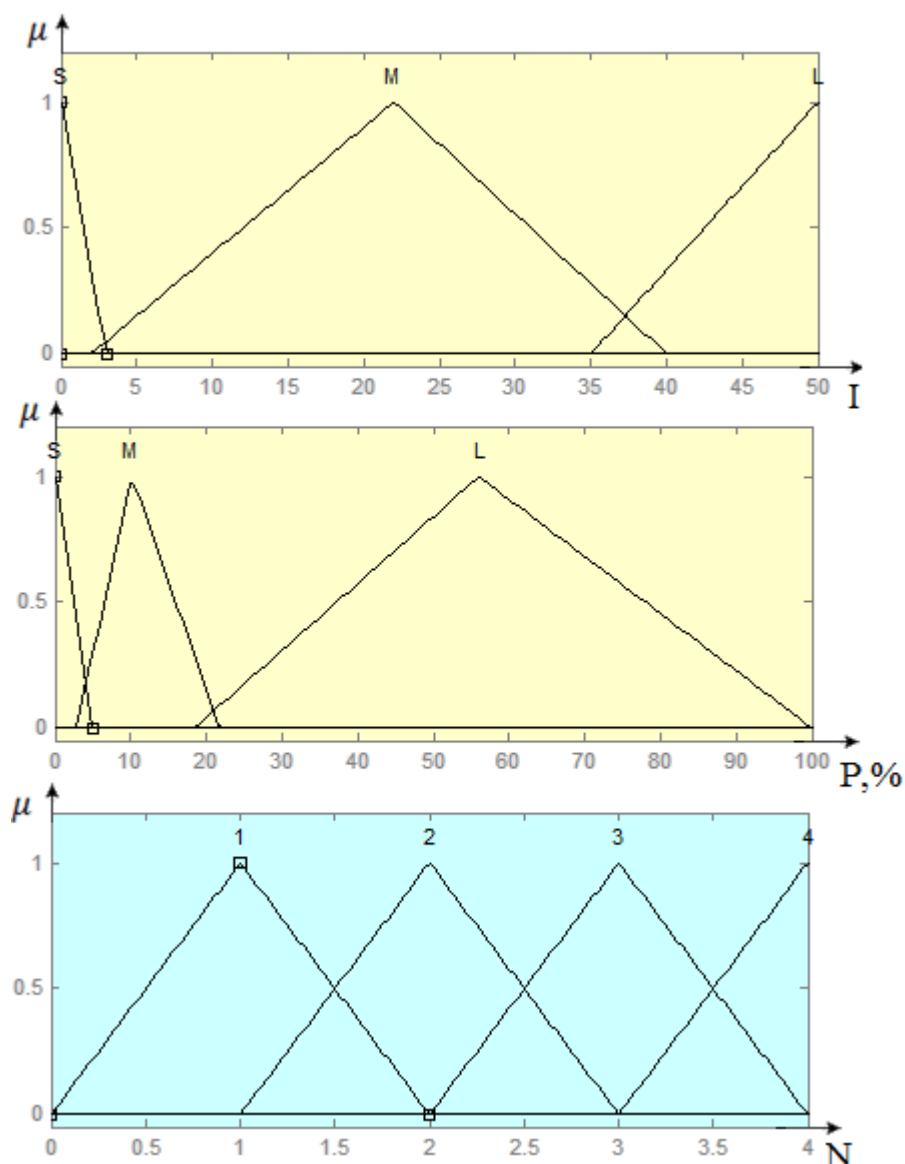


Рисунок 6.8 – Функции принадлежности входных и выходных переменных для блока выбора КУ

Таблица 6.4 – База правил нечеткого выбора КУ

		Перерегулирование «Р»		
		S	M	L
Интегральная квадратичная ошибка «I»	S	4	1	2
	M	4	1	2
	L	4	3	3

График переходного процесса приведён на рисунке 6.9. В моменты времени $(0..t_1)$ происходит вычисление эталонной интегральной квадратичной ошибки, в момент времени t_1 происходит изменение постоянной времени объекта управления T_1 со значения 8 до значения 16, что вызывает колебания. В момент времени t_2 подаётся пробный сигнал. В моменты времени $(t_2...t_3)$ вычисляется текущая интегральная квадратичная ошибка J_2 и перерегулирование. В момент времени t_3 снимается пробный сигнал, а в момент времени t_4 включается соответствующее ПКУ. Для наглядности результата, подается пробная ступенька.

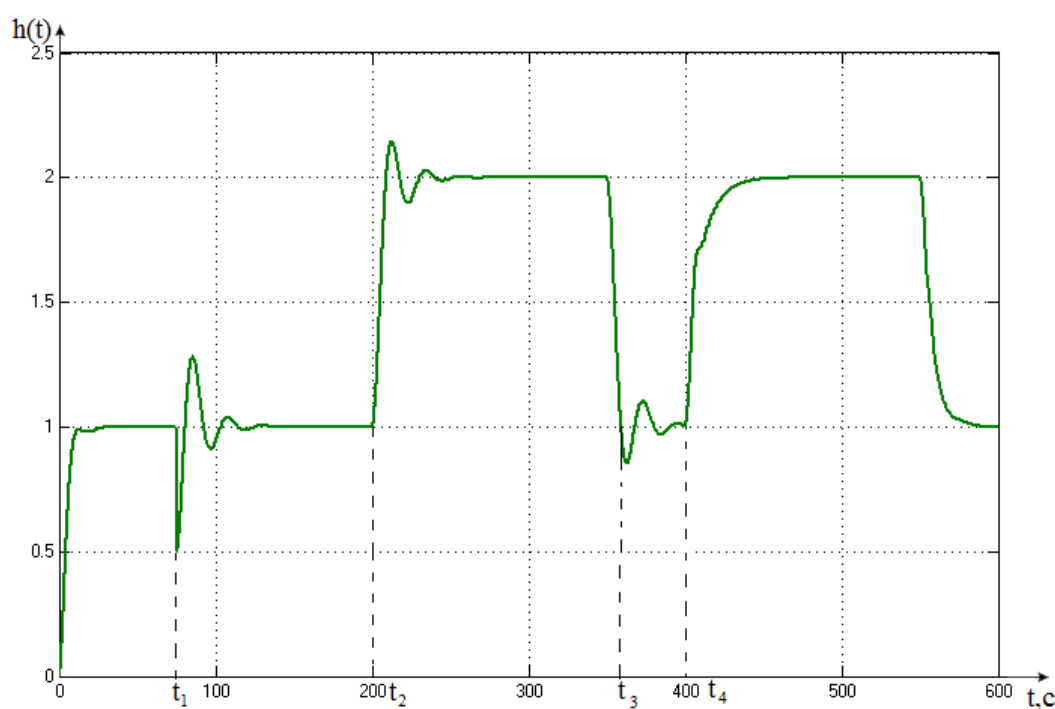


Рисунок 6.9 – Переходные процессы в САР

В таблице 6.5 представлено сравнение характеристик по основным показателям качества регулирования.

Таблица 6.5 – Сравнение переходных процессов в САР

$0 < t < t_1$			$t_2 < t < t_3$			$t_4 < t < t_5$		
$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	J_1	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	J_2	$t_{пп}, c$	$\sigma, \%$	J_3
25	0	2,77	50	7	4,5	40	0	5

Исследования показали, что в результате изменения параметра объекта управления, а именно увеличении первой постоянной времени со значения 8 до значения 16, в системе появились колебания, что увеличило квадратичную интегральную ошибку со значения 2,7 до значения 4,5. Изменение интегральной квадратичной ошибки влечет изменение структуры САР, а именно включение в нее ПКУ с фазовым опережением. Анализ показал, что данные действия уменьшают быстродействие в системе, но увеличивают запас устойчивости и снижает перерегулирование до нуля.

Использование нечеткого ПИД-регулятора при нестационарности параметров ОУ не рекомендовано, т.к. регулятор не справляется с регулированием при изменении параметров в больших пределах. Переходные процессы в САР с использованием нечетких регуляторов приведены в приложении Е. На рисунке Е.1 переходные процессы с параметрами объекта управления $K=1$, $T_1=3$, $T_2=5$, на рисунке Е.2 переходные процессы с параметрами объекта управления $K=1$, $T_1=8$, $T_2=1$. На рисунках Е.1 – Е.2 кривая 1 соответствует переходному процессу без ПКУ, кривая 2 – с нечетким ПКУ с фазовым опережением, кривая 3 – с нечетким ПКУ с амплитудным подавлением, кривая 4 – с нечетким ПКУ с переключением сигналов, кривая 5 – с нечетким ПИД-регулятором.

Анализ показал, что использование псевдолинейных нечетких регуляторов эффективнее по сравнению с нечетким ПИД-регулятором. Адаптивная САР с псевдолинейным нечетким регулятором позволяет подстраивать структуру САР в зависимости от ее состояния. При использовании псевдолинейных нечетких регуляторов параметры объекта

управления могут меняться в широком диапазоне. Обеспечить устойчивость в САР в этом случае позволяют нечеткие псевдолинейные корректирующие устройства, входящие в состав регулятора, которые подключаются к системе регулирования при изменении квадратичной интегральной ошибки и появления перерегулирования.

В приложении Ж приведены переходные процессы в САР при подключении различных ПКУ. В моменты времени $(0..t_1)$ происходит вычисление эталонной интегральной квадратичной ошибки, в момент времени t_1 происходит изменение параметров объекта, в момент времени t_2 подаётся пробный сигнал. В моменты времени $(t_2...t_3)$ вычисляется текущая интегральная квадратичная ошибка J_2 и перерегулирование. В момент времени t_3 снимается пробный сигнал, а в момент времени t_4 включается соответствующее ПКУ.

На рисунке Ж.1 приведены переходные процессы в САР при изменении статического коэффициента объекта управления второго порядка со значения 1 до значения 10. Показатели качества приведены в таблице 6.6. Так как перерегулирования в системе превышает 20%, а интегральная квадратичная ошибка меньше 50, то в структуру САР включается ПКУ с амплитудным подавлением.

Таблица 6.6 – Сравнение переходных процессов в САР

$0 < t < t_1$			$t_2 < t < t_3$			$t_4 < t < t_5$		
$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_1	$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_2	$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_3
25	0	2,77	25	50	3,05	25	0	2,9

На рисунке Ж.2 приведены переходные процессы в САР при изменении параметров объекта таким образом, что система стала не устойчивой. Показатели качества приведены в таблице 6.7. При неустойчивости САР интегральная квадратичная ошибка со временем растет, поэтому достигает значения больше 50. В такой ситуации в структуру САР включается нечеткий псевдолинейный регулятор с ПКУ с переключением сигналов.

Таблица 6.7 – Сравнение переходных процессов в САР

$0 < t < t_1$			$t_2 < t < t_3$			$t_4 < t < t_5$		
$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_1	$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_2	$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_3
25	0	2,77	200	> 100	450	40	3	20

На рисунке Ж.3 приведены переходные процессы в САР при изменении параметров объекта первой постоянной времени со значения 8 до значения 3. Показатели качества приведены в таблице 6.8. В такой ситуации перерегулирование при подаче пробного сигнала не наблюдается, следовательно, изменение структуры САР не требуется.

Таблица 6.8 – Сравнение переходных процессов в САР

$0 < t < t_1$			$t_2 < t < t_3$			$t_4 < t < t_5$		
$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_1	$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_2	$t_{\text{пп}}, c$	$\sigma, \%$	J_3
25	0	2,77	20	0	3,44	20	0	3,44

Исследования показали, что адаптивный псевдолинейный нечеткий регулятор позволяет применить в условия нестационарности объекта управления положительное действие выбранных корректирующих устройств для определенных состояний в системе.

В приложении И на рисунке И.1 приведены переходные процессы в адаптивной САР с объектом управления второго порядка с запаздыванием. Исследования показали, что при возникновении даже небольшого запаздывания, например $\tau = 1c$ и при изменении свойств ОУ, система становится не устойчивой с выбранными настройками ПИД-регулятора. А при введении в нее нечеткого псевдолинейного регулятора САР с таким объектом становится устойчивой.

В приложении И на рисунке И.2 приведены переходные процессы в адаптивной САР с объектом управления третьего порядка. Передаточная функция ОУ имеет вид:

$$W(s) = \frac{1}{(8s^2 + 5s + 1)(s + 1)}.$$

Исследования показали, что адаптивная САР удовлетворительно справляется с таким ОУ в условиях его нестационарности. Однако для использования ОУ третьего и выше порядка необходима предварительная настройка ПИД-регулятора на апериодический процесс.

6.2 Рекомендации по применению адаптивных нечетких псевдолинейных регуляторов

Разработаны следующие рекомендации по применению адаптивного нечеткого псевдолинейного регулятора:

1. Адаптивный нечеткий псевдолинейный регулятор целесообразно применять для объектов первого и второго порядка. С объектами управления третьего порядка регулятор показывает удовлетворительный результат, с объектами управления выше третьего порядка использовать данный регулятор не рекомендуется.

2. Не следует использовать адаптивный нечеткий псевдолинейный регулятор с объектами управления с большим запаздыванием.

3. Рекомендуется использовать адаптивный нечеткий псевдолинейный регулятор в системах автоматического регулирования нестационарными объектами в которых в процессе работы возможно изменение как статического коэффициента передачи объекта управления, так и постоянных времени.

7 Программная реализация регулятора

7.1 Среда программирования CodeSys

CoDeSys (Controllers Development System) – это современный инструмент для программирования контроллеров [83]. Данная среда программирования одна из самых развитых и полнофункциональных инструментов для программирования логических контроллеров на языках международного стандарта МЭК 61131-3. Программный комплекс производится и распространяется немецкой фирмой 3S-Smart Software Solutions [84].

Для программирования в среде доступны все языки стандарта МЭК:

- язык релейной логики LD (Ladder Diagram);
- ассемблер-подобный язык IL (Instruction List);
- текстовый язык ST (Structured Text);
- графический язык функциональных блоков FBD (Function Block Diagram);
- графический высокоуровневый язык SFC (Sequential Function Chart).

В качестве расширения стандарта МЭК в CoDeSys реализована поддержка объектно-ориентированного программирования.

Описание готового проекта хранится в одном единственном файле. Компилятор CoDeSys генерирует на основе проекта исполняемый машинный код, обеспечивая максимально возможное быстроедействие прикладных программ. Поддерживаются различные процессоры известных марок. CoDeSys работает на всех 32х разрядных Windows. CoDeSys и контроллер взаимодействуют через промежуточное приложение Gateway-сервер. Он может работать как локально, так и удаленно через TCP/IP. Контроллеры подключаются к Gateway-серверу по протоколам RS232, TCP/IP или CAN [85].

CoDeSys имеет обширный ряд передовых средств помогающих в отладке, тестировании и сопровождении приложений. В режиме отладки доступен мониторинг, изменение и фиксация значений переменных, точки

останова, горячее обновление кода, контроль потока выполнения, графическая трассировка в реальном времени и другие отладочные инструменты.

Программный продукт CoDeSys широко применяется при программировании контроллеров, производимых различными фирмами. Среди наиболее известных [85]: OВЕН ПЛК 100, Moeller XC100-FC, ПЛК SMA «Enduro», ПЛК Berghof Dialog Controller DC1005, система Wago I/O, ПЛК ЭЛСИ-ТМК.

Например, контроллер OВЕН ПЛК 100 осуществляет анализ входных сигналов от различных датчиков, затем формирует выходной сигнал на управление пневмораспределителями и магнитными пускателями. Контроллер XC100-FC контролирует параметры сети и состояние аккумуляторов источника резервного питания, управляет процессом кондиционирования воздуха, включая нагрев и охлаждение, контролирует работу световых сигналов.

Таким образом, CoDeSys является средой программирования, широко применяемой различными производителями средств автоматизации, а также техниками и инженерами на производстве. На сегодняшний день CoDeSys – это самый популярный в мире аппаратно-независимый комплекс для прикладного программирования ПЛК и встраиваемых контроллеров.

7.2 Программная реализация адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора в среде CoDeSys

Написание программы начинается с создания нового проекта. Перед созданием нового проекта необходимо настроить конфигурацию проекта, которая заключается в выборе используемого контроллера и основных параметров конфигурации. После чего выбирается название проекта и язык программирования. В данной работе для основной программы ROU выбран язык функциональных блоков FBD (рисунок 7.1).

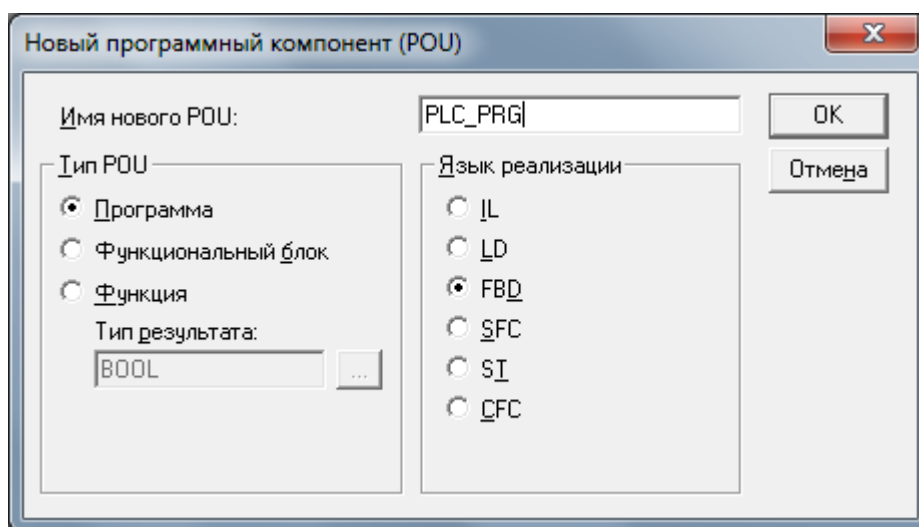


Рисунок 7.1 – Создание нового проекта

Для проведения исследований адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора смоделируем объект второго порядка. Объект второго порядка можно представить как два последовательно соединенных объекта первого порядка. Передаточная функция объекта управления в таком случае имеет вид:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}.$$

Для моделирования объекта первого порядка использовано следующее дифференциальное уравнение:

$$T \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K \cdot x(t). \quad (7.1)$$

Решение уравнения (7.1) может быть найдено с помощью численных методов, например формулы Эйлера:

$$y_i = y_{i-1} + \frac{1}{T} (Kx_i - y_{i-1}).$$

Тогда, принимая x за входную величину «in», а y за выходную величину «out», получим объект второго порядка как последовательное соединение двух объектов первого порядка (рисунок 7.2). Для компоновки кода основной программы реализацию ОУ выполним в отдельном функциональном блоке «OU» (рисунок 7.3).

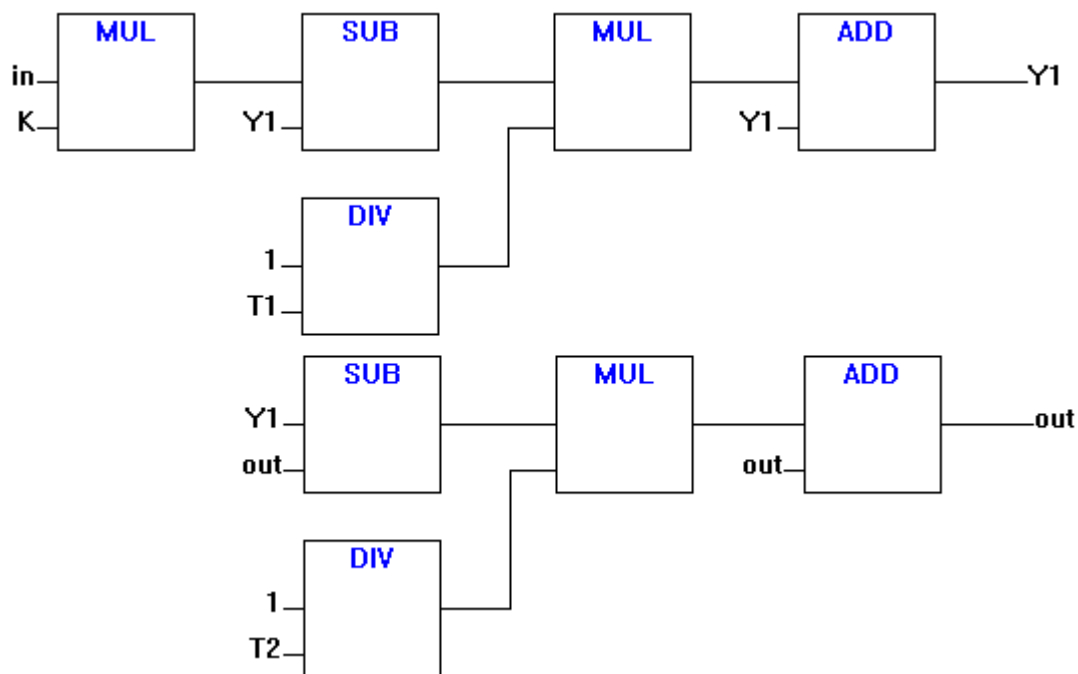


Рисунок 7.2 – Реализация объекта управления

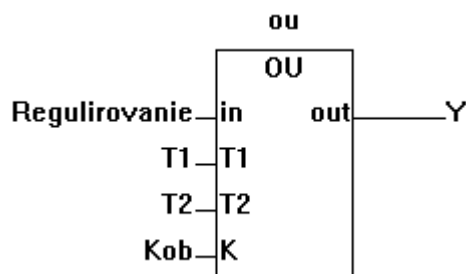


Рисунок 7.3 – Блок с ОУ второго порядка

Управляющий сигнал «Regulirovanie» на вход ОУ поступает с псевдолинейного нечеткого регулятора. Псевдолинейный нечеткий регулятор состоит из нечеткого ПКУ и ПИД-регулятора.

Реализация ПИД-регулятора приведена на рисунке 7.3. На вход регулятора «ACTUAL» поступает сигнал с корректирующего устройства, на вход «SET_POINT» поступает удвоенный сигнал с корректирующего устройства. Данная операция необходима для того, чтобы ПИД-регулятор считал сигнал «SET_POINT» как ошибку регулирования с КУ, и не производил некорректных вычислений, т.к. ошибка регулирования в блоке PID вычисляется как разность сигналов «SET_POINT» и «ACTUAL».

Реализация псевдолинейных корректирующих устройств приведена в Приложении К. На рисунке К.1 представлено ПКУ с амплитудным

подавлением, на рисунке К.2 – ПКУ с фазовым опережением, на рисунке К.3 – ПКУ с переключением сигналов.

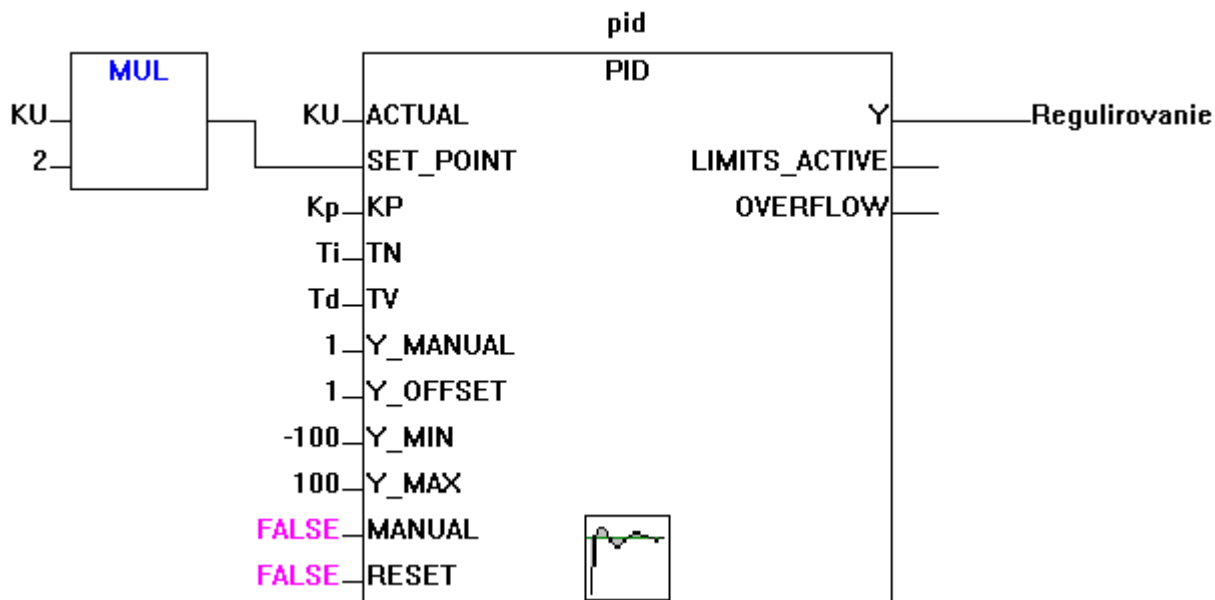


Рисунок 7.3 – ПИД-регулятор

Ошибка регулирования поступает на нечеткое корректирующее устройство, для того чтобы вычислить ошибку регулирования из сигнала уставки вычитается сигнал с ОУ (рисунок 7.5).

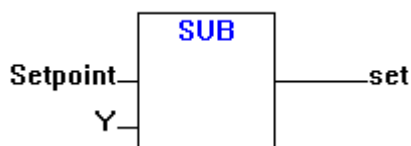


Рисунок 7.5 – Вычисление ошибки регулирования

Блок адаптации включает в себя блок принятия решения BPR и блок вычисления интегральной квадратичной ошибки и перерегулирования.

Вычисление интегральной квадратичной ошибки осуществляется в блоке «mas» (рисунок 7.6). На вход блока поступает значение в входного и выходного сигнала системы. На выходе массив выходных значений, величина перерегулирования и интегральная квадратичная ошибка.

На вход блока принятия решения поступают значения квадратичной интегральной ошибки, перерегулирования, сигналы с ПКУ и уставка. На выходе на основе нечеткой логики формируется сигнал КУ, поступающий на вход ПИД-регулятора, и сведения о том какое КУ подключилось (рисунок 7.7).

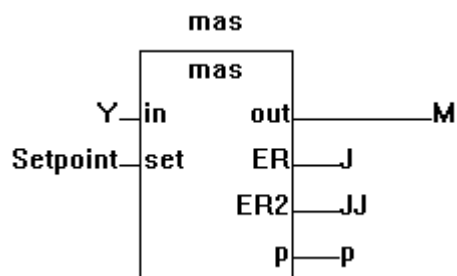


Рисунок 7.6 – Блок вычисления контролируемых показателей качества

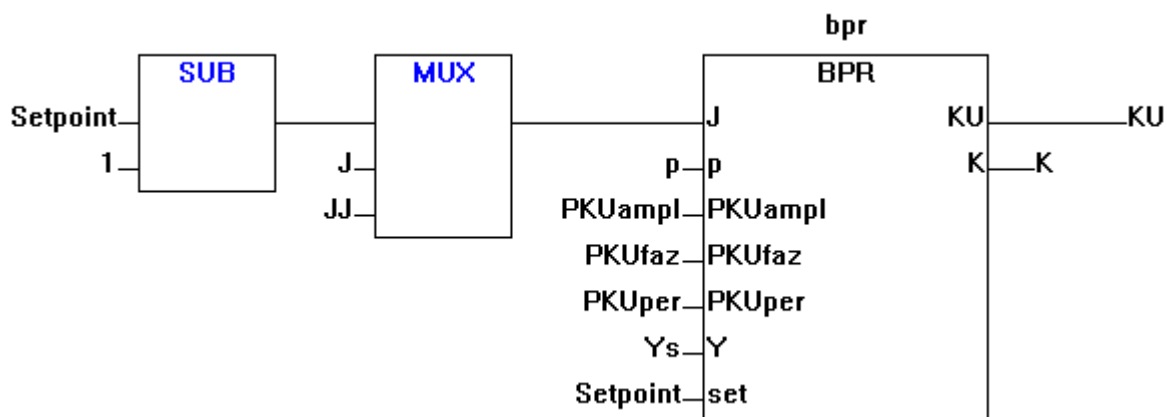


Рисунок 7.7 – Блок принятия решения

Программная реализация блоков на языке ST приведена в таблице Л.1 приложения Л.

Нечеткая логика реализована на языке ST. Блоки фаззификации и дефаззификации для ПКУ с амплитудным подавлением приведены на рисунке 7.8. На блок фаззификации поступает сигнал модуля ошибки регулирования и скорости изменения ошибки регулирования. Сигналы с блока фаззификации поступают на блок дефаззификации, где на основе базы правил осуществляется выбор постоянной времени ПКУ.

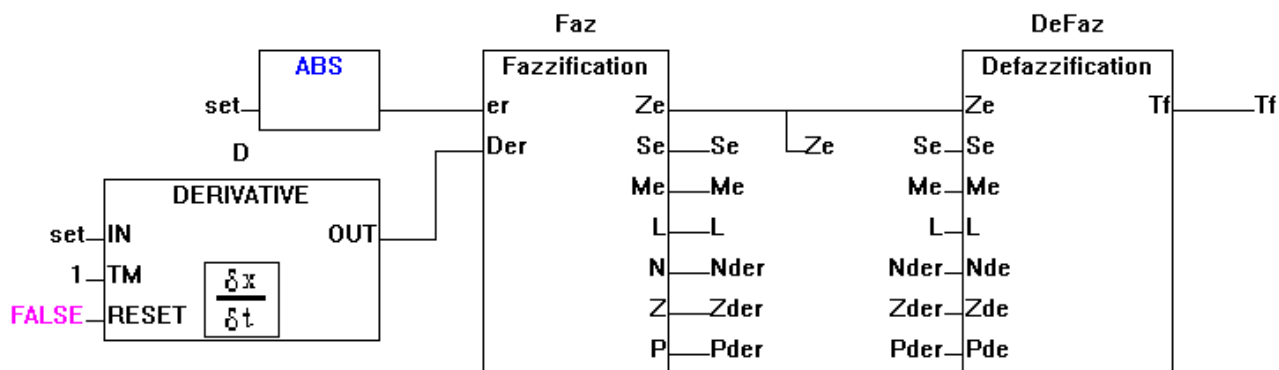


Рисунок 7.8 – Блоки нечеткой логики

На рисунке 7.9 показана визуализация и переходный процесс в САР с адаптивным псевдолинейным нечетким регулятором.

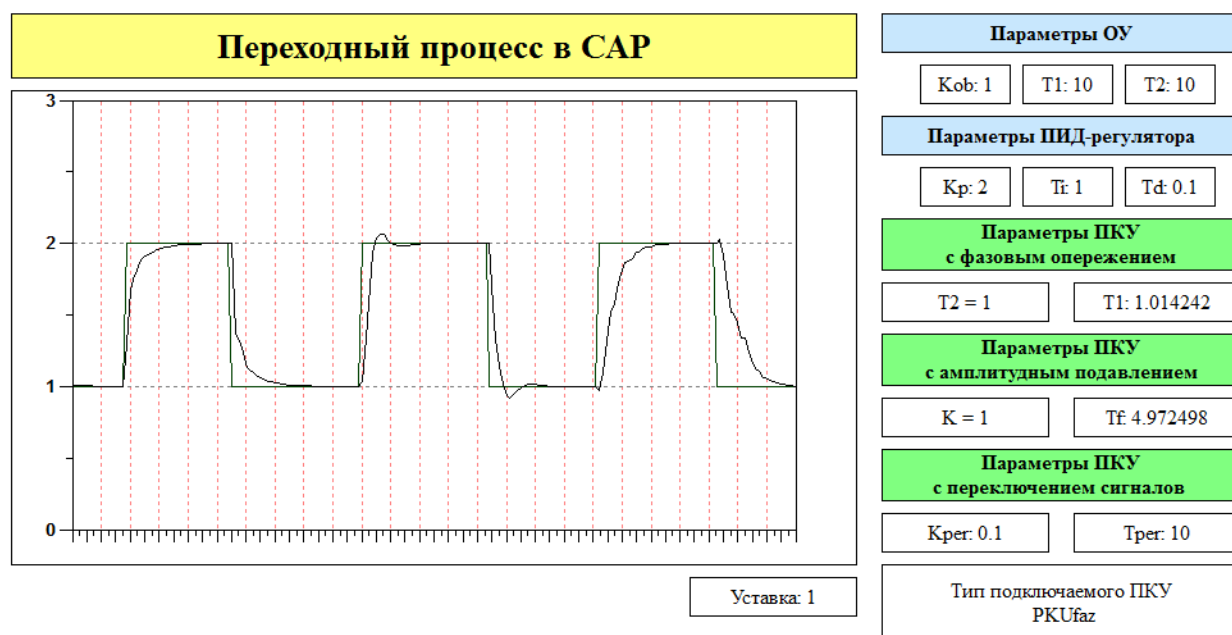


Рисунок 7.9 – Визуализация программы

Таким образом, данная программа может быть использована для улучшения качества регулирования объектами с нестационарными параметрами. Данная программа расширяет возможности САР с ПИД-регуляторами и позволяет улучшить качество регулирования.

8 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.

8.1 Организация и планирование работ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально 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.

Данная ВКР имеет небольшой штат исполнителей, состоящий из научного руководителя проекта (НР) и инженера (И), а так же не предполагает высоких затрат, то при составлении плана комплекса работ будет использоваться линейный метод.

Перечень работ разбит на следующие этапы:

- подготовительный;
- исследование и анализ предметной области;
- разработка программного обеспечения;
- оформление документации.

Порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Перечень работ		Исполнители	Загрузка исполнителей
Подготовительный этап			
1	Составление задания, постановка целей и задач	НР	НР – 100%
2	Поиск литературы	И, НР	И – 50% НР – 50%
3	Ознакомление с пакетом программирования контроллера SIMATIC S7-400	И	И – 100%
4	Ознакомление с АВК-6	И	И – 100%
5	Изучение корректирующих устройств и принципов построения исследуемых регуляторов	И	И – 100%
Исследование и анализ предметной области			
6	Исследование псевдолинейных корректирующих устройств	И, НР	И – 80% НР – 20%
7	Исследование и анализ структуры нечетких регуляторов	И, НР	И – 70% НР – 30%
8	Исследование и анализ псевдолинейных нечетких регуляторов	И, НР	И – 70% НР – 30%
9	Исследование и анализ адаптивных псевдолинейных нечетких регуляторов	И, НР	И – 70% НР – 30%
Разработка программного обеспечения			
10	Проектирование нечеткого псевдолинейного регулятора на контроллере SIMATIC S7-400	И	И – 100%
11	Проведение экспериментальных исследований	И, НР	И – 70% НР – 30%
12	Редактирование и отладка программы	И, НР	И – 70% НР – 30%
13	Анализ результатов работы	И, НР	И – 60% НР – 40%
Оформление документации			
14	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	И	И – 100%
15	Социальная ответственность	И	И – 100%
16	Английская часть	И	И – 100%
17	Составление и оформление пояснительной записки	И, НР	И – 90% НР – 10%
18	Защита дипломного проекта	И	И – 100%

8.1.1 Продолжительность этапов работ

Трудоемкость и продолжительность выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для

определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5},$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.; $t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, чел.-дн.; $t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой, чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i} \cdot 1.2,$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн., $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн., $Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней переводится в календарные дни:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях, T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях, $k_{\text{кал}}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$T_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}},$$

где $T_{\text{КАЛ}}$ – календарные дни ($T_{\text{КАЛ}} = 365$); $T_{\text{ВД}}$ – выходные дни в году; $T_{\text{ПД}}$ – праздничные дни в году.

$$T_K = \frac{365}{365-118} = 1,47.$$

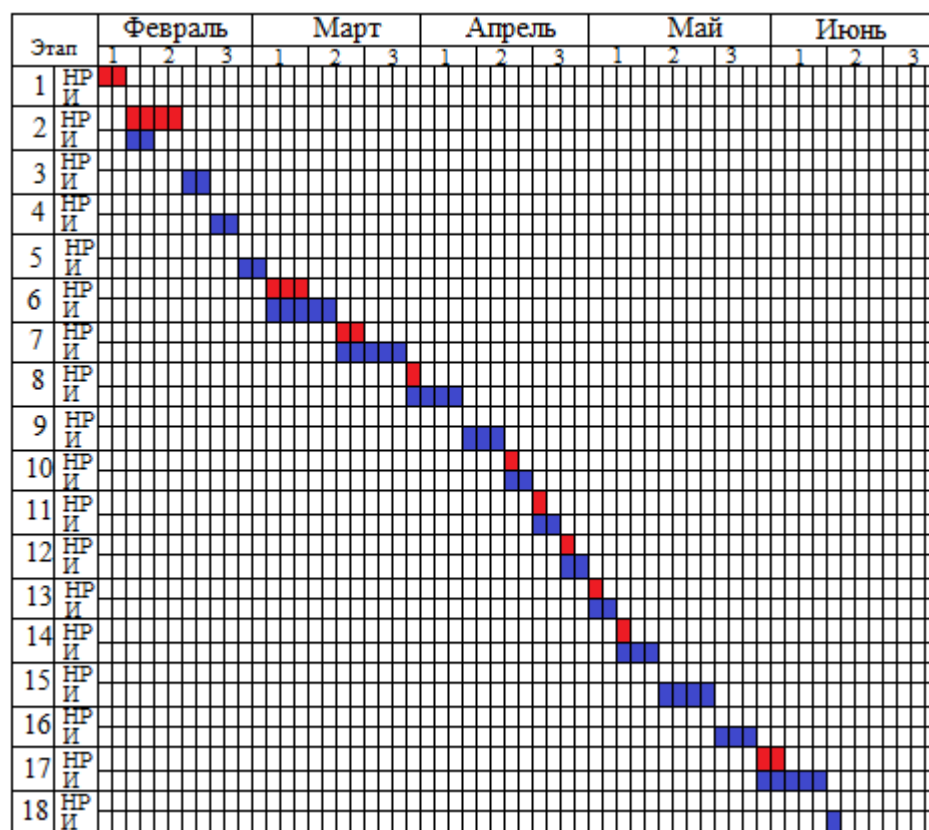
В таблице 8.2 приведены длительность этапов работ и число исполнителей, занятых на каждом этапе.

Таблица 8.2 – Временные показатели проведения научного исследования

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Длительность работ, чел/дн.			
					T _{рд}		T _{кд}	
		t _{min}	t _{max}	t _{ож}	НР	И	НР	И
1	НР	1	2	1,4	1,68	0	3	0
2	И, НР	5	8	6,2	7,44	2,8	11	4
3	И	2	4	2,8	0	3,36	0	5
4	И	2	4	2,8	0	3,36	0	5
5	И	2	4	2,8	0	3,36	0	5
6	И, НР	7	10	8,2	5,72	9,84	9	15
7	И, НР	7	10	8,2	4,8	9,84	7	15
8	И, НР	5	8	6,2	1,68	7,44	3	11
9	И, НР	2	4	2,8	1,68	3,36	3	5
10	И	3	6	4,2	0	5,04	0	8
11	И, НР	2	4	2,8	1,68	3,36	3	5
12	И, НР	2	4	2,8	1,68	3,36	3	5
13	И, НР	3	6	4,2	1,68	5,04	3	8
14	И	5	8	6,2	0	7,44	0	11
15	И	2	6	3,6	0	4,32	0	7
16	И	2	4	2,8	0	3,36	0	5
17	И, НР	7	10	8,2	3,36	9,84	5	15
18	И	1	2	1,4	0	1,68	0	3
Итого:		60	104		31,4	86,8	50	132

На основе таблицы 8.2 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта (таблица 8.3).

Таблица 8.3 – Календарный план график проведения НИР



8.1.2 Расчет накопления готовности проекта

Расчет накопления готовности проекта это оценка текущих состояний (результатов) работы над проектом. Величина накопления готовности работы показывает, на сколько процентов по окончании текущего (i -го) этапа выполнен общий объем работ по проекту в целом.

Степень готовности определяется формулой:

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

где $ТР_{общ.}$ – общая трудоемкость проекта; $ТР_i$ ($ТР_k$) – трудоемкость i -го (k -го) этапа проекта, $i = \overline{1, I}$; $ТР_i^H$ – 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, в нашем случае $m = 2$.

Наращение технической готовности работы и удельный вес каждого этапа приведены в таблице 8.4.

Таблица 8.4 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	ТР _i , %	СГ _i , %
Составление задания, постановка целей и задач	1,65	1,65
Поиск литературы	11,03	9,89
Ознакомление с пакетом программирования контроллера SIMATIC S7-400	3,68	12,64
Ознакомление с АВК-6	3,68	15,35
Изучение корректирующих устройств и принципов построения исследуемых регуляторов	3,68	18,13
Исследование псевдолинейных корректирующих устройств	17,65	31,32
Исследование и анализ структуры нечетких регуляторов	16,18	43,41
Исследование и анализ псевдолинейных нечетких регуляторов	10,29	51,10
Исследование и анализ адаптивных псевдолинейных нечетких регуляторов	5,88	55,49
Проектирование нечеткого псевдолинейного регулятора на контроллере SIMATIC S7-400	5,88	59,89
Проведение экспериментальных исследований	5,88	64,291
Редактирование и отладка программы	5,88	68,68
Анализ результатов работы	8,09	74,73
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	8,09	80,77
Социальная ответственность	5,15	84,62
Английская часть	3,68	87,36
Составление и оформление пояснительной записки	14,71	98,35
Защита дипломного проекта	2,21	100

8.2 Расчет сметы затрат на выполнение проекта

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

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- затраты научные и производственные командировки;
- контрагентные расходы;
- накладные расходы.

8.2.1 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 8.5.

Таблица 8.5 – Материальные затраты НТИ

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Тетрадь	52	1 шт.	52
Бумага для принтера формата А4	270	1 уп.	270
Ручка шариковая	28	2 шт.	56
Карандаш	15	1 шт.	15
Итого:			393

Расходы на материалы составили $Z_{\text{мат}} = 393$ рубля.

Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (т.н. транзакции). Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это $5 \div 20 \%$.

Таким образом, $Z_{\text{мат}} = 393 \cdot 1,05 = 412,65$ рублей.

8.2.2 Расчет 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 заработная плата рассчитывается по формуле:

$$З_{\text{ср/день}} = \frac{З_{\text{месяц}}}{F_{\text{дн}}}.$$

Расчеты затрат на основную заработную плату приведены в таблице 8.6. При расчете учитывалось, что в году 299 рабочих дня при шестидневной рабочей неделе и, следовательно, в месяце $F_{\text{дн}} = 24,92$ рабочих дня, а при пятидневной рабочей неделе в году 247 рабочих дней, в месяце $F_{\text{дн}} = 20,58$ рабочих дня. Затраты времени на выполнение работы по каждому исполнителю брались из таблицы 8.2. Также был принят во внимание районный коэффициент и премиальный коэффициент для НР равные $K_{\text{НР}} = 1,1$; $K_{\text{доп.ЗП}} = 1,188$; $K_p = 1,3$.

Таблица 8.6 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, раб. дни	Коэффициент	Фонд з/платы, руб.
НР	23 264,86	933,58	32	1,699	50756,98
И	7 864,11	382,12	87	1,62	53855,99
Итого:					104612,97

Таким образом, затраты на основную заработную плату составили

$$З_{\text{осн}} = 104612,97 \text{ рублей.}$$

8.2.3 Расчет затрат на социальный налог

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$З_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}),$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2017 год установлен размер страховых взносов равный 27%.

Таблица 8.7 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
НР	50756,98	–
И	53855,99	–
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	27%	
Итого:	28 245,50	

8.2.4 Расчет затрат на электроэнергию

Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию, потраченную в ходе выполнения проекта на работу используемого оборудования, рассчитываемые по формуле:

$$C_{\text{эл.об.}} = P_{\text{об}} \cdot t_{\text{об}} \cdot C_{\text{э}},$$

где $P_{\text{об}}$ – мощность, потребляемая оборудованием, кВт; $C_{\text{э}}$ – тариф на 1 кВт·час; $t_{\text{об}}$ – время работы оборудования, час.

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

Время работы оборудования вычисляется на основе итоговых данных таблицы 8.2 для инженера ($T_{\text{рд}}$) из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

$$t_{\text{об}} = T_{\text{рд}} \cdot K_{\text{т}},$$

где $K_{\text{т}} \leq 1$ – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к $T_{\text{рд}}$, определяется исполнителем самостоятельно.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{ном.}} \cdot K_{\text{с}},$$

где $P_{\text{ном.}}$ – номинальная мощность оборудования, кВт; $K_{\text{с}} \leq 1$ – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности. Для технологического оборудования малой мощности $K_{\text{с}} = 1$.

Расчет затрат на электроэнергию для технологических целей приведен в таблице 8.8.

Таблица 8.8 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{об}$, час	Потребляемая мощность $P_{об}$, кВт	Затраты $\mathcal{E}_{об}$, руб.
Персональный компьютер	696*0,6	0,35	768,37
Струйный принтер	10	0,15	7,91
Контроллер	348*0,6	0,05	10,44
Итого:			786,72

8.2.5 Расчет амортизационных расходов

В данном разделе рассчитывается амортизация используемого оборудования за время выполнения проекта. Оборудование, используемое при выполнении проекта (ПК, принтер, контроллер) используется уже больше полезного срока использования (срока амортизации), поэтому амортизационные отчисления равны нулю.

8.2.6 Расчет расходов, учитываемых непосредственно на основе платежных (расчетных) документов (кроме суточных)

За время проведения НИР аренда оборудования не проводилась, командировки отсутствовали, почтовых переводов не выполнялось.

8.2.7 Расчет прочих расходов

Прочие (накладные) расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д. Их величина определяется по следующей формуле:

$$C_{\text{проч.}} = (C_{\text{мат}} + C_{\text{зп}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{эл.об.}} + C_{\text{ам}} + C_{\text{нп}}) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы (10%).

$$C_{\text{проч}} = 0,1 \cdot (134\,087,84) = 13\,408,78 \text{ рублей.}$$

8.2.8 Расчет общей себестоимости разработки

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 8.9.

Таблица 8.9 – Расчёт бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	412,65
Основная заработная плата	104612,97
Отчисления в социальные фонды	28245,5
Расходы на электроэнергию	786,72
Амортизационные отчисления	0
Непосредственно учитываемые расходы	0
Прочие расходы	13405,78
Итого:	147 463,624

Таким образом, затраты на разработку составили

$$C = 147\,463,64 \text{ рублей.}$$

8.2.9 Расчет прибыли

Прибыль от реализации проекта составляет 15% от затрат на разработку проекта:

$$П = C * 0,15 = 22\,119,5436 \text{ рублей.}$$

5.2.9 Расчет НДС

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

$$\text{НДС} = (C + П) * 0,18 = 30\,524,97017 \text{ рублей.}$$

5.2.10 Цена разработки НИИ

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

$$Ц_{\text{НИИ(КР)}} = C + П + \text{НДС} = 200\,108,14 \text{ рублей.}$$

8.3 Оценка экономической эффективности проекта

В настоящее время все чаще возникает вопрос об эффективности и работоспособности систем. На большинстве производств постоянно происходит модернизация оборудования для уменьшения затрат.

Результат данной разработки характеризуется улучшением функционирования системы автоматического управления. В частности, изменяется принцип действия регулятора системы. Вместо традиционных ПИ, ПИД-регуляторов предлагается использовать регулятор на базе нечеткой логики с использованием псевдолинейного корректирующего устройства с адаптивной структурой. Данное объединение устройств позволяет существенно повысить эффективность регулирования:

- уменьшается колебательность системы, что сохраняет систему автоматического регулирования в устойчивом состоянии и не производит останов всего оборудования из-за превышения допустимого значения регулируемой величины;
- уменьшается время реагирования системы на 15-20%, тем самым обеспечивается снижение времени цикла технологического процесса;
- применение адаптивного регулятора позволяет обеспечить работоспособность системы в условиях широкого изменения динамических свойств объекта.

Выполнение научно-исследовательской работы оценивается уровнями достижения экономического, научного и научно-технического эффектов.

Научный эффект характеризует получение новых научных знаний и отображает прирост информации, предназначенной для внутри научного потребления. Научно-технический эффект характеризует возможность использования результатов в других проектах и обеспечивает получение информации, необходимой для создания новой техники. Экономический эффект данной разработки оценивать не корректно, т.к. данная разработка носит научно-теоретический характер и область дальнейшего внедрения неизвестна.

8.3.1 Оценка научно-технического уровня НИР

Научно-технический уровень характеризует влияние проекта на уровень и динамику обеспечения научно-технического прогресса в данной области. Для оценки научной ценности, технической значимости и эффективности, планируемых и выполняемых НИР, используется метод балльных оценок. Балльная оценка заключается в том, что каждому фактору по принятой шкале присваивается определенное количество баллов. Обобщенную оценку проводят по сумме баллов по всем показателям.

Сущность метода заключается в том, что на основе оценок признаков работы определяется интегральный показатель ее НТУ по формуле:

$$K_{\text{НТУ}} = \sum_{i=1}^3 R_i \cdot n_i,$$

где $K_{\text{НТУ}}$ – интегральный индекс 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.

Оценка НТУ НИР приведена в таблице 8.11.

Таблица 8.11 – Оценка научно-технического уровня НИР

Значимость	Фактор НТУ	Уровень фактора	Выбранный балл	Обоснование выбранного балла
0,4	Уровень новизны	Относительно новая	4	Улучшает качество регулирования САР
0,1	Теоретический уровень	Разработка способа	6	Разработка адаптивной структуры псевдолинейного регулятора
0,5	Возможность реализации	В течение первых лет	10	Быстрая реализация

Отсюда интегральный показатель научно-технического уровня для проекта составляет

$$K_{\text{НТУ}} = 0,4 \cdot 4 + 0,1 \cdot 0,6 + 0,5 \cdot 10 = 1,6 + 0,6 + 5 = 7,2.$$

Таким образом, при $K_{\text{НТУ}} = 7,2$ проект имеет средний уровень научно-технического эффекта.

9 Социальная ответственность

Аннотация

В соответствии с международным стандартом [86], социальная ответственность – ответственность организации за воздействие ее решений и деятельности на общество и окружающую среду через прозрачное и этическое поведение, которое:

- содействует устойчивому развитию, включая здоровье и благосостояние общества;
- учитывает ожидания заинтересованных сторон;
- соответствует применяемому законодательству и согласуется с международными нормами поведения (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность);
- интегрировано в деятельность всей организации и применяется во всех ее взаимоотношениях (включая промышленную безопасность и условия труда, экологическую безопасность).

Введение

По мере развития научно-технического прогресса возрастает и количество используемого оборудования работниками в вычислительных центрах. При работе с ЭВМ человек подвергается различным воздействиям вредных производственных факторов, таких как электростатическое поле, электромагнитное излучение, шум и вибрации, также идет большая нагрузка на зрение и на костно-мышечную систему. В связи с этим, главной задачей при решении специалистами инженерных задач, является обеспечение безопасности в данной научной области или проектно-конструкторских разработок.

Объектом исследования по техническому заданию является адаптивная САР с псевдолинейным нечетким регулятором. Исследование данной САР проводится на персональном компьютере (ПК) путем моделирования системы управления специальными программными средствами.

В данном разделе ВКР приводится характеристика рабочего места и рабочей зоны, а так же результаты анализа вредных и опасных факторов труда, негативно воздействующих на деятельность работников и окружающую среду. Даны рекомендации по улучшению рабочего места и снижения действия вредных факторов, а также мероприятия при чрезвычайных ситуациях.

9.1 Производственная безопасность

9.1.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования при эксплуатации и внедрении

Производственная безопасность – это состояние защищенности производственного персонала от вредных воздействий технологических процессов, энергии, средств, предметов, условий и режима труда на производстве.

Вопросы влияния основных производственных факторов на состояние здоровья работников рассматривает производственная санитария.

К основным опасным и вредным производственным факторам по природе действия относят [87]:

- физические;
- химические;
- биологические;
- психофизиологические.

Анализ выявленных опасных и вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого объекта приведен в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Анализ опасных и вредных факторов

Источник фактора, наименование видов работ	Факторы		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
• Работа с ПЭВМ на посту оператора. • Управление механизмами переключения. • Выполнение визуальных осмотров всех основных и вспомогательных механизмов до начала их использования при выполнении работ.	• температура окружающей среды; • относительная влажность; • скорость движения воздуха; • естественные освещение; • напряженность зрения; • шума; • напряжённость электрического поля; • напряженность труда в течение смены; • электромагнитные излучения.	• электрический ток; • накопление статического электричества; • производственная пожароопасная среда природы.	• Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений СанПиН 2.2.4-548-96. • Нормы естественного и искусственного освещения предприятий, СНиП 23-05-95. • Допустимые уровни шумов в производственных помещениях. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ. • Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы, СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. • Защитное заземление, зануление, ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ.

Выявленные факторы могут влиять на состояние здоровья, привести к травмо-опасной или аварийной ситуации, поэтому следует установить эффективный контроль за соблюдением норм и требований, предъявленных к их параметрам.

9.1.2 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов

Существующие нормы устанавливают санитарные зоны, требования к расположению производственных зданий и наличию в них всех необходимых санитарно-бытовых помещений, обеспечение, как питьевой водой, так и водой

для технических целей, устройство рабочих помещений с учетом необходимой производственной площади, освещения, отопления и вентиляции.

Микроклимат

Для обеспечения благоприятных условий работы, соответствующих физиологическим потребностям человеческого организма, санитарные нормы устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия в рабочей зоне помещения. Рабочая зона ограничивается высотой 2,2 м над уровнем пола, где находится рабочее место. При этом нормируются [88,91]: температура, относительная влажность и скорость движения воздуха.

По степени физической тяжести работа инженера-программиста относится к категории лёгких работ. В соответствии с временем года и категорией тяжести работ определены оптимальные параметры микроклимата согласно требованиям [3] и приведены в таблице 9.2.

Таблица 9.2 – Оптимальные параметры микроклимата рабочего места

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Температура окружающих поверхностей, °С	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1a	23-25	40-60	21-25	0,1
Теплый	1a	20-22	40-60	22-26	0,1

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах представлены в таблице 9.3.

Таблица 9.3 – Допустимые параметры микроклимата рабочего места

Период года	Категория работ	Температура воздуха, °С	Относительная влажность воздуха, %	Температура окружающих поверхностей, °С	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1a	20-25	15-75	19-26	0,1
Теплый	1a	21-28	15-75	20-29	0,1-0,2

В зимнее время в помещении предусмотрена система отопления согласно [89]. Она обеспечивает достаточное, постоянное и равномерное нагревание воздуха. Радиаторы должны устанавливаться в нишах, прикрытых деревянными или металлическими решетками. Применение таких решеток способствует также повышению электробезопасности в помещениях. При этом температура на поверхности нагревательных приборов не должна превышать 95 °С, чтобы исключить пригорание пыли.

Для обеспечения установленных норм микроклиматических параметров и чистоты воздуха на рабочих местах и в помещениях применяют вентиляцию. Общеобменная вентиляция используется для обеспечения в помещениях соответствующего микроклимата. Периодически должен вестись контроль влажностью воздуха. В летнее время при высокой уличной температуре должны использоваться системы кондиционирования.

Освещение

Правильное освещение помещений и рабочих зон одно из главных условий создания безопасных и благоприятных условий труда. При пониженной освещенности притупляется зрение, понижается общая работоспособность и производительность труда, возрастает количество брака, повышается опасность производственного травматизма, низкая освещенность способствует развитию близорукости.

По санитарно-гигиеническим нормам рабочее место должно иметь естественное и искусственное освещение. При работе должен быть отчетливо виден процесс деятельности, без напряжения зрения и прямого попадания лучей источника света в глаза.

Работа за компьютером относится к IV разряду зрительной работы средней точности. Наименьший размер объекта различения составляет 0.5 - 1 мм. По нормам [90,91] рекомендуемая освещенность помещения представлена в таблице 9.4.

Таблица 9.4 – Нормы освещенности на рабочем месте

Разряд зрительной работы	Характеристика	Подразряд	Освещенность (комбинированная система), Лк	Освещенность (общая система), Лк
IV	Средней точности	Б	500	200

Требования к освещению рабочих мест, оборудованных персональным компьютером, показаны в таблице 9.5 в соответствии с нормами [91].

Таблица 9.5 – Требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК

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

Искусственное освещение осуществляется с использованием газоразрядных люминесцентных ламп низкого давления типа ЛБ-40, в количестве 9 светильников в каждом по 4 лампы.

*Расчет системы искусственного освещения на рабочем месте
оператора поста управления*

Расчет системы искусственного освещения проводится для прямоугольного помещения, размерами: длина $A = 5$ (м), ширина $B = 3$ (м), высота $H = 2,5$ (м), количество ламп $N = 4$ (шт).

Вычисления будут, производится по методу светового потока, предназначенного для расчета освещенности общего равномерного освещения горизонтальных поверхностей. Согласно отраслевым нормам освещенности

уровень рабочей поверхности над полом составляет 0,8 (м) и установлена минимальная норма освещенности $E = 300$ (Лк).

Световой поток лампы накаливания или группы люминесцентных ламп светильника определяется по формуле:

$$\Phi = E_n \cdot S \cdot K_z \cdot Z \cdot 100 / (n \cdot \eta), \quad (9.1)$$

где E_n – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05-95, (Лк); S – площадь освещаемого помещения, (m^2); K_z – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т.е. отражающих поверхностей), (наличие в атмосфере цеха дыма), пыли; Z – коэффициент неравномерности освещения (для люминесцентных ламп $Z = 1,1$) ; n – число светильников; η - коэффициент использования светового потока, (%); Φ – световой поток, излучаемый светильником.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ($\rho_{ст}$) и потолка ($\rho_{п}$).

Индекс помещения определяется по формуле

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)}. \quad (9.2)$$

Коэффициенты отражения оцениваются субъективно.

Произведем расчет высоты подвеса светильников над рабочей поверхностью:

$$h = H - 0,8 = 2,5 - 0,8 = 1,7 \text{ (м)}. \quad (9.3)$$

Экономичность осветительной установки зависит от отношения, представленного в формуле:

$$l = \frac{L}{h}, \quad (9.4)$$

где L – расстояние между рядами светильников, м.

Рекомендуется размещать люминесцентные лампы параллельными рядами, принимая $l = 1,4$, отсюда расстояние между рядами светильников:

$$L = l \cdot h = 1,7 \cdot 1,4 = 2,38 \text{ (м)}. \quad (9.5)$$

Два ряда светильников будут расположены вдоль длинной стены помещения. Расстояние между двумя рядами светильников и стенами вычисляется по формуле:

$$Л = \frac{B-L}{2} = \frac{3-2,38}{2} = 0,31 \text{ (м)}. \quad (9.6)$$

Определим индекс помещения вычисляя по формуле (9.2) получаем:

$$i = \frac{15}{(5 + 3) \cdot 1,7} = 1,10.$$

Найдем коэффициенты отражения поверхностей стен, пола и потолка. Так как поверхность стен окрашена в серый цвет, свежепобеленные с окнами без штор, то коэффициент отражения поверхности стен $P_{\text{ст}} = 50\%$. Так как поверхность потолка светлый окрашенный, то коэффициент отражения поверхности потолка $P_{\text{п}} = 30\%$.

Учитывая коэффициенты отражения поверхностей стен, потолка и индекс помещения i , определяем значение коэффициента $\eta = 36\%$.

Подставив все значения в формулу (9.1), по которой рассчитывается световой поток одного источника света, получаем:

$$\Phi = \frac{300 \cdot 15 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{4 \cdot 0,36} = 5156 \text{ (лм)}.$$

По полученному световому потоку подбираем лампу, наиболее подходящей является лампа ЛБ 80 со световым потоком 5200 (лм).

Выразим E из формулы (9.1):

$$E = \frac{F \cdot N \cdot \eta}{k} = \frac{5200 \cdot 4 \cdot 0,36}{1,5 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 302,54 \text{ (лм)}.$$

Как видно из расчета, минимальная освещенность в пределах нормы.

Для того чтобы доказать, что использование люминесцентной лампы ЛБ-80 является наиболее рациональным, рассчитаем необходимое количество светильников по формуле:

$$N = \frac{(E \cdot k \cdot S \cdot Z)}{(n \cdot \eta \cdot F)}, \quad (9.7)$$

где E – норма освещенности $E = 300$ (Лк); k – коэффициент запаса учитывающий старение ламп и загрязнение светильников, $k = 1,5$; S – площадь помещения; Z – коэффициент неравномерности освещения, $Z = 1,1$; n – число рядов светильников, $n = 2$; η – коэффициент использования светового потока, $\eta = 0,36$; F – световой поток, излучаемый светильником.

Подставим численные значения в формулу (9.7), получим количество светильников в одном ряду:

$$N = \frac{300 \cdot 1,5 \cdot 15 \cdot 1,1}{2 \cdot 5200 \cdot 0,36} = \frac{7425}{3744} \approx 1,98 \approx 2(\text{шт}).$$

Длина одного светильника равна 1,5 (м), в одном светильнике 2 лампы ЛБ 80. План размещения светильников приведен на рисунке 9.1

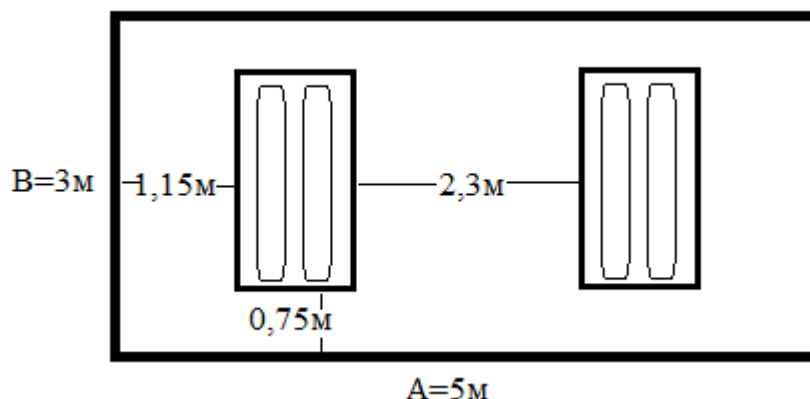


Рисунок 9.1 – План размещения светильников

Так как в рассматриваемом помещении количество ламп 4 (шт), по одному светильнику в двух рядах, следовательно, нормы безопасности по искусственному освещению в данном случае соблюдены.

Шум

Шум оказывает негативное влияние на весь организм человека. Шумы средних уровней (менее 80 дБА) не вызывают потери слуха, но тем не менее оказывают утомляющее неблагоприятное влияние: невнимательность, раздражительность, заторможенность и т.д. Продолжительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха или даже к его полной потере.

Стандарт [92] распространяется на технологическое оборудование, машины и другие источники шума, которые создают в воздушной среде все виды шумов.

Предельно допустимые нормы [93] уровня шума для рабочих мест приведены в таблице 9.6.

Таблица 9.6 – Допустимые уровни звукового давления и уровня звука на рабочих местах

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в активной полосе частот, Гц								Уровни звука, дБ
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
А	71	61	54	49	45	42	40	38	50

А – помещение конструкторских бюро, лаборатории для теоретических работ.

Уровень шумов от компьютеров (шум вентиляторов системы охлаждения) соответствует пункту А таблицы 8.5, т.е. его уровень соответствует норме. Для устранения шума необходимо прочистить вентилятор от пыли или заменить полностью.

Электромагнитные излучения и напряжённость электрического поля

Энергетическое влияние электромагнитного излучения может быть различной степени и силы. От неощутимого человеком (что наблюдается наиболее часто) до теплового ощущения при излучении высокой мощности, но подобный эффект проявляет себя только при превышении допустимого уровня.

Согласно [91] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг монитора по электрической составляющей должна быть не более 25 В/м в диапазоне частот 5 Гц ÷ 2 кГц, и не более 2,5 В/м в диапазоне частот 2 кГц ÷ 400кГц. Плотность магнитного потока должна быть не более 250 нТл в диапазоне частот 5 Гц ÷ 2 кГц, и не более 25 нТл в диапазоне частот 2 кГц ÷ 400кГц. Электростатический потенциал экрана видеомонитора 500 В.

Помимо электромагнитного излучения, при работе компьютера образуется электростатическое поле, оно способно деионизировать окружающий воздух. Компьютер, при долгой работе, нагревается, что делает воздух не только слабо ионизированным, но и сухим. Такой воздух является очень вредным, он тяжелый для дыхания и способствует, при благоприятной среде, развитию многих аллергических заболеваний и, соответственно болезней органов дыхания.

Способы защиты от электромагнитных излучений:

- использование жидкокристаллический монитор, т.к. его излучение значительно меньше, чем у мониторов с электроннолучевой трубкой;
- расположение монитора и системного блока компьютера максимально удаленно от оператора;
- сокращение времени работы за компьютером, в зоне использования беспроводных устройств (модемов, радиотелефонов, Wi-Fi) и увеличение количества перерывов в работе;
- применение ионизаторов воздуха для увеличения количества легких отрицательных ионов в воздухе.

Электробезопасность

ПЭВМ и периферийные устройства являются потенциальными источниками опасности поражения человека электрическим током. При работе с компьютером возможен удар током при соприкосновении с токоведущими частями оборудования.

Согласно [91,96] рабочие места с ПЭВМ должны быть оборудованы защитным занулением; подача электрического тока в помещение должна осуществляться от отдельного независимого источника питания; необходима изоляция токопроводящих частей и ее непрерывный контроль; должны быть предусмотрены защитное отключение, предупредительная сигнализация и блокировка.

Помещение, в котором расположено рабочее место, относится к категории без повышенной опасности, и соответствует установленным

условиям согласно с [94]: напряжение питающей сети 220 В, 50 Гц; относительная влажность воздуха 50%; средняя температура около 24°C; наличие непроводящего полового покрытия.

Характерными причинами несчастных случаев, вызванных поражением электрическим током, являются:

- случайные прикосновения людей к оголенным проводам и оборванным концам воздушной сети, находящейся под напряжением;
- появление напряжения там, где его в нормальных условиях не должно быть;
- выполнение работ на распределительных устройствах и транспортных подстанциях без отключения напряжения и без соблюдения необходимых мер безопасности;
- неудовлетворительное ограждение токоведущих частей установок от случайного прикосновения;
- неудовлетворительное заземление электропроводок при их эксплуатации;
- оставление электроустановок без надзора;
- несоблюдение элементарных требований безопасности.

К средствам коллективной защиты от статического электричества относятся [95]:

- заземляющие устройства;
- нейтрализаторы;
- увлажняющие устройства;
- антиэлектростатические вещества;
- экранирующие устройства.

Организационные и технические мероприятия по обеспечению электробезопасности [97]:

- к работе в электроустановках должны допускаться лица, прошедшие инструктаж и обучение безопасным методам труда, проверку

знаний правил безопасности и инструкций в соответствии с занимаемой должностью;

- назначение лиц, ответственных за организацию и безопасность производства работ;
- оформление наряда или распоряжения на производство работ;
- осуществление допуска к проведению работ;
- организация надзора за проведением работ;
- оформление окончания работы, перерывов в работе, переводов на другие рабочие места;
- установление рациональных режимов труда и отдыха.

Психофизиологические факторы

Психофизиологические опасные и вредные производственные факторы по характеру действия подразделяются на физические перегрузки и нервно-психические перегрузки.

Наиболее эффективные средства предупреждения утомления при работе на производстве – это средства, нормализующие активную трудовую деятельность человека. На фоне нормального протекания производственных процессов одним из важных физиологических мероприятий против утомления является правильный режим труда и отдыха[91].

По нормам [91] на протяжении рабочего дня должны быть регламентированы перерывы для качественной работы. Время перерывов в течение рабочей смены устанавливается с учетом её длительности, вида и категории трудовой деятельности.

Техника безопасности на производстве

К мероприятиям по предупреждению несчастных случаев относятся:

- постоянный административно-общественный контроль состояния техники безопасности;
- ведение журналов: инструктажей, периодических осмотров оборудования, заземления, контроля изоляции и т. д.;

- составление актов о проведенных испытаниях для возможности дальнейшей эксплуатации средств защиты, приборов, инструментов, оборудования;

- рациональная расстановка оборудования;
- обеспечение работников необходимой технической документацией;
- устройство дополнительных предохранительных и защитных приспособлений, блокировок, дублирующих средств безопасности на производственном оборудовании;

- механизация уборки производственных помещений, очистки и протирки осветительной арматуры, окон, вентиляционных установок;

- изготовление и применение знаков безопасности.

К мероприятиям по предупреждению заболеваний на производстве относятся:

- проведение предварительного медицинского освидетельствования и периодических медицинских осмотров;

- содержание рабочих и бытовых помещений в надлежащем санитарном состоянии;

- своевременный ремонт зданий и оборудования;
- применение приспособлений для снижения шума, вибрации;
- устройство эффективной вентиляции помещений;
- улучшение естественного и искусственного освещения (установка дополнительных фонарей, светильников).

К общесанитарным мероприятиям относятся:

- установление рационального режима труда и отдыха;
- оборудование рабочих мест аптечками;
- обеспечение при проектировании производственных зданий нормальных метеорологических условий производственной среды;
- устранение вредного воздействия пыли и ядовитых веществ.

9.2 Экологическая безопасность

9.2.1 Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду

В результате выполнения ВКР была разработана система, которая функционирует на основе ПК и ПЛК.

Системы ПЛК спроектированы для использования в стационарных, защищенных от внешних воздействий условиях, поэтому на окружающую среду влияния во время работы объект исследования не оказывают.

9.2.2 Анализ влияния процесса эксплуатации объекта на окружающую среду

Основное влияние на окружающую среду в вычислительных центрах является утилизация бытовых отходов, люминесцентных ламп, вредных отходов в виде отработанных ПК, их компонентов и содержащихся в них вредных веществ

Основной проблемой охраны окружающей среды. Все люминесцентные лампы содержат ртуть (в дозах от 1 до 70 мг), ядовитое вещество 1-го класса опасности. Эта доза может причинить вред здоровью, если лампа разбилась, и если постоянно подвергаться пагубному воздействию паров ртути, то они будут накапливаться в организме человека, нанося вред здоровью.

9.2.3 Обоснование мероприятий по защите окружающей среды

Хранение и удаление отходов (в данном случае - люминесцентных ламп) осуществляются в соответствии с требованиями экологической безопасности [98]. Наполненную тару с отходами закрывают герметически стальной крышкой, при необходимости заваривают и передают по договору специализированным предприятиям, имеющим лицензию на их утилизацию.

Программируемые логические контроллеры, могут утилизироваться, так как не содержат токсических материалов. Для безопасной с точки зрения охраны окружающей среды утилизации и удаления старых устройств необходимо обратиться к компании фирмы производителя, имеющей сертификат на утилизацию и удаления лома электронного оборудования.

9.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

9.3.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований

Исследования объекта управления проводятся на основе ПК и ПЛК, поэтому основной чрезвычайной ситуацией на рабочем месте оператора могут быть – возгорание (пожар).

Возгорание может произойти как по причине короткого замыкания в проводках компьютера или контроллера, а также нарушения правил эксплуатации.

Основной причиной возникновения коротких замыканий является нарушения изоляции электрооборудования. Нарушения изоляции вызываются: перенапряжениями (особенно в сетях с изолированными нейтралями), прямыми ударами молнии, старением изоляции, механическими повреждениями изоляции, проездом под линиями негабаритных механизмов, неудовлетворительным уходом за оборудованием.

Часто причиной повреждений в электрической части электроустановок являются неквалифицированные действия обслуживающего персонала.

9.3.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на производстве при внедрении объекта исследований

Пожары на предприятиях и в быту приносят значительный материальный ущерб, поэтому пожарной безопасности уделяют особое внимание. В соответствии с нормами пожарной безопасности [99], помещения с ЭВМ относятся к категории В (пожароопасные).

Основные причины возникновения возгораний:

- нарушение правил эксплуатации электрического оборудования, эксплуатация его в неисправном состоянии;
- перегрузка электрических сетей;
- применение неисправных осветительных приборов, электропроводки и устройств, дающих искрение, замыкание и т. п.;
- курение в неустановленных местах.

9.3.3 Обоснование мероприятий по предотвращению ЧС и разработка порядка действия в случае возникновения ЧС

Для предупреждения возгораний в помещении необходимо соблюдать следующие мероприятия:

- соблюдать установленный режим эксплуатации электрических сетей, компьютеров и других устройств;
- соблюдать противопожарные нормы и правила при установке оборудования;
- проводить технические осмотры и планово-предупредительные ремонты оборудования и технических средств противопожарной защиты и пожаротушения (огнетушители) согласно утвержденного графика.

Рабочее место оператора поста управления, должно соответствовать требованиям ФЗ Технический регламент по ПБ и норм пожарной безопасности (НПБ 105-03) и удовлетворять требованиям по предотвращению и тушению пожара по ГОСТ 12.1.004-91 и СНиП 21-01-97.

В помещении должен быть установлен углекислотный огнетушитель типа ОУ-5 для тушения пожаров.

При возникновении пожара здание необходимо покидать в соответствии с планом эвакуации, которые размещены на каждом этаже (рисунок 9.2).

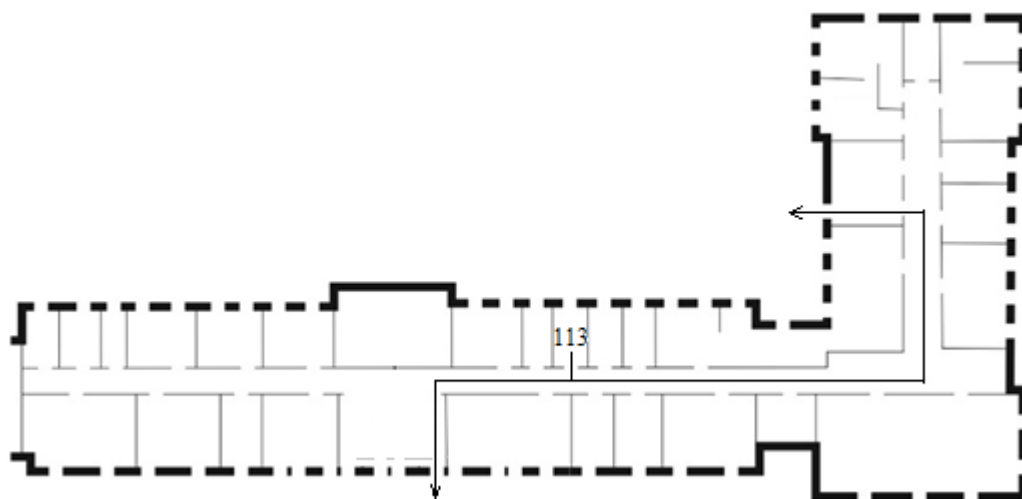


Рисунок 9.2 – План эвакуации при пожаре и других ЧС из помещения учебного корпуса №10, пр. Ленина, 2 - 1 этаж, 113 аудитория

Для защиты жизни и здоровья персонала следует применять следующие основные мероприятия, являющиеся составной частью мероприятий ЧС [100,101]:

- эвакуацию из зон ЧС;
- использование средств индивидуальной защиты органов дыхания и кожных покровов;
- проведение мероприятий медицинской защиты;
- проведение аварийно-спасательных и других неотложных работ в зонах ЧС;
- выполнение эколого-защитных, отраслевых или ведомственных требований и правил;
- проведение комплекса организационных, экономических, эколого-защитных, санитарно-гигиенических, санитарно-эпидемиологических и специальных мероприятий.

9.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

9.4.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства

При разработке проектных решений в вычислительных центрах не обязателен режим сокращенного рабочего дня, достаточно установление перерывов в работе.

Работа в вычислительном центре относится к классу 2 – допустимые условия труда, при которых уровень факторов среды и трудового процесса, не превышает уровней, установленных гигиеническими нормативами для рабочих мест, а возможные изменения функционального состояния организма восстанавливаются во время регламентированного отдыха или к началу следующей смены. В связи с этим дополнительных льгот и компенсаций работникам этой области не предусмотрено.

Органы, регулирующие соблюдение федерального законодательства и нормативных правовых актов: Федеральная инспекция труда, Государственная

экспертиза условий труда Федеральная служба по труду и занятости населения (Минтруда России Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Госгортехнадзор, Госэнергонадзор, Госатомнадзор России) Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (Госсанэпиднадзор России)).

Как основные, можно выделить следующие нормы из Трудового кодекса по организации труда:

1. Организация рабочих мест.
2. Оформление трудовых отношений.
3. Рабочее время и время отдыха работников.
4. Оплата и нормирование труда.
5. Ответственность за нарушение трудового законодательства и иных

актов, содержащих нормы трудового права.

9.4.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

Главными элементами рабочего места программиста или оператора являются стол и кресло. Основным рабочим положением является положение сидя.

При организации рабочего места в вычислительном центре необходимо учитывать условия, показанные на рисунке 9.3.

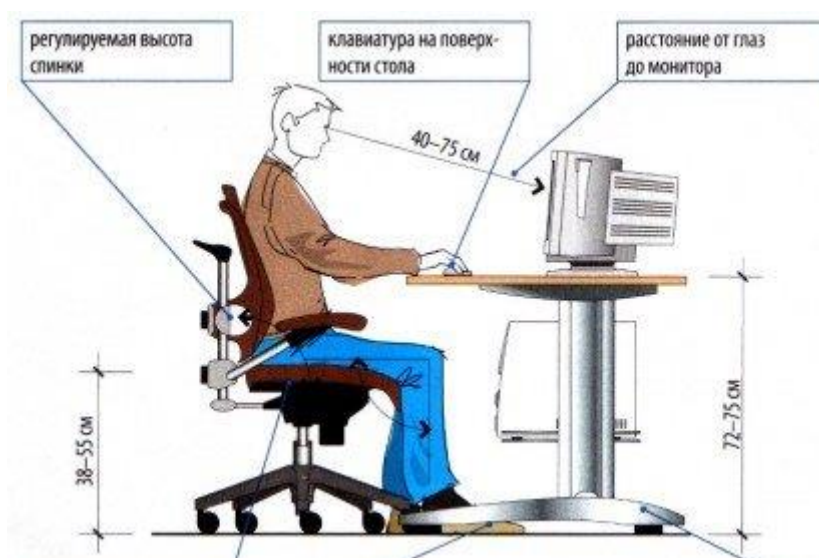


Рисунок 9.3 – Организация рабочего места в вычислительном центре

В лаборатории все указанные требования к организации выполняются, за исключением возможности регулирования спинки стула.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, расположено в зоне легкой досягаемости рабочего пространства.

Конструкцией рабочего места должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Выполнение трудовых операций «часто» и «очень часто» должно быть обеспечено в пределах зоны легкой досягаемости и оптимальной зоны моторного поля [102].

Моторное поле - пространство рабочего места, в котором могут осуществляться двигательные действия человека (рисунок 9.4).

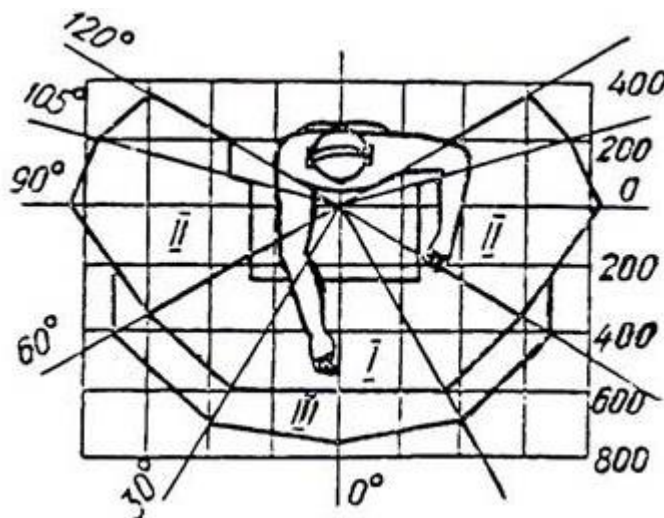


Рисунок 9.4 – Зоны для выполнения ручных операций и размещения органов управления: I - зона основных движений; II - зона вспомогательных движений; III - зона вне пределов досягаемости, но в пределах видимости приборов

Хорошим планировочным решением рабочей зоны является расположение информационных панелей вдоль одной из стен помещения, а место оператора в плане находится в вершине угла (не более 90°), образованного линиями, идущими от крайних точек панели. Это обусловлено тем, что при рассмотрении показаний приборов сбоку допустимый угол обзора

составляет 45° к нормали панели; при больших углах получаются значительные искажения.

Работающий за ПЭВМ должен сидеть прямо, опираясь в области нижнего края лопаток на спинку кресла, не сутулясь, с небольшим наклоном головы вперед (до $5-7^\circ$). Предплечья должны опираться на поверхность стола, снимая тем самым статическое напряжение плечевого пояса и рук.

Рабочее место должно быть оборудовано подставкой для ног, имеющей ширину не менее 300 мм, глубину не менее 400 мм, регулировку по высоте в пределах до 150 мм и по углу наклона опорной поверхности подставки до 20° . Поверхность подставки должна быть рифленой и иметь по переднему краю бортик высотой 10 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения выпускной квалификационной работы был разработан и исследован адаптивный псевдолинейный нечеткий регулятор. Адаптация в такой системе осуществляется путем изменения структуры и параметров псевдолинейного нечеткого регулятора. Изменение структуры регулятора осуществляется путем изменения типа корректирующего устройства, входящего в состав регулятора. В состав системы включены следующие корректирующие устройства: ПКУ с фазовым опережением, ПКУ с амплитудным подавлением, ПКУ с переключением сигналов.

Проведено исследование свойств адаптивной системы автоматического регулирования с псевдолинейным нечетким регулятором. Результаты исследования показали, что применение предложенного регулятора позволяет улучшить качество САР при изменении свойств и параметров объекта управления, а также позволяет обеспечить устойчивость САР при изменении параметров объекта управления в широких пределах.

Основным достоинством применения адаптивного псевдолинейного нечёткого регулятора является корректировка структуры регулятора в зависимости от состояния системы, что позволяет расширить область применения данного регулятора для нестационарных систем, у которых свойства объекта меняются как в узком так и в широком диапазонах.

По результатам исследования выработаны рекомендации по построению и применению адаптивного псевдолинейного нечеткого регулятора.

Программная реализация псевдолинейного нечеткого регулятора выполнена в среде Codesys на языках программирования FBD и ST. Данная программа может быть использована для улучшения качества регулирования объектами с нестационарными параметрами. Данная программа расширяет возможности САР с ПИД-регуляторами и позволяет улучшить качество регулирования. При этом никаких финансовых и аппаратных затрат не требуется.

CONCLUSION

As a result of performance of final qualification work the adaptive pseudo-linear fuzzy regulator has been developed and investigated. Adaptation in such system is carried out by change of structure and parameters of the pseudo-linear fuzzy regulator. Change of structure of the regulator is carried out by change type the correcting device which it is a part of the regulator. The structure of system has switched on the following correcting devices: PCD with a phase advancing, PCD with amplitude suppression, PCD with switching of signals.

Properties of adaptive system of automatic control with the pseudo-linear fuzzy regulator have been investigated. Results of a research have shown that use of the offered regulator allows to improve quality of ACS at change of properties and parameters of an object of control, and also allows to provide stability of ACS at change of parameters of an object of control over a wide range.

The main advantage of use of the adaptive pseudo-linear fuzzy regulator is correction of structure of the regulator depending on a condition of system that allows to expand a scope of this regulator for non-stationary systems at which properties of an object change both in narrow and in wide ranges.

By results of a research recommendations about construction and use of the adaptive pseudo-linear fuzzy regulator are developed

Program realization of the regulator is executed in the programming environment CodeSys at the FBD and ST programming languages. This program can be used for improvement of quality of regulation by objects with non-stationary parameters. This program expands possibilities of ACS with PID-regulators and allows to improve quality of regulation. At the same time financial and hardware expenses are not required.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СТУДЕНТА

1. Булавко, Е. С.. Псевдолинейный нечеткий регулятор = Pseudo-linear fuzzy controller [Электронный ресурс] / Е. С. Булавко; науч. рук. В. Н. Скороспешкин // Современные техника и технологии сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2015 . — Т. 2 . — [С. 13-15] . — Свободный доступ из сети Интернет.
2. Булавко, Е. С.. Псевдолинейный нечеткий регулятор [Электронный ресурс] / Е. С. Булавко; науч. рук. В. Н. Скороспешкин // Молодежь и современные информационные технологии сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г.: в 2 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК) ; под ред. Т. Е. Мамоновой [и др.] . — 2016 . — Т. 1 . — [С. 183-184]. — Свободный доступ из сети Интернет.
3. Булавко, Е. С.. Корректирующие устройства систем автоматического регулирования с переключающими сигналами [Электронный ресурс] / Е. С. Булавко; науч. рук. В. Н. Скороспешкин // Молодежь и современные информационные технологии сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г.: в 2 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Институт кибернетики (ИК) ; под ред. В. С. Аврамчук [и др.] . — Томск : Изд-во ТПУ , 2016 . — Т. 1 . — [С. 287-289] . — Заглавие с титульного экрана. — [Библиогр.: с. 288-289 (3 назв.)]. — Свободный доступ из сети Интернет.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Улучшение качества процесса управления в корректирующих средствах [Электронный ресурс]: Теория система автоматического управления. 2009. – Режим доступа: <http://www.tehnoinfo.ru/teorijasistempravlenija/52.html>, свободный.
2. Воронов А.А. Теория автоматического управления, Ч.1. — М.: Высшая школа, 1986. — 367 с.
3. Рачков М.Ю. Технические средства автоматизации: Учебник. – 2-е изд., стереотип. – М.: МГИУ, 2009. – 185с.
4. Теория автоматического управления [Электронный ресурс]://Твоя книжная полка. Режим доступа: <http://www.krivda.net>, свободный.
5. Юревич Е.И. Теория автоматического управления, М.: Энергия, 1969. – 375с.
6. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1972. – 768 с.
7. Топчеев Ю.И. Нелинейные системы автоматического управления. – М.: Машиностроение, 1971. – 470с.
8. Лурье Б.Я. Классические методы автоматического управления. – БВХ: Петербург, 2004. – 632с.
9. Попов Е.П., Пальтов И.П. Приближенные методы исследования нелинейных автоматических систем. – М.: Физматгиз, 1960. – 790с.
10. Лучко С.В., Федоров С.М. О синтезе псевдолинейных корректирующих устройств, Извн. АН СССР, Техническая кибернетика, 1974. – №5.
11. Поправка Г.Н., Скороспешкин В.Н. Псевдолинейные корректирующие устройства систем автоматического регулирования // Современные техника и технологии сборник трудов XIX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-19 апреля 2013 г.: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2013 . — Т. 2 . — [С. 327-328].
12. Скороспешкин М.В. Псевдолинейный регулятор // Автоматика и программная инженерия. – 2013. – №3(5). – с.27-29

13. Зайцев Г.Ф. Теория автоматического управления и регулирования. – Киев: Выща школа, 1989. – 431с.
14. Никифоров Д.Г., Скороспешкин М.В. Псевдолинейное двуканальное корректирующее устройство систем автоматического регулирования // Современные техника и технологии: сборник трудов XX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-18 апреля 2014 г. в 3 т. / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2014. — Т. 2. — [С. 223-224].
15. Jing Liu, Comparative study of differentiation and integration techniques for feedback control systems, Cleveland State University, 2002. – 96 с.
16. Clegg, J.C., “A Nonlinear Integrator for Servomechanisms”, Trans. A.I.E.E., part II, Vol.77, pp41-42, 1958.
17. G. Witvoet, W. P. M. H. Heemels, M. J. G. van de Molengraft, M. Steinbuch, Performance analysis of reset control systems, International journal of robust and nonlinear control, 2009.
18. Khalid El Rifai and Osamah El Rifai, Design of Hybrid Resetting PID and Lag Controllers with Application to Motion Control, 2009.
19. Qian Chen, RESET CONTROL SYSTEMS: STABILITY, PERFORMANCE AND APPLICATION, 2000.
20. Чуонг Дук Чунг Псевдолинейный ПИД-регулятор систем автоматического регулирования [Электронный ресурс] / Чуонг Дук Чунг, В. Н. Скороспешкин // Современные техника и технологии сборник трудов XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 12-16 апреля 2010 г.: в 3 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2010.
21. Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства в автоматических системах, 1973. – 344с.
22. Зельченко В.Я. Шаров С.Н. Нелинейная коррекция автоматических систем. - Л.: Судостроение, 1981. – 167 с.

23. Булавко Е. С. Корректирующие устройства систем автоматического регулирования с переключающими сигналами / Е. С. Булавко ; науч. рук. В. Н. Скороспешкин // Молодежь и современные информационные технологии : сборник трудов XIV Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 7-11 ноября 2016 г. : в 2 т. — Томск : Изд-во ТПУ, 2016. — Т. 1. — [С. 287-289].
24. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers // Trans. ASME. 1942. Vol. 64. P. 759-768.
25. Энциклопедия АСУ ТП [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.bookasutp.ru>, свободный.
26. Денисенко В., ПИД-регуляторы: вопросы реализации // В записную книжку инженера, 2008.
27. Chien K.L., Hrones J.A., Reswick J.B. On automatic control of generalized passive systems // Trans. ASME. 1952. Vol. 74. P. 175-185.
28. Давыдов И.И. Определение параметров настройки ПИД-регулятора по переходной характеристике объекта регулирования. — Теплоэнергетика, 1995. — №10.
29. Шарков А.А. Автоматическое регулирование и регуляторы в химической промышленности / Шарков А.А., Притыко Г.М., Палюх Б.В.— М.: Химия, 1990. — 228 с.
30. Ротач В.Я. Расчет настройки реальных ПИД-регуляторов. — Теплоэнергетика, 1995. — №10.
31. Ротач В.Я. К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям // Промышленные АСУ и контроллеры, 2006. — №2.
32. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Гурецкий Х. — М.: Машиностроение, 1974. — 328 с.
33. Gessing R., Rownania roznicowe nieliniowych ukladow impulsowych z rzeczywistym czasem opoznienia. Prace IV, AGH Krakow, 1967. — s.115-133.

34. Репин А.И., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И. Алгоритм оптимальной настройки реальных ПИД-регуляторов на заданный запас устойчивости // Автоматизация и ИТ в энергетике, 2010. – №4.
35. Стефани Е.П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических объектов / Стефани Е.П. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.
36. Ляшенко А., Золотов О. Корневой метод расчета настроек распределенного ПИД-регулятора для системы с распределенными параметрами // Компоненты и технологии, 2012. – №1.
37. Суходоев М. С. Локальные системы автоматики и управления: учебное пособие / М. С. Суходоев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 117 с.
38. Воронцов Е.Ю., Лисиенко В.Г., Пономарев Н.Н. Исследование методов настройки ПИД-регулятора на примере моделирования объекта второго порядка с запаздыванием // ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», 2013.
39. Симановский А.Ю. Типы регуляторов. Методика настройки регуляторов // КП МИКРОЛ. – Украина, 2011.
40. Михалевич С.С. Частотный метод параметрического синтеза ПИД-регулятора для стационарных, интервальных и многосвязных САУ. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015.
41. Зорин С.В. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов. НПП Системы контроля. [Электронный ресурс] / С.В. Зорин. - Режим доступа: <http://www.termosensor.ru/pdf/pid.pdf>, свободный.
42. Лебедев С.К. Математические основы теории автоматического управления: курс лекций / Электронное издание. – Иваново: ИГЭУ. – 149с.
43. Кривошеев В.П. Основы теории управления: конспект лекций [Электронный ресурс]// Учебные материалы ВГУЭС. – Режим доступа: <http://abc.vvsu.ru/>, свободный.
44. Оценка качества работы САР. Теория автоматического управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vunivere.ru>, свободный.

45. Пономарева В. М., Литвинова А. П. Основы автоматического регулирования и управления: учебн. пособие для неэлектротехн. специальностей вузов. – М., «Высшая школа», 1974. – 439с.
46. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. –К.: Радиомотор, 2008. – 972с.
47. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. – М.: Бином. Лаборатория знания, 2013. – 798с.
48. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложения. – М.,2003. – 81с.
49. Штовба С.Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винница, 2001. – 756 с.
- 50.Шубенкова В.А., Аксенова О.И., Куликова М.Г. Использование методов нечеткого логического вывода для составления рецептурных смесей пищевых продуктов // Материалы VI Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум», 2014.
51. Чернецкая И.В., Чернецкий В.О. Нечеткие регуляторы в системах автоматического регулирования. – Вестник ЮУрГУ, 2006. – №4. – с.156-159.
52. Zimmermann H.J. Fuzzy Set Theory and its Applications. 3rd ed. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 1996.
53. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и ее применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир. – 1976. – 167с.
54. Куленко М.С., Буренин С.В. Исследование применения нечетких регуляторов в системах управления технологическими процессами. – Вестник ИГЭУ, 2010. – №2. – 5с.
55. Прикладные нечеткие системы: Пер с япон. / К. Асаи, Д. Ватада, С. Иваи.. –М: Мир. – 1993. – 398с.
56. Рогозин О.В. Метод нечеткого вывода решения в задаче подбора программного обеспечения на основе качественных характеристик этого обеспечения как объекта инвестиций // Приборы, методы и технологии. – 2009. – №3. – с.43-49.

57. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – 2001. – 221с.
58. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ Петербург, 2005. — 736 с.
59. Матковская М.О. Исследование алгоритмов нечёткого вывода в моделях принятия решений // Известия ЮФУ. Технические науки, Раздел III. Информационные технологии в управлении. – 2009. – №3.
60. Шарипова Д.И. Влияние вида функции принадлежности на результаты нечетко-логической процедуры оценки сводных показателей предприятий-конкурентов на рынке нефтесервисных услуг // Проблемы экономики и менеджмента. – 2016. – №4 (56).
61. Семененко М.Г., Князева И.В., Черняев С.И. Проблемы выбора функций принадлежности нечетких множеств // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 5.
62. Кондрашов С.И., Дроздова Т.В., Опришкина М.И. Влияние вида функций принадлежности на чувствительность при оценивании качества. Харьков, 2015. – №3(128).
63. Семененко М. Г., Лесина Т. В. Оценка эффективности инвестиционных проектов на основе формализма нечеткой логики // Финансовая аналитика: проблемы и решения. – 2011. – № 29. – с. 63-68.
64. Лубенцова Е.В., Петраков В.А., Слюсарев Г.В., Лубенцов В.Ф. Метод построения нечетких регуляторов с использованием аналитических выражений для управляющих воздействий // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 11-3. – С. 484-490.
65. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб.: БХВ Петербург, 2005. — 736с.
66. Белоглазов Д.А. Разработка и исследование методов синтеза адаптивных регуляторов на основе нейронечетких сетевых структур: Дис. канд.тех.наук. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012.

67. Белоглазов Д.А., Косенко У.Ю., Анализ методов устойчивости нечетких систем управления // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №2 (139).
68. Усков А.А., Круглов В.В. Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. – Смоленск: Смоленская городская типография, 2003. – 177 с.
69. Воронов А.А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». – Ч. II. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления. – М.: Высш. шк., 1986.— 504 с.
70. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами МАТЛАБ. – М: Горячая линия – Телеком. – 2007. – 288с.
71. Жадобин Н. Е., Лебедев А. И., Данилов О. Г. Нечеткие регуляторы в системах управления судовыми энергетическими установками // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2014. –№3 (25).
72. Рубанов В. Г., Филатов А. Г., Рыбин И. А. Интеллектуальные системы автоматического управления. Нечеткое управление в технических системах [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://nrsu.bstu.ru/>, свободный
73. Денисенко В., ПИД регуляторы: принципы построения и модификации // В записную книжку инженера. СТА, 2007. – №1.
74. Величко В. С. Применение нечеткой логики для создания системы управления устойчивостью двухколесного мотоцикла // Вестник ЮУрГУ. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2011. – №17 (234).
75. Сигеру Омату Нейроуправление и его приложения Кн 2 / Сигеру Омату, Марзуки Халид, Рубия Юсоф. Пер. с англ Н. В. Батина. Под ред. А. И. Галушкина, В. А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.
76. Бураков М. В., Коновалов А. С. Синтез нечетких логических регуляторов // Обработка информации и управление. – 2011.– №1.
77. Кудинов Ю.И., Келина А.Ю. Определение оптимальных параметров и структуры нечеткого ПД-регулятора // Информатика и системы управления. – 2014. – №1(39).

78. Михайленко В.С. Сравнительный анализ нечеткого и ПИД – регуляторов при управлении объектами третьего и четвертого порядка // Одесская государственная академия строительства и архитектуры.
79. Mann G.K.I.; Hu B.G., Gosine R.G. Fuzzy PID controller structures. - IEEE 1997 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, vol. 2, 25-28 May 1997. – p. 788 - 791.
80. Ершов А.Ю., Скороспешкин В.Н. Псевдолинейный нечеткий регулятор системы автоматического управления // ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НАУКЕ, УПРАВЛЕНИИ, СОЦИАЛЬНОЙ СФЕРЕ И МЕДИЦИНЕ. Сборник научных трудов Международной научной конференции. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2014.
81. Булавко Е. С.. Псевдолинейный нечеткий регулятор; науч. рук. Скороспешкин В.Н. // Современные техника и технологии сборник трудов XXI международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 5-9 октября 2015 г.: в 2 т.: / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ) . — 2015.
82. Булавко Е. С.. Псевдолинейный нечеткий регулятор, науч. рук. В. Н. Скороспешкин // Молодежь и современные информационные технологии сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск. — 2016.
83. Руководство пользователя по программированию ПЛК в CoDeSys 2.3 / Редакция RU 2.4. – 2006.
84. 3S-Smart Software Solutions GmbH is the manufacturer of CODESYS, 2017 [Электронный ресурс]/ Режим доступа: <https://www.codesys.com>, свободный.
85. Учебный центр АРМО [Электронный ресурс]: Программирование контроллеров на CoDeSys / Режим доступа: <http://armo-training.ru/courses/cds-201.html>, свободный.
86. Международный стандарт IC CSR-08260008000: Социальная ответственность организации». – 2011.

87. ГОСТ 12.0.003-74. ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
88. СанПиН 2.2.4.548 – 96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. М.: Минздрав России, 1997
89. СНиП 2.04.05-91 *. Отопление, вентиляция и кондиционирование
90. СП 52.13330.2011 Свод правил. Естественное и искусственное освещение
91. СанПиН 2.2.2/2.4.1340 – 03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».
92. ГОСТ 12.1.003-83 Шум Общие требования безопасности, 1983
93. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
94. ГОСТ 12.1.019–85 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты, 1985.
95. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования
96. ГОСТ 12.1.030–81 ССБТ. Защитное заземление, зануление.
97. ГОСТ 12.1.019-79 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
98. СанПиН 2.2.7.029-99. Государственные санитарные правила и нормы. Коммунальная гигиена, 1999
99. НПБ 105-03. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности, утв. Приказом ГУ ГПС МВД РФ от 31.10.95 № 32
100. ГОСТ Р 22.3.03-94 Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения
101. ГОСТ Р 22.0.02-94. Безопасность в чрезвычайных ситуациях, 1996
102. ГОСТ 12.2.032-78 «ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования»

Приложение А (Обязательное)

Переходные процессы в САР с различными ПКУ

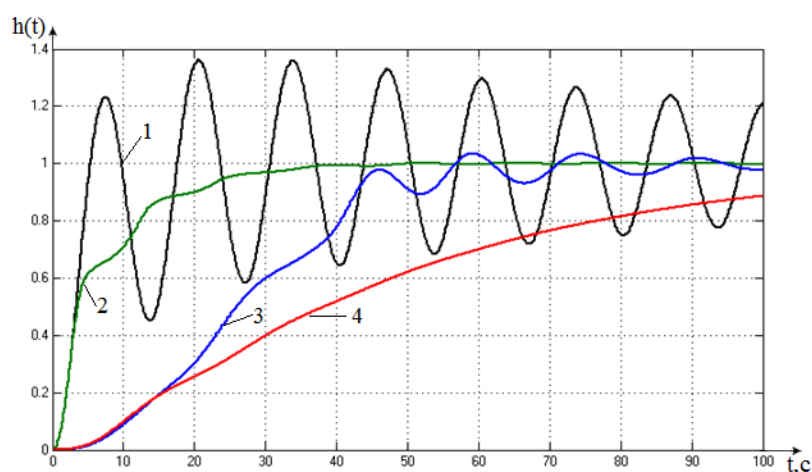


Рисунок А.1 – Переходные характеристики в САР с параметрами ОУ $K=1$,
 $T_1=8$, $T_2=1$

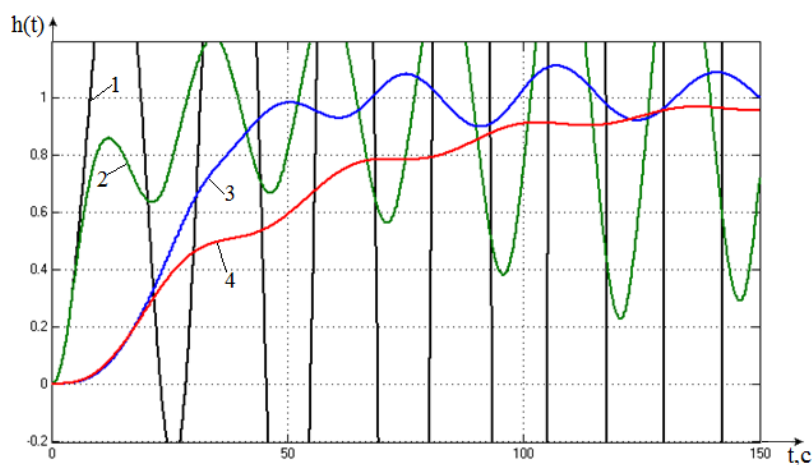


Рисунок А.2 – Переходные характеристики в САР с параметрами ОУ $K=1$,
 $T_1=30$, $T_2=1$

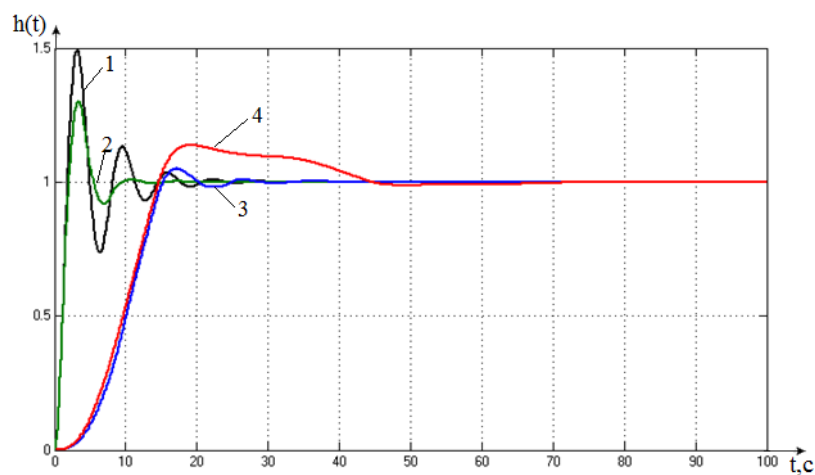


Рисунок А.1 – Переходные характеристики в САР с параметрами ОУ $K=10$,
 $T_1=8$, $T_2=5$

Приложение Б

(Обязательное)

Листинг m-файла автоматической подстройки параметра блока в среде Simulink

```
function [sys,x0,str,ts] = OU_adap(t,x,u,flag)
switch flag
case 0
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case {1,2,4,9}
    sys=[]; %do nothing
otherwise
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;

function [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 3;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];

function [sys]=mdlOutputs(t,x,u)
J1=0;
J2=0;
J3=0;
global a;
global b;
global c;

if t<1
    a=zeros(75,1);
    b=zeros(150,1);
    c=zeros(150,1);
    set_param('PRACTICA/Constant','Value','4');
end

if t>0.5 && t<75
    i=ceil(t);
    a(i,1)=u;
    assignin('base','a', a);
end
if t>199.5 && t<350
    i=ceil(t-199);
    b(i,1)=u;
    assignin('base','b', b);
end
if t>399.5 && t<550
    i=ceil(t-399);
    c(i,1)=u;
    assignin('base','c', c);
end
```

```

if t<75
set_param('PRACTICA/Step1','After','1')
set_param('PRACTICA/Step2','After','1')
set_param('PRACTICA/TransferFcn','Numerator',' [1] ')
set_param('PRACTICA/TransferFcn','Denominator','[3 5 1]')
end

if t>75
set_param('PRACTICA/TransferFcn','Numerator',' [1] ')
set_param('PRACTICA/TransferFcn','Denominator','[16 5 1]')
CalculateError(1,a,'J1'); J1=evalin('base','J1');
end

if t>350
set_param('PRACTICA/Step1','After','0')
CalculateError(2,b,'J2'); J2=evalin('base','J2');
end

if t>399
    if (0<J2)&&(J2<4)
        set_param('PRACTICA/Constant','Value','1');
    end
    if (4<J2)&&(J2<7)
        set_param('PRACTICA/Constant','Value','2');
    end
    if (7<J2)&&(J2<15)
        set_param('PRACTICA/Constant','Value','3');
    end
end

if t>550
set_param('PRACTICA/Step2','After','0')
CalculateError(2,c,'J3'); J3=evalin('base','J3');
end

if t>600
set_param('PRACTICA/Step3','After','1') ;
end

if (t<399)|| (t>750)|| ((t>550)&&(t<649))
set_param('PRACTICA/PKU_fuz/K','Value','0');
set_param('PRACTICA/PKU_ampl/K','Value','0');
end
if ((t>399)&&(t<550))|| ((t>649)&&(t<750))
set_param('PRACTICA/PKU_fuz/K','Value','-1');
set_param('PRACTICA/PKU_ampl/K','Value','-1');
end

sys=[J1,J2,J3];

function [err] = CalculateError(n,a,name)
    for i=1:numel(a)
        I1(i)=(n-a(i))^2;
    end
    err=sum(I1);
    assignin('base', name, err);
sys=[];

```

Приложение В

(Обязательное)

Листинг m-файла автоматической подстройки постоянной времени ПКУ с амплитудным подавлением блока в среде Simulink

```
function [sys,x0,str,ts] = izmen_param_adap_ampl(t,x,u,flag)
switch flag
case 0
    % Инициализация S-функции
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
    b=0;
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case {1,2,4,9}
    sys=[]; %do nothing
otherwise
    % выводим ошибку, т.к. действие не определено
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;

function [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 0;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];

function sys=mdlOutputs(t,x,u)
b=num2str(u)
set_param('PRACTICA/PKU_ampl/TransferFcn1','Numerator','[1]')
set_param('PRACTICA/PKU_ampl/TransferFcn1','Denominator',[' ' [' b ' 1' ' ] ' '])
sys=[];
```

Приложение Г (Обязательное)

Листинг m-файла автоматической подстройки постоянной времени ПКУ с фазовым опережением блока в среде Simulink

```
function [sys,x0,str,ts] = izmen_param_adap_fuz(t,x,u,flag)
switch flag
case 0
    % Инициализация S-функции
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
    b=0;
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case {1,2,4,9}
    sys=[]; %do nothing
otherwise
    % ВЫВОДИМ ОШИБКУ, т.к. действие не определено
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;

function [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 0;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];

function sys=mdlOutputs(t,x,u)
b=num2str(u)
set_param('PRACTICA/PKU_fuz/TransferFcn3','Numerator',[' ' b ' 1 ' '])
set_param('PRACTICA/PKU_fuz/TransferFcn3','Denominator','[1 1]')
sys=[];
```

Приложение Д (Обязательное)

Листинг m-файла автоматической подстройки постоянной времени ПКУ с переключением сигналов блока в среде Simulink

```
function [sys,x0,str,ts] = izmen_ku(t,x,u,flag)
switch flag
case 0
    % Инициализация S-функции
    [sys,x0,str,ts] = mdlInitializeSizes;
    b=0;
case 3,
    sys=mdlOutputs(t,x,u);
case {1,2,4,9}
    sys=[]; %do nothing
otherwise
    % выводим ошибку, т.к. действие не определено
    error(['Unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end;

function [sys, x0, str, ts] = mdlInitializeSizes
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates = 0;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 0;
sizes.NumInputs = 1;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes(sizes);
x0 = [];
str = [];
ts = [0 0];

function sys=mdlOutputs(t,x,u)
b=num2str(u)
set_param('PRACTICA/PKU_fuz/TransferFcn5','Numerator','[0.1]')
set_param('PRACTICA/PKU_fuz/TransferFcn5','Denominator',[' ' [' b ' 1' ' ] '])
sys=[];
```

Приложение Е
(Обязательное)

Переходные процессы в САР с различными нечеткими регуляторами

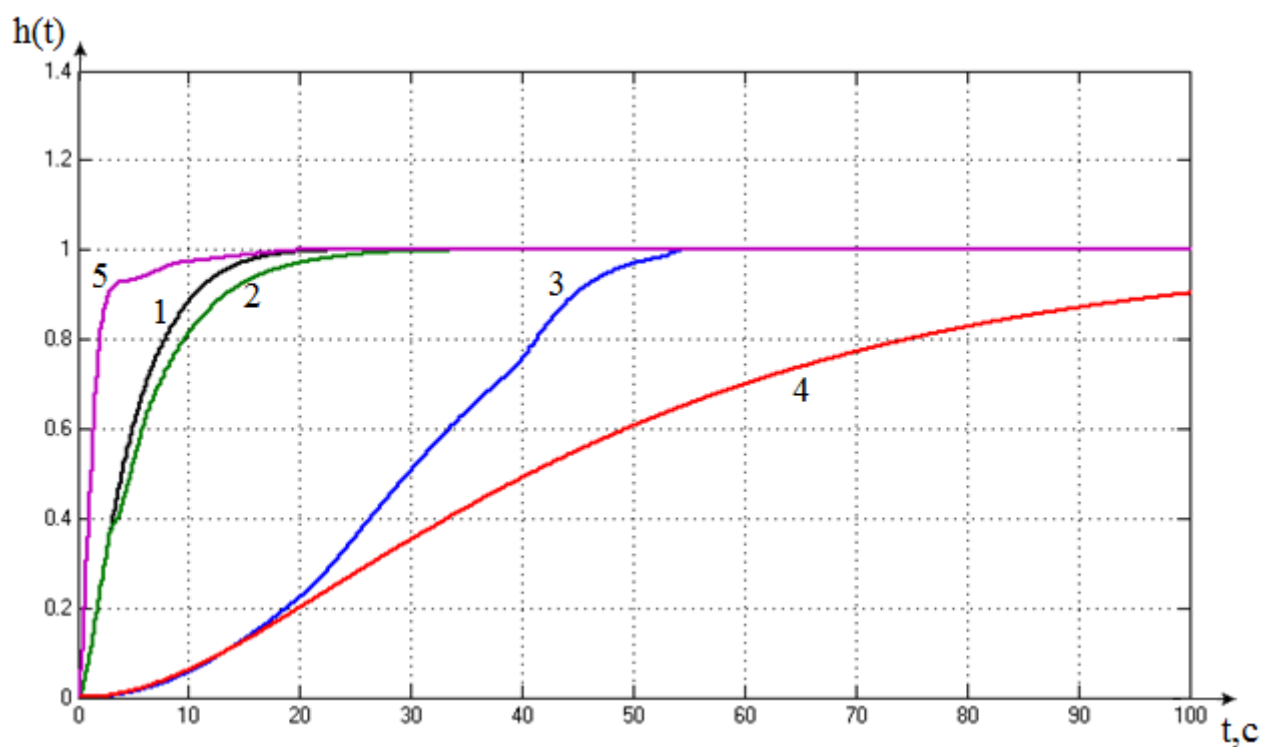


Рисунок Е.1 – Переходные характеристики в САР с параметрами ОУ $K=1$, $T_1=3$, $T_2=5$

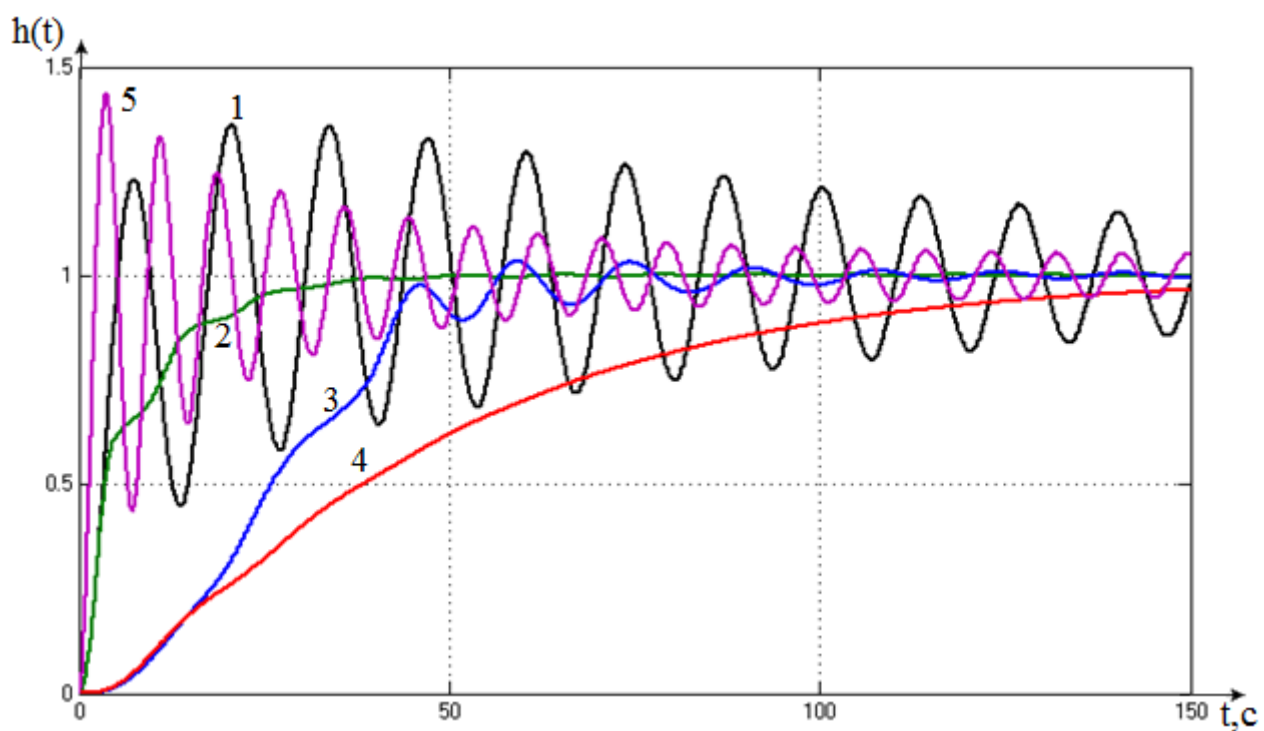


Рисунок Е.2 – Переходные характеристики в САР с параметрами ОУ $K=1$, $T_1=8$, $T_2=1$

Приложение Ж
(Обязательное)

Переходные процессы в адаптивной САР

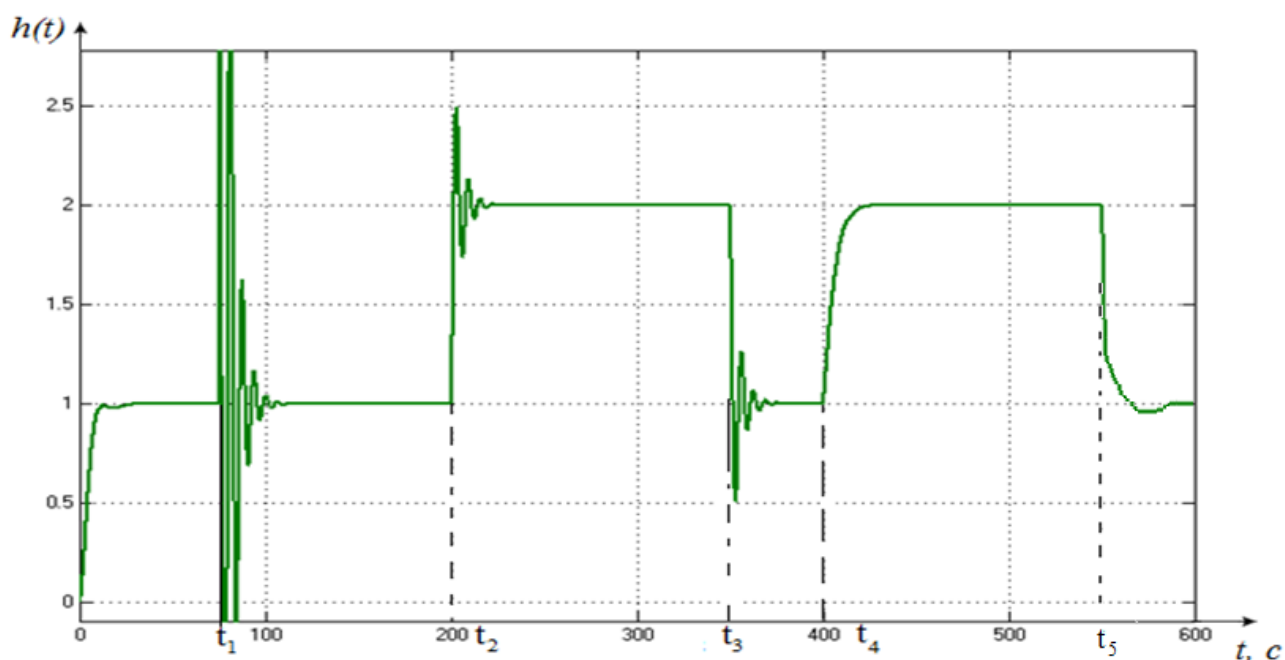


Рисунок Ж.1 – Переходные характеристики в адаптивной САР с подключением нечеткого регулятора с ПКУ с амплитудным подавлением

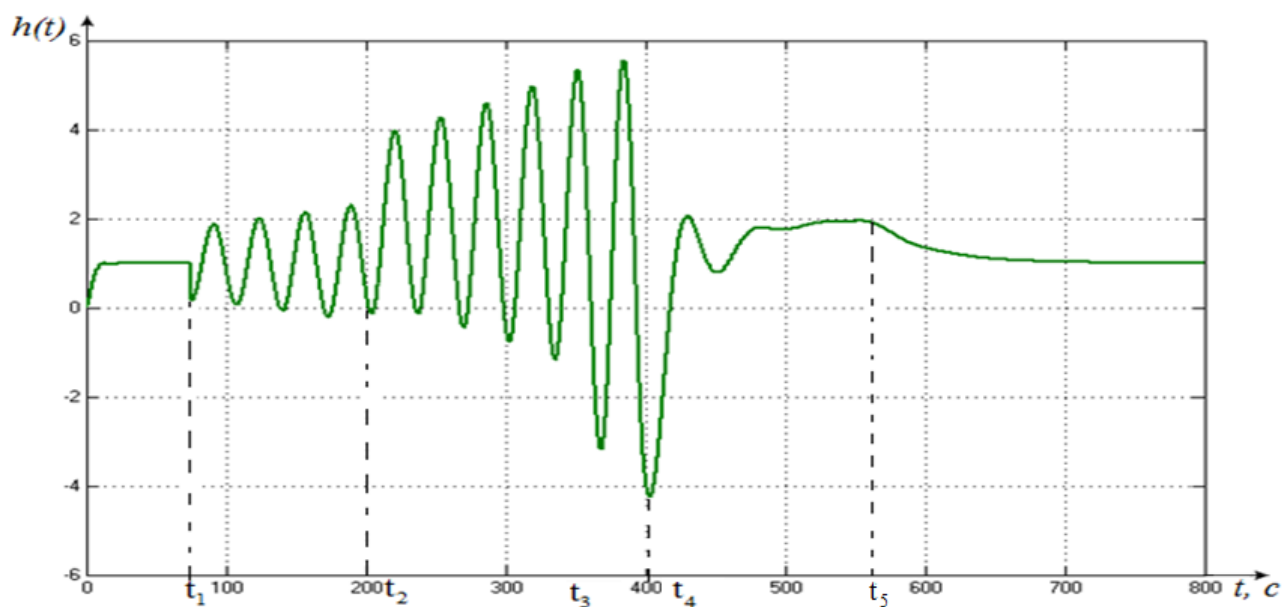


Рисунок Ж.2 – Переходные характеристики в адаптивной САР с подключением нечеткого регулятора с ПКУ с переключением сигналов

Продолжение приложения Ж

(Обязательное)

Переходные процессы в адаптивной САР

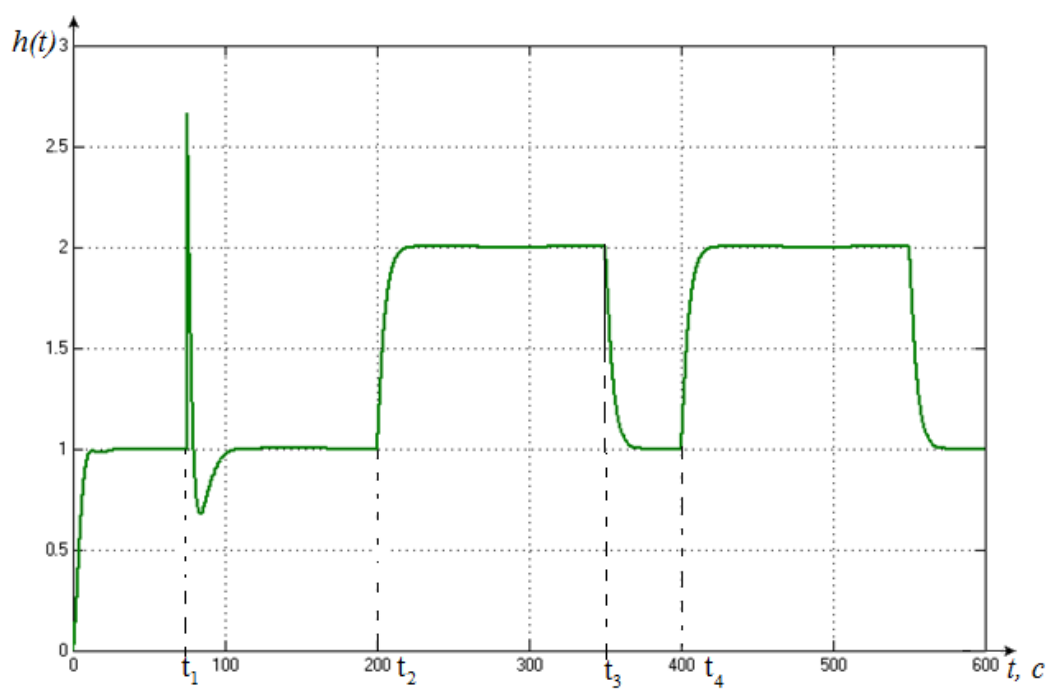


Рисунок Ж.3 – Переходные характеристики в адаптивной САР без подключения нечеткого регулятора

Приложение И
(Обязательное)

Переходные процессы в адаптивной САР

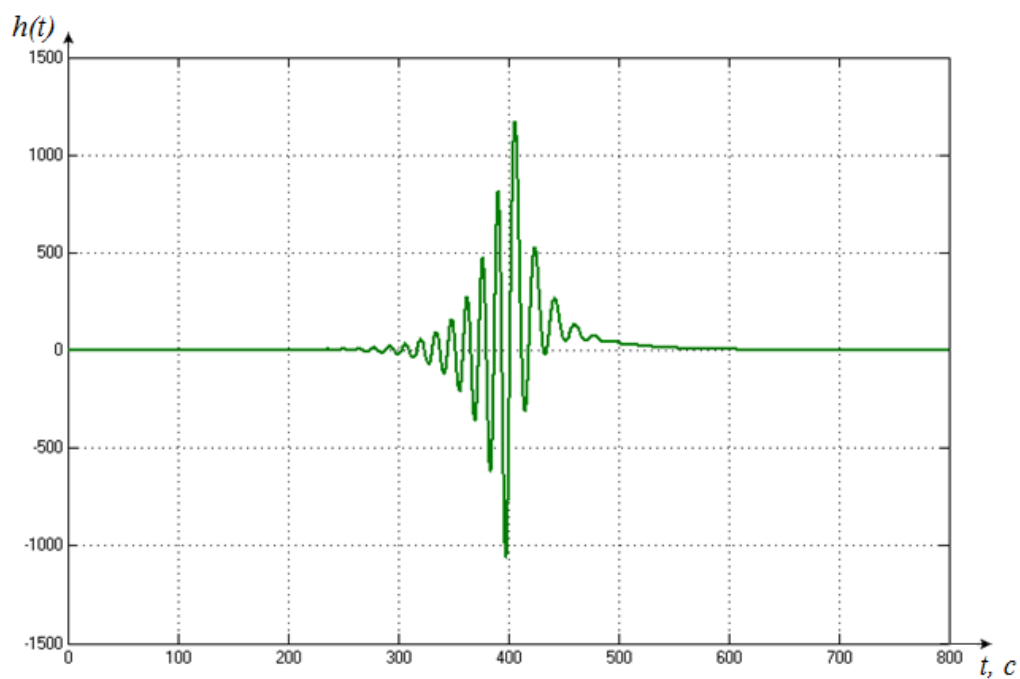


Рисунок И.1 – Переходные процессы в адаптивной САР с ОУ второго порядка с запаздыванием 1с

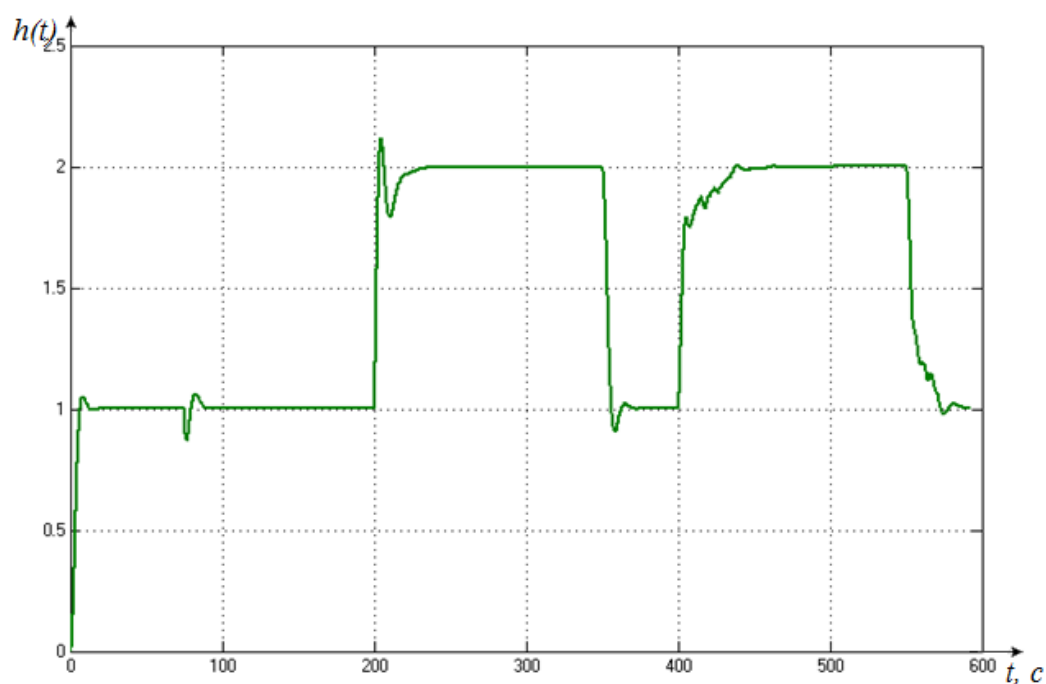


Рисунок И.2 – Переходные процессы в адаптивной САР с ОУ третьего порядка

Приложение К (Обязательное)

Реализация в среде CoDeSys псевдолинейных корректирующих устройств

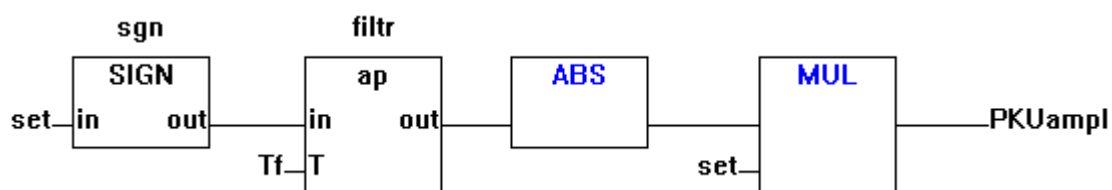


Рисунок К.1 – ПКУ с амплитудным подавлением

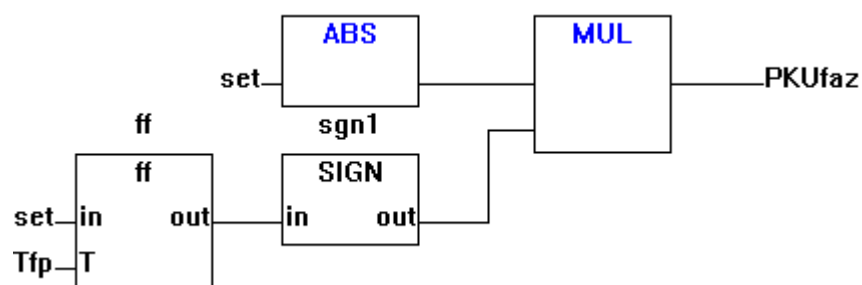


Рисунок К.2 – ПКУ с фазовым опережением

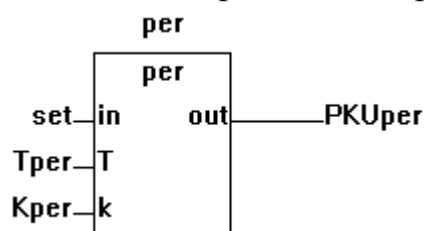
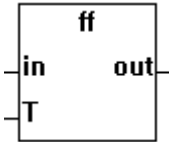
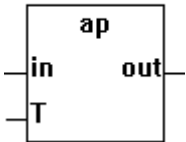
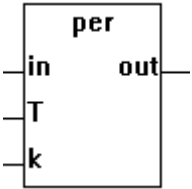
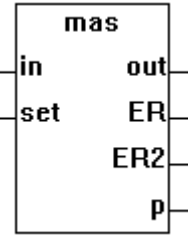


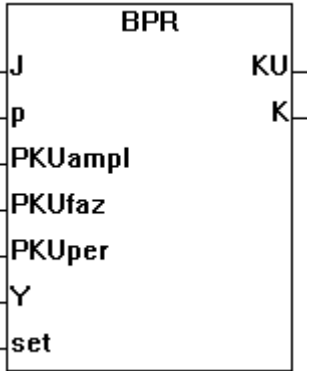
Рисунок К.3 – ПКУ с переключением сигналов

Приложение Л
(Обязательное)

Таблица Л.1 – Программная реализация основных блоков программы

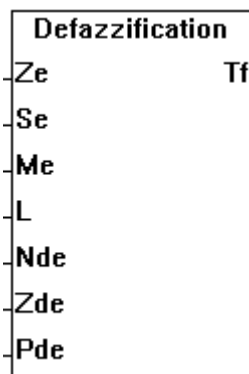
Функциональный блок	Программная реализация
Блок сигнум 	<pre> FUNCTION_BLOCK SIGN VAR_INPUT in:REAL; END_VAR VAR_OUTPUT out:REAL; END_VAR VAR END_VAR IF in = 0 THEN out:=0; END_IF; IF in > 0 THEN out:=1; END_IF; IF in < 0 THEN out:= -1; END_IF; </pre>
Фильтр ПКУ с фазовым опережением  $W_{\phi}(s) = \frac{Ts + 1}{s + 1}$	<pre> FUNCTION_BLOCK ff VAR_INPUT in: REAL; T: REAL; END_VAR VAR_OUTPUT out: REAL; END_VAR VAR X: ARRAY [1..2] OF REAL:=0,0; END_VAR out:=T*X[1]+(1-T)*X[2]; X[2]:=X[1]; X[1]:=in; </pre>
Фильтр ПКУ с амплитудным подавлением  $W_{\phi}(s) = \frac{1}{Ts + 1}$	<pre> FUNCTION_BLOCK ap VAR_INPUT in:REAL; T:REAL; END_VAR VAR_OUTPUT out:REAL; END_VAR VAR END_VAR out:=1-EXP((-1/T)*in); </pre>
ПКУ с переключением сигналов	<pre> FUNCTION_BLOCK per VAR_INPUT in: REAL; T:REAL; k: REAL; END_VAR VAR_OUTPUT </pre>

	<pre> out:REAL; END_VAR VAR out1: REAL; END_VAR out1:=out1+(1/T)*(k*in-out1); IF (in >=0 AND out1 >= 0) OR (in<=0 AND out1 <=0) THEN out:=out1; ELSE out:=0; END_IF </pre>
Блок вычислений интегральной квадратичной ошибки и перерегулирования 	<pre> FUNCTION_BLOCK mas VAR_INPUT in: REAL; set: REAL; END_VAR VAR_OUTPUT out:ARRAY [1..200] OF REAL; ER: REAL:=0; ER2:REAL:=0; p:REAL; END_VAR VAR i: INT:=1; A: ARRAY [1..200] OF REAL; j: INT:=1; B: ARRAY [1..200] OF REAL; k: INT; maximum:REAL; m: INT; flag: BOOL := FALSE; END_VAR IF set = 1 THEN IF flag=FALSE THEN FOR i:=1 TO 200 DO A[i]:=0; B[i]:=0; END_FOR; i:=1; j:=1; ER2:=ER; ER:=0; flag:=TRUE; END_IF; IF (in < set*0.95) OR (in > set*1.05) THEN A[i]:=in; i:=i+1; out:=A; maximum:=A[1]; END_IF; IF (in > set*0.95) AND (in < set*1.05) THEN A[i]:=0; i:=i+1; i:=i-1; END_IF; FOR k:=2 TO 100 DO IF A[k] > maximum THEN maximum:=A[k]; END_IF; END_FOR; </pre>

	<pre> p:=(maximum-set)/set*100; IF j<>i THEN B[j]:=(set-A[j])*(set-A[j]); ER:=ER+B[j]; j:=j+1; ELSE ER:=ER; END_IF END_IF IF set = 2 THEN IF flag=TRUE THEN FOR i:=1 TO 200 DO A[i]:=0; B[i]:=0; END_FOR; i:=1; j:=1; ER2:=ER; ER:=0; flag:=FALSE; END_IF; IF (in < set*0.95) OR (in > set*1.05) THEN A[i]:=in; i:=i+1; out:=A; maximum:=A[1]; END_IF; IF (in > set*0.95) AND (in < set*1.05) THEN A[i]:=0; i:=i+1; i:=i-1; END_IF; FOR k:=2 TO 100 DO IF A[k] > maximum THEN maximum:=A[k]; END_IF; END_FOR; p:=(maximum-set)/set*100; IF j<>i THEN B[j]:=(set-A[j])*(set-A[j]); ER:=ER+B[j]; j:=j+1; ELSE ER:=ER; END_IF END_IF; </pre>
 <pre> graph LR subgraph BPR direction TB J_in[J] p_in[p] PKUampl_in[PKUampl] PKUfaz_in[PKUfaz] PKUper_in[PKUper] Y_in[Y] set_in[set] KU_out[KU] K_out[K] end </pre>	<pre> FUNCTION_BLOCK BPR VAR_INPUT J:REAL; p:REAL; PKUampl: REAL; PKUfaz: REAL; PKUper: REAL; Y:REAL; set: REAL; END_VAR VAR_OUTPUT KU:REAL; K:STRING; END_VAR VAR END_VAR </pre>

	<pre> IF set-1=1 THEN IF (0<=J AND J<5) (*OR p<5*) THEN KU:=Y; K:='Áâç ÊÓ'; END_IF; IF (J>=5 AND J<=13) (*AND p>20*) THEN KU:=PKUfaz;K:='PKUfaz'; END_IF; IF (J >13 AND J <=25) (*AND p<20*) THEN KU:=PKUampl; K:='PKUampl'; END_IF; IF J >25 THEN KU:=PKUper; K:='PKUper'; END_IF; END_IF; IF set-1=0 THEN IF K=" THEN KU:=Y; K:='Без KY'; END_IF; IF K='Без KY'; THEN KU:=Y; K:= 'Без KY'; END_IF; IF K='PKUfaz' THEN KU:=PKUfaz;K:='PKUfaz';END_IF; IF K='PKUampl' THEN KU:=PKUampl; K:='PKUampl';END_IF; END_IF; </pre>
Блок фаззификации для ПКУ с амплитудным подавлением <pre> graph LR subgraph Fuzzification er[er] Der[Der] Ze[Ze] Se[Se] Me[Me] L[L] N[N] Z[Z] P[P] end er --- Ze er --- Se er --- Me er --- L er --- N er --- Z er --- P Der --- Ze Der --- Se Der --- Me Der --- L Der --- N Der --- Z Der --- P </pre>	<pre> FUNCTION_BLOCK Fazzification VAR_INPUT er:REAL; Der: REAL; END_VAR VAR_OUTPUT Ze,Se,Me,L:REAL; N,Z,P:REAL; END_VAR VAR END_VAR IF er<=0 OR er>0.02 THEN Ze:=0; END_IF; IF er>0 AND er <=0.02 THEN Ze:=1-50*er; END_IF; IF er<=0.016 OR er>0.3 THEN Se:=0; END_IF; IF er>0.016 AND er <=0.15 THEN Se:=7.5*er-0.12; END_IF; IF er>0.15 AND er <=0.3 THEN Se:=2-6.7*er; END_IF; IF er<=0.25 OR er>0.8 THEN Me:=0; END_IF; IF er>0.25 AND er <=0.5 THEN Me:=4*er-1; END_IF; IF er>0.25 AND er <=0.8 THEN Me:=2.7-3.3*er; END_IF; IF er<=0.7 THEN L:=0; END_IF; IF er>0.7 AND er <=0.9 THEN L:=5*er-3.5; END_IF; IF er>=1 THEN L:=1; END_IF; IF Der<=-0.1 OR Der>=0.1 THEN Z:=0; END_IF; IF Der>-0.1 AND Der <=0 THEN Z:=10*er+1; END_IF; IF Der>0 AND Der <0.1 THEN Z:=1-10*er; END_IF; IF Der<=0.05 THEN P:=0; END_IF; IF Der>0.05 AND Der <=1 THEN P:=1.1*er-0.053; END_IF; IF Der>1 THEN P:=1; END_IF; IF Der>=-0.05 THEN N:=0; END_IF; IF Der>0 AND Der <0.1 THEN N:=-1.1*er-0.053; END_IF; IF Der<-1 THEN N:=1; END_IF; </pre>

Блок дефаззификации для ПКУ
с амплитудным подавлением



```

FUNCTION_BLOCK Defazzification
VAR_INPUT
    Ze,Se,Me,L:REAL;
    Nde,Zde,Pde:REAL;
END_VAR
VAR_OUTPUT
    Tf:REAL;
END_VAR
VAR
    n:ARRAY [1..2] OF REAL;
    t:ARRAY [1..2] OF REAL;
    i:INT;
    Ts,Tm,Tl,Txl:BOOL:=FALSE;
    Tss,Tmm,Tll,Txll:REAL;
END_VAR

IF Nde<>0 AND Zde<>0 THEN
    IF MAX(Nde,Zde)=Nde THEN Zde:=0; ELSE Nde:=0;
END_IF
END_IF;
IF Pde<>0 AND Zde<>0 THEN
    IF MAX(Pde,Zde)=Pde THEN Zde:=0; ELSE Pde:=0; END_IF
END_IF;
IF Nde<>0 AND Zde<>0 AND Pde<>0 THEN
    IF MAX(Nde,MAX(Zde,Pde))=Nde THEN Zde:=0; Pde:=0;
END_IF;
    IF MAX(Nde,MAX(Zde,Pde))=Zde THEN Nde:=0; Pde:=0;
END_IF;
    IF MAX(Nde,MAX(Zde,Pde))=Pde THEN Zde:=0; Nde:=0;
END_IF
END_IF;

IF Ze<>0 AND Se<>0 THEN
    IF MAX(Ze,Se)=Ze THEN Se:=0; ELSE Ze:=0; END_IF
END_IF;
IF Se<>0 AND Me<>0 THEN
    IF MAX(Se,Me)=Se THEN Me:=0; ELSE Se:=0; END_IF
END_IF;
IF Me<>0 AND L<>0 THEN
    IF MAX(Me,L)=Me THEN L:=0; ELSE Me:=0; END_IF
END_IF;

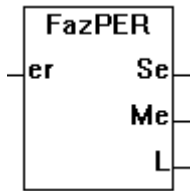
IF Ze <> 0 AND Se=0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde<>0 AND
Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE;
Txl:=FALSE; END_IF;
IF Ze <> 0 AND Se=0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND
Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=TRUE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE;
Txl:=FALSE; END_IF;
IF Ze <> 0 AND Se=0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde=0
AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE;
Txl:=FALSE;END_IF;
IF Ze=0 AND Se<>0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde<>0 AND
Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE;
Txl:=FALSE; END_IF;
IF Ze=0 AND Se<>0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND
Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE;
Txl:=FALSE; END_IF;

```

	<pre> IF Ze=0 AND Se<>0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE;END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me<>0 AND L=0 AND Nde<>0 AND Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me<>0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me<>0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE;END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me=0 AND L<>0 AND Nde<>0 AND Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me=0 AND L<>0 AND Nde=0 AND Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me=0 AND L<>0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE;END_IF; n[1]:=MAX(Ze,MAX(Se,MAX(Me,L))); n[2]:=MAX(Nde,MAX(Zde,Pde)); FOR i:=1 TO 2 DO IF Ts=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Tss:=1; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Tss:=2-1*n[i]; END_IF; IF n[i]=1 THEN Tss:=2; END_IF; t[i]:=Tss; END_IF; IF Tm=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Tmm:=2; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Tmm:=3*n[i]+2; END_IF; IF n[i]=1 THEN Tmm:=5; END_IF; t[i]:=Tmm; END_IF; IF Tl=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Tll:=5; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Tll:=5*n[i]+5; END_IF; IF n[i]=1 THEN Tll:=10; END_IF; t[i]:=Tll; END_IF; IF Txl=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Txll:=10; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Txll:=5*n[i]+10; END_IF; IF n[i]=1 THEN Txll:=15; END_IF; t[i]:=Txll; END_IF; END_FOR; Tf:=(n[1]*t[1]+n[2]*t[2])/(n[1]+n[2]); </pre>
Блок фаззификации для ПКУ с фазовым опережением	<pre> FUNCTION_BLOCK FazFUZ VAR_INPUT er:REAL; Der: REAL; </pre>

<pre> graph LR er --> FazFUZ Der --> FazFUZ FazFUZ --> Ze FazFUZ --> Se FazFUZ --> Me FazFUZ --> L FazFUZ --> N FazFUZ --> Z FazFUZ --> P </pre>	<pre> END_VAR VAR_OUTPUT Ze,Se,Me,L:REAL; N,Z,P:REAL; END_VAR VAR END_VAR END_VAR IF er<=0.011 OR er>0.26 THEN Se:=0; END_IF; IF er>0.011 AND er <=0.12 THEN Se:=9.2*er-0.1; END_IF; IF er>0.12 AND er <=0.26 THEN Se:=1.9-7.2*er; END_IF; IF er<=0.228 OR er>0.586 THEN Me:=0; END_IF; IF er>0.228 AND er <=0.382 THEN Me:=6.5*er-1.5; END_IF; IF er>0.228 AND er <=0.586 THEN Me:=2.9-4.9*er; END_IF; IF er<=0.544 THEN L:=0; END_IF; IF er>0.544 AND er <=0.8 THEN L:=3.9*er-2.1; END_IF; IF er>=0.8 THEN L:=1; END_IF; IF Der<=-0.5 OR Der>=0.5 THEN Z:=0; END_IF; IF Der>-0.5 AND Der <=0 THEN Z:=2*er+1; END_IF; IF Der>0 AND Der <0.5 THEN Z:=1-2*er; END_IF; IF Der<=0.05 THEN P:=0; END_IF; IF Der>0.05 AND Der <=1 THEN P:=1.1*er-0.053; END_IF; IF Der>1 THEN P:=1; END_IF; IF Der>=-0.05 THEN N:=0; END_IF; IF Der>0 AND Der <0.1 THEN N:=-1.1*er-0.053; END_IF; IF Der<-1 THEN N:=1; END_IF; </pre>
Блок дефаззификации для ПКУ с фазовым опережением <pre> graph LR Ze --> DefazFUZ Se --> DefazFUZ Me --> DefazFUZ L --> DefazFUZ Nde --> DefazFUZ Zde --> DefazFUZ Pde --> DefazFUZ DefazFUZ --> Tf </pre>	<pre> FUNCTION_BLOCK DefazFUZ VAR_INPUT Ze,Se,Me,L:REAL; Nde,Zde,Pde:REAL; END_VAR VAR_OUTPUT Tf:REAL; END_VAR VAR n:ARRAY [1..2] OF REAL; t:ARRAY [1..2] OF REAL; i:INT; Ts,Tm,Tl,Txl:BOOL:=FALSE; Tss,Tmm,Tll,Txll:REAL; END_VAR IF Nde<>0 AND Zde<>0 THEN IF MAX(Nde,Zde)=Nde THEN Zde:=0; ELSE Nde:=0; END_IF END_IF; IF Pde<>0 AND Zde<>0 THEN IF MAX(Pde,Zde)=Pde THEN Zde:=0; ELSE Pde:=0; END_IF END_IF; IF Nde<>0 AND Zde<>0 AND Pde<>0 THEN IF MAX(Nde,MAX(Zde,Pde))=Nde THEN Zde:=0; Pde:=0; END_IF; IF MAX(Nde,MAX(Zde,Pde))=Zde THEN Nde:=0; Pde:=0; END_IF; </pre>

	<pre> IF MAX(Nde,MAX(Zde,Pde))=Pde THEN Zde:=0; Nde:=0; END_IF END_IF; IF Ze<>0 AND Se<>0 THEN IF MAX(Ze,Se)=Ze THEN Se:=0; ELSE Ze:=0; END_IF END_IF; IF Se<>0 AND Me<>0 THEN IF MAX(Se,Me)=Se THEN Me:=0; ELSE Se:=0; END_IF END_IF; IF Me<>0 AND L<>0 THEN IF MAX(Me,L)=Me THEN L:=0; ELSE Me:=0; END_IF END_IF; IF Ze <> 0 AND Se=0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde<>0 AND Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze <> 0 AND Se=0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=TRUE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze <> 0 AND Se=0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE; Txl:=FALSE;END_IF; IF Ze=0 AND Se<>0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde<>0 AND Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze=0 AND Se<>0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze=0 AND Se<>0 AND Me=0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE;END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me<>0 AND L=0 AND Nde<>0 AND Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me<>0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; Txl:=FALSE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me<>0 AND L=0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE;END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me=0 AND L<>0 AND Nde<>0 AND Zde=0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me=0 AND L<>0 AND Nde=0 AND Zde<>0 AND Pde=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE; END_IF; IF Ze=0 AND Se=0 AND Me=0 AND L<>0 AND Nde=0 AND Zde=0 AND Pde<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; Txl:=TRUE;END_IF; n[1]:=MAX(Ze,MAX(Se,MAX(Me,L))); n[2]:=MAX(Nde,MAX(Zde,Pde)); FOR i:=1 TO 2 DO IF Ts=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Tss:=1; END_IF; </pre>
--	--

	<pre> IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Tss:=4-3*n[i]; END_IF; IF n[i]=1 THEN Tss:=4; END_IF; t[i]:=Tss; END_IF; IF Tm=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Tmm:=4; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Tmm:=3*n[i]+4; END_IF; IF n[i]=1 THEN Tmm:=7; END_IF; t[i]:=Tmm; END_IF; IF Tl=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Tll:=7; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Tll:=3*n[i]+7; END_IF; IF n[i]=1 THEN Tll:=10; END_IF; t[i]:=Tll; END_IF; IF Tx=TRUE THEN IF n[i]=0 THEN Txl:=10; END_IF; IF n[i]>0 AND n[i] <1 THEN Txl:=5*n[i]+10; END_IF; IF n[i]=1 THEN Txl:=15; END_IF; t[i]:=Txll; END_IF; END_FOR; Tf:=(n[1]*t[1]+n[2]*t[2])/(n[1]+n[2]); </pre>
Блок фаззификации для ПКУ с переключением сигналов 	<pre> FUNCTION_BLOCK FazPER VAR_INPUT er:REAL; END_VAR VAR_OUTPUT Se,Me,L:REAL; END_VAR VAR END_VAR IF er<=-0.2 OR er>0.2 THEN Se:=0; END_IF; IF er>-0.2 AND er <=0 THEN Se:=1+5*er; END_IF; IF er>0 AND er <=0.02 THEN Se:=1-5*er; END_IF; IF er<=0.15 OR er>0.85 THEN Me:=0; END_IF; IF er>0.15 AND er <=0.5 THEN Me:=2.9*er-0.43; END_IF; IF er>0.5 AND er <=0.85 THEN Me:=2.4-2.9*er; END_IF; IF er<=0.7 THEN L:=0; END_IF; IF er>0.7 AND er <=0.9 THEN L:=5*er-3.5; END_IF; IF er>0.9 THEN L:=1; END_IF; </pre>
Блок дефаззификации для ПКУ с переключением сигналов 	<pre> FUNCTION_BLOCK DefazPER VAR_INPUT Se,Me,L:REAL; END_VAR VAR_OUTPUT Tf:REAL; END_VAR VAR n: REAL; Ts,Tm,Tl :BOOL:=FALSE; </pre>

	<pre> Tss,Tmm,Tll:REAL; END_VAR IF Se<>0 AND Me<>0 THEN IF MAX(Se,Me)=Se THEN Me:=0; ELSE Se:=0; END_IF END_IF; IF Me<>0 AND L<>0 THEN IF MAX(Me,L)=Me THEN L:=0; ELSE Me:=0; END_IF END_IF; IF Se<>0 AND Me=0 AND L=0 THEN Ts:=TRUE; Tm:=FALSE; Tl:=FALSE; END_IF; IF Se=0 AND Me<>0 AND L=0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=TRUE; Tl:=FALSE; END_IF; IF Se=0 AND Me=0 AND L<>0 THEN Ts:=FALSE; Tm:=FALSE; Tl:=TRUE; END_IF; n:=MAX(Se(MAX(Me,L))); IF Ts=TRUE THEN IF n=0 THEN Tss:=1; END_IF; IF n[>0 AND n <1 THEN Tss:=20-19*n; END_IF; IF n=1 THEN Tss:=20; END_IF; Tf:=Tss; END_IF; IF Tm=TRUE THEN IF n=0 THEN Tmm:=20; END_IF; IF n>0 AND n <1 THEN Tmm:=10*n+20; END_IF; IF n=1 THEN Tmm:=30; END_IF; Tf:=Tmm; END_IF; IF Tl=TRUE THEN IF n=0 THEN Tll:=30; END_IF; IF n>0 AND n <1 THEN Tll:=10*n+30; END_IF; IF n=1 THEN Tll:=40; END_IF; Tf:=Tll; END_IF; </pre>
--	--

Приложение М
(обязательное)

Раздел 2
Методы оценки качества регулирования в САР

Раздел 5
Анализ принципов построения адаптивных регуляторов

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8АМ5А	Кущева Елена Сергеевна		

Консультант – лингвист кафедры АиКС:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель каф. ИЯИК	Денико Р.В.			

2 Methods for evaluating the quality of regulation in automatic control systems

The evaluating the quality of regulation of system is an evaluating of compliance of system to requirements imposed to her. Stability, that is the ability to attenuate transition processes, is a necessary, but not sufficient condition for practical usability of systems. Therefore while researching automatic control systems it is necessary to solve the problem of providing the required indicators for the quality of transition process, such as high-speed performance, variability and overshoot, which characterize the accuracy and smoothness of a process.

There are following methods for evaluating the quality of regulation [2]:

1. Direct methods for evaluating the quality.
2. Indirect methods for evaluating the quality.
 - a) root methods;
 - б) frequency methods;
 - в) integral criterion.

2.1 Direct methods for evaluating the quality

The indicators for regulation quality evaluation determined directly by the transitional characteristic of $h(t)$ are called direct indicators.

There are following direct indicators of quality [42]:

- transition process time $t_{\text{ин}}$;
- overshoot σ ;
- first maximum achievement time t_M ;
- transition process increase time t_H ;
- regulation error $e(t)$;
- extent of attenuation d ;
- system variability η .

Transition process time $t_{\text{ин}}$ is the minimum time after which the controlled value will remain close to the established value with certain accuracy. This quantity defines the operational speed of ACS.

The overshoot σ is the maximum deviation from the established value expressed in relative units or percent:

$$\sigma = \frac{A_{max} - A_{est}}{A_{est}} \cdot 100\%.$$

Overshoot value is used to estimate ACS stability margin. The overshoot of 10-20% is considered as a good indicator.

Transition process increase time t_H is the time from the beginning of transition process until the first intersection of the plot with the line of the established value.

The regulation error maximum is a criterion of accuracy

$$e_{max} = \max |e(t)|.$$

The extent of attenuation is defined by the following formula:

$$d = 1 - \frac{A_3}{A_1},$$

where A_3 and A_1 are adjacent maximum deviations (amplitudes) of one sign. The extent of attenuation of oscillations is considered satisfactory if $d=0,75 \dots 0,95$ [43].

The system variability η is defined by the number of transitions N of $y(t)$ value through the established value on an interval t_{nn} [43].

The variability and the extent of attenuation are stability margin indicators.

Graphic interpretation of direct indicators of quality is given in the figure 2.1.

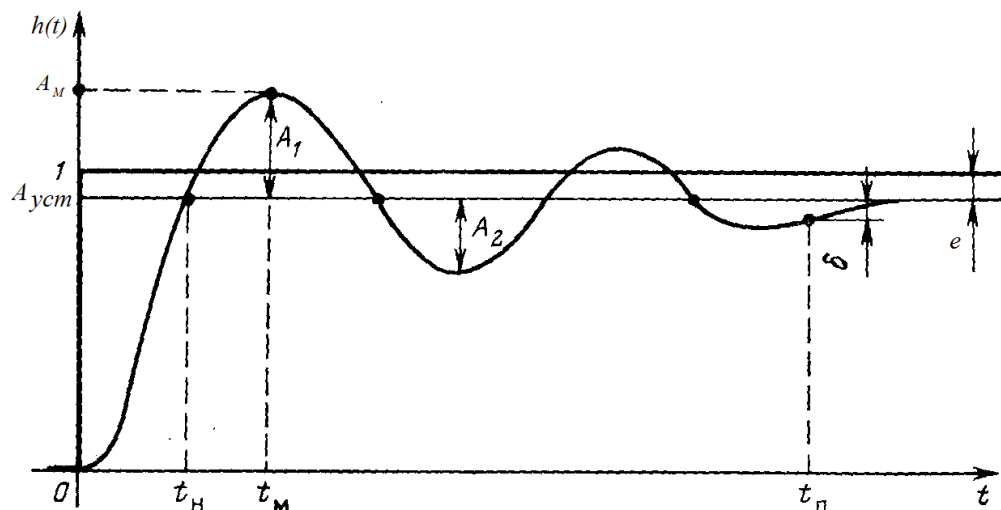


Figure 2.1 – Direct indicators of quality

2.2 Indirect methods for evaluating the quality

2.2.1 Root methods

As the roots of a transfer function unambiguously define the type of a transition process, they can be used for an assessment of a stability margin and operational speed.

The characteristic equation of a transfer function of the closed ACS is used to define the root indicators of quality. The plane of roots is characterized by several parameters:

- 3) η – a degree of stability;
- 4) m – variability.

The degree of stability η is equal to the distance from an imaginary axis to the next root or a couple of complex interfaced roots (figure 2.2):

$$\eta = \operatorname{Re}(p_i), \operatorname{Re}(p_i) < 0.$$

The variability m characterizes the variability of transition process and the quantity of overshoot (figure 2.2):

$$m = \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{\operatorname{Im}(p_i)}{\operatorname{Re}(p_i)}.$$

The variability usually has a value of 1 - 2, but in some cases the value of 3 is allowed.

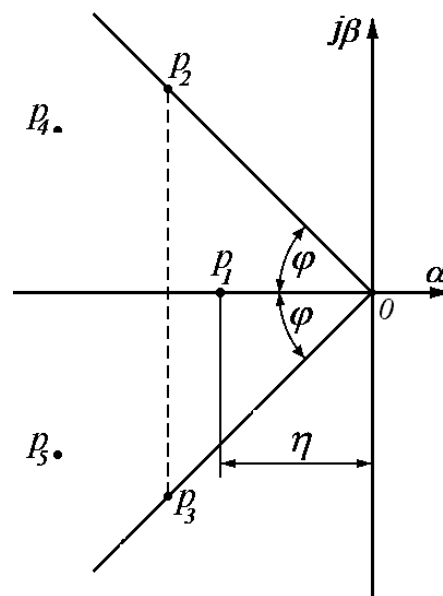


Figure 2.2 – Root indicators of quality

2.2.2 Frequency methods

Frequency criteria of quality are the criteria which don't consider the type of a transition process, and are based on some frequency properties of a system. Frequency criteria assess the margin of stability of a closed system.

There are following frequency indicators:

- variability M ;
- margin stability on amplitude A ;
- margin stability on phase φ .

The variability M is equal to the relation of the APF maximum A_{max} value of a closed system which takes place in case of a resonance frequency, to its starting value of $A(0)$ (a figure 2.3) [44]:

$$M = \frac{A_{max}(\omega_p)}{A(0)}.$$

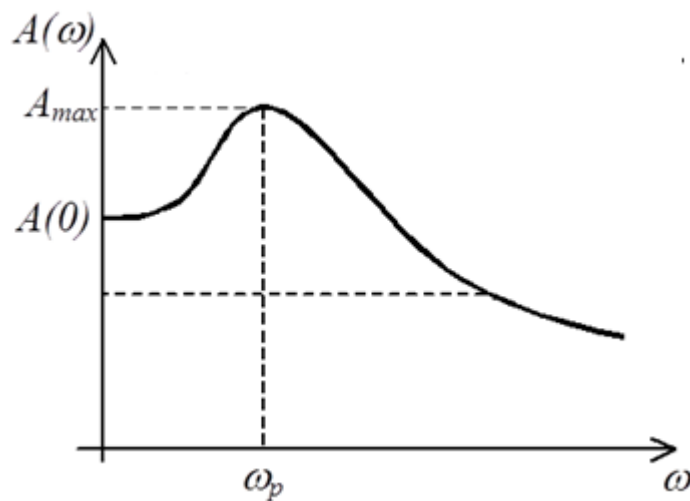


Figure 2.3 – APF of the closed system

The margin stability on amplitude and phase characterize the proximity of a system to a limit of stability and are determined by the logarithmic frequency characteristics of an open ACS (figure 2.4). The further the system is from the limit of stability, the better it is [44].

In qualitative systems stability margins must be:

$$A=6...20 \text{ дБ}, \varphi=30...60^\circ.$$

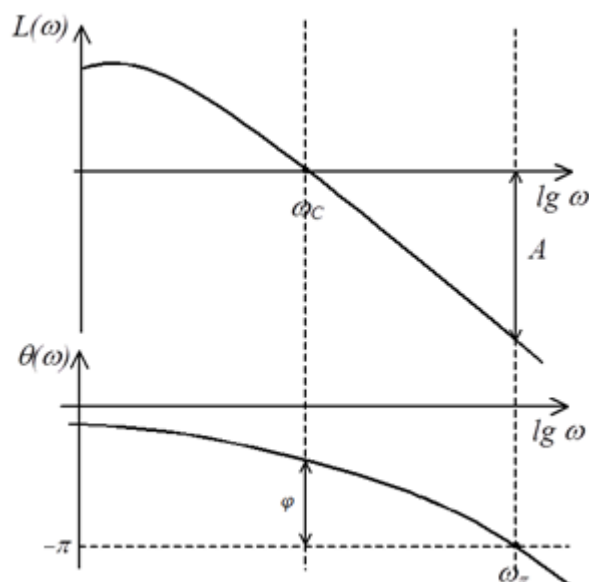


Figure 2.4 – LAPF of the opened ACS

2.2.3 Integral criterion

The integrated criteria estimate the generalized ACS properties, such as accuracy, stability margin, high-speed performance.

The purpose of using such criteria is receiving the general assessment of speed and a deviation of adjustable quantity from the established value. Linear and square integrated estimates are widely used.

Linear integrated assessment: $J_1 = \int_0^{\infty} e(t)dt$.

The less the J_1 is the quicker the transition process attenuates and the deviation fades, i.e. the quality of system is higher.

Square integrated assessment: $J_2 = \int_0^{\infty} e(t)^2 dt$.

The indicator J_2 becomes as the transitions process attenuates. However even the square assessment is not always reliable as it may show that strongly oscillatory process with big reregulation can be better than monotonous [45].

Thus, the choice of criteria for regulation quality depends on the system purpose. When creating the automatic control system it is necessary to rely on several quality evaluation parameters. This work considers such parameters as transition process time, overshoot, stability margin on amplitude and phase and quadratic integral estimator. The linear integral assessment isn't used because we will apply this criterion only to the monotonic processes.

5 Analysis of the principles for adaptive regulators creating

Adaptive control finds a broad application in the theory of automatic control. It is the type of control which allows creating such control systems where the structure of a regulator can be changed, depending on the change of parameters of a control object or external influences.

Adaptive control systems are divided into two big groups [69]:

- self-adjusted;
- self-organized.

The self-adjusted control systems are based on changing the values of parameters of the control devices., The self-organized systems will change the structure of a regulator or actuation device.

Systems are divided into search and search less systems. Extreme systems belong to search systems. Such systems add a search signal to an operating signal in order to define the operating influences providing the movement to an extremum. Systems with reference model and systems with the identifier (with the adjusted model) belong to search less adaptive systems [69].

Application of adaptive control allows:

- to provide operability of system in the conditions of broad change of dynamic properties of an object;
- to carry out optimization of operating modes of an object;
- to increase reliability of system, to unify separate regulators or their blocks and to adapt them for work with different types of the same objects;
- to lower production requirements for separate parts and elements of system;
- to reduce terms of system development.

5.1 The choice of system with fuzzy-regulator with adaptive structure

Pseudo-linear fuzzy regulators with various correcting devices have been already offered and investigated in the previous studies [81,82].

The block diagram of a system with the pseudo-linear fuzzy regulator is provided on the figure 5.1.

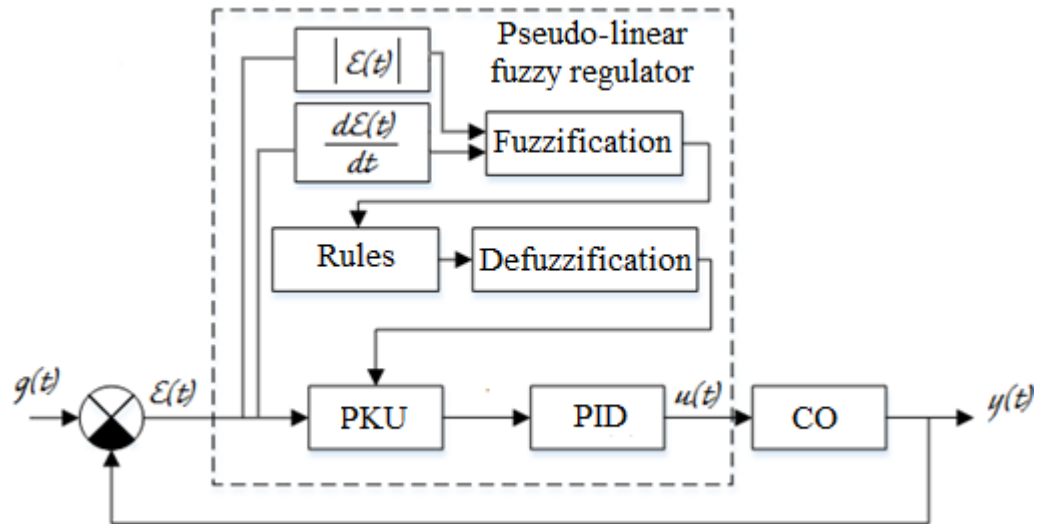


Figure 5.1 – The block diagram of system with the fuzzy regulator

The pseudo-linear fuzzy regulator includes the fuzzy PKU which is consistently connected to the classical PID-regulator in the structure. Fine tuning of the PKU parameters is carried out on the basis of the device of fuzzy logic in absolute module of mistake and speed of change of an error of regulation.

In work [81] the pseudo-linear fuzzy regulator with PKU with a phase advancing is offered. The pseudo-linear correcting device which provides high quality of regulation when changing parameters of a control object, namely to increase high-speed performance and to raise the stability margin of a system. However the use of this regulator in the conditions of a big variability doesn't improve quality of regulation to a desirable look.

In work [82] the pseudo-linear fuzzy regulator with PKU with amplitude suppression is offered. Researches have shown that the pseudo-linear correcting device which is a part of the pseudo-linear indistinct regulator allows to provide high quality of regulation at change of parameters of an object of control, namely to reduce a variability in system and to reduce transition process in ACS to aperiodic. A lack of use of such regulator is reduction of high-speed performance in system.

In this work the self-organized search less adaptive system of automatic control with the pseudo-linear fuzzy regulator is offered and investigated. Adaptation

in such system is carried out by change of structure of the pseudo-linear fuzzy regulator.

The block diagram of system with the pseudo-linear fuzzy regulator is provided on the figure 5.2.

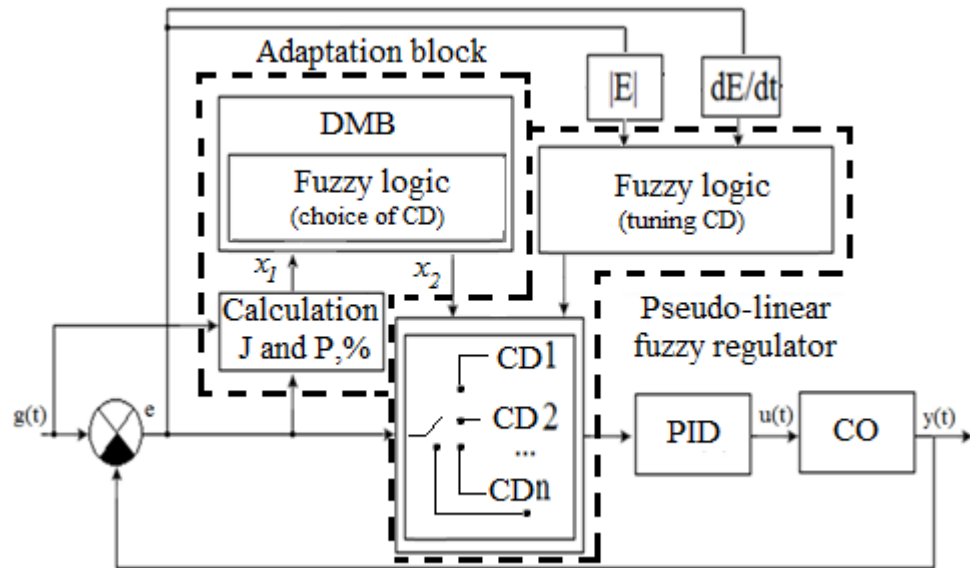


Figure 5.2 – The block diagram of ACS with the fuzzy regulator

The adaptive pseudo-linear fuzzy regulator includes the pseudo-linear fuzzy regulator and the block of adaptation. The block of adaptation includes the block for quality evaluation (J – an integrated square mistake, P - overshoot) and the decision-making block (DMB).

The system with the adaptive pseudo-linear fuzzy regulator works as follows. The correcting devices in the system are switched off at the start time. The input signal $g(t)$ enters the block of calculation of an integrated square mistake and the PID-regulator which is set for aperiodic process. The square integrated mistake and overshoot are calculated in the CALCULATION block. If system control object parameters change at unknown time point it causes fluctuations in the system and, as a result, increase in an integrated square mistake and overshoot. The h_1 signal arrives then to the decision-making block (DMB) where the choice of the correcting device (CD) is made on the basis of fuzzy logic. The block of decision-making sends the x_2 signal to the correcting devices switching block which includes necessary CD in the

main chain. The correcting device is in turn adjusted on the basis of the device of fuzzy logic on the module of an error of regulation and speed of change of error.

The following correcting devices for adaptive ACS development have been chosen in this work: PCD with a phase advancing, PCD with amplitude suppression, PKU with switching of signals.

Thus, if the system of automatic control without deviations the block of adaptation doesn't turn in structure correcting devices and systems works with the classical PID-regulator. If in system there were deviations in unknown timepoint and the measured indicators of quality have changed, then the block of adaptation includes corresponding PKU with the situation, that allows to keep monotony of transition process and stability of ACS.

5.2 Sequence of actions for development of the adaptive pseudo-linear fuzzy regulator

Development of the adaptive pseudo-linear fuzzy regulator is carried out in the following sequence:

1. To be convinced that the classical PID-regulator doesn't satisfy to the required indicators of quality of regulation at non-stationary parameters of an object of control.
2. To estimate a possibility of use of fuzzy logic and the principles of adaptive control in the investigated system.
3. To simulate influence of change of parameters of a concrete object of control on the studied SAR. To estimate limits of change of a square integrated mistake and quantity of reregulation.
4. To adjust the device of fuzzy logic according to the received results of modeling.
5. To analyses and choose correcting devices which are planned to be used in adaptive ACS.

In case of control of non-stationary objects standard regulators doesn't provide always the required quality of transient phenomenon. To be convinced of it is necessary to observe change of parameters of quality of regulation, such as

overshoot, variability, stability inventories on amplitude and a phase and others. If these indices take the leave from given, then it is necessary to use the adaptive regulator.

Necessary to have some expert knowledge of behavior of concrete system in order that to use the fuzzy logic. It allows correct to set functions of accessory and base of rules. Necessary to estimate a possibility of expansion of structure of the studied system that to apply the principles of adaptive control.

Influence of change of parameters of a concrete control object the ACS can be modelled and investigated in any interactive programming environment, for example MatLab, or in applications for mathematical and engineering calculations, such as MathCad, FreeLab. Modeling of behavior of ACS at various parameters of control object gives the chance to estimate limits of change of a square integrated error and quantity of overshoot.

For correct operation of the device of fuzzy logic necessary to adjust it according to the received results of modeling. Generally limits of change of input and output quantity need to specify at setup.

The analysis and the choice of correcting devices, allows to select the correcting devices, most suitable for the studied system, which will allow to improve quality of regulation and to keep stability in ACS.